

**IFCE - INSTITUTO FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS MARACANAÚ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Julietty Barreto Maia de Moraes

**Análise dos Principais Materiais Usados na Fabricação de Geradores Eólicos
e Construção de Protótipo para Microgeração.**

Maracanaú, Ceará

2019

Julietty Barreto Maia de Moraes

Análise dos Principais Materiais Usados na Fabricação de Geradores Eólicos e Construção de Protótipo para Microgeração.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos.

Co-orientador: Prof. Dr. Samuel Vieira Dias.

Maracanaú, Ceará

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário
Gláucio Barreto de Lima - CRB-3/995

M827 Moraes, Julietty Barreto Maia de.
 Análise dos principais materiais usados na
 fabricação de geradores eólicos e construção de
 protótipo para microgeração / Julietty Barreto
 Maia de Moraes -- 2019.
 80 f.

 Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) -
 - Instituto Federal de Educação, Ciência e
 Tecnologia do Ceará, *Campus Maracanaú*, 2019.
 Orientador: Prof. Dr. Francisco Frederico dos
 Santos Matos.
 Co-orientador: Prof. Dr. Samuel Vieira Dias.

 1. ENERGIA EÓLICA. 2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.
 3. AEROGERADOR. I. Título.

CDD 333.92

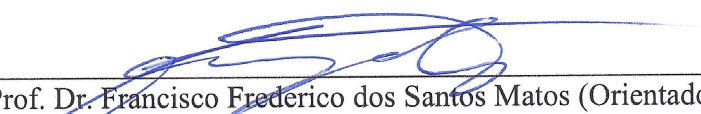
JULIETTY BARRETO MAIA DE MORAIS

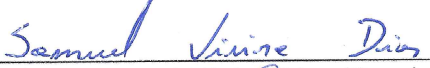
ANÁLISE DOS PRINCIPAIS MATERIAIS USADOS NA FABRICAÇÃO DE
GERADORES EÓLICOS E CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO PARA MICROGERAÇÃO

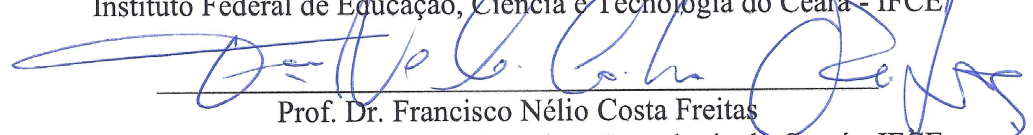
Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

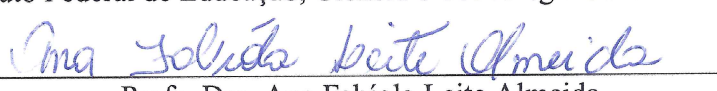
Aprovada em 10 / 09 / 2019

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE


Prof. Dr. Samuel Vieira Dias (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE


Prof. Dr. Francisco Nélcio Costa Freitas
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE


Profa. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida
Universidade Federal do Ceará - UFC

À Deus, minha família e meu noivo.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que enquanto a sua grandiosidade e onipresença sempre esteve na minha vida me dando força para prosseguir. A minha mãe que com o seu carinho, amor e bondade sempre me ensinou a ver o lado bom da vida e continuar em frente. Ao meu pai com sua garra e determinação me mostrando que sempre podemos superar as nossas fraquezas. A minha irmã que me apoiou e sempre me ajudou quando mais precisei, com suas reconfortantes palavras me deram forças para seguir em frente e me mostrou sempre como é importante não desistir, e ao meu irmão que sempre se mostrou ser tão atencioso e interessado no meu crescimento.

Ao Kaio Dutra, que com sua grande determinação e apoio, me mostrou sempre o melhor caminho a seguir e como sempre analisar as situações da forma mais racional possível, me incentivando e me dando bons exemplos a seguir. Aos meus orientadores Francisco Frederico dos Santos Matos e Samuel Vieira Dias. Aos meus professores que em sua grande maioria me inspiraram e me ensinaram com tanta vontade, ao ponto de sempre eu querer crescer e aprender cada vez mais. Aos meus amigos que me apoiaram e me ajudaram sempre que precisei.

*“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai - vos
que as grandes coisas foram conquistadas do que parecia impossível”
(Charles Chaplin)*

Resumo

O gerador elétrico é o principal componente das turbinas eólicas, pois converte a energia mecânica em elétrica e têm sido alvo de estudos para melhoria da eficiência energética através da análise dos materiais que o compõem. Diferente do motor elétrico convencional com disponibilidade energética, o gerador deve ser o mais leve possível, pois não conta com energia disponível para tirá-lo da inércia e acelerá-lo até as rotações de operação. Com a quantidade de trabalhos desenvolvidos nesse sentido, é observado um demasiado esforço para encontrar novos materiais que se apliquem e que também mantenham a resistência e a confiabilidade do produto. A máquina de ímãs permanentes resurgiu nos últimos anos devido ao desenvolvimento dos ímãs de terras raras, considerados super ímãs, a composição Neodímio-Ferro-Boro. Ensaios confirmaram a seleção do ímã N52, devido a sua contribuição para maior tensão induzida no estator. O principal material usado na construção de geradores eólicos de pequeno porte é o aço, e que devido ao seu peso e consequentemente resistência inercial à rotação no equipamento, ele se torna menos indicado para regiões de microgeração. Entre uma das alternativas de materiais leves que possam vir a substituir o aço em algumas regiões do gerador, está o *nylon*, pois o seu uso neste trabalho representou uma queda no momento de inércia rotacional analisado em CAD (Desenho Assistido por Computador). Para tanto, foi feita uma construção e análise preliminar de um gerador de fluxo axial com núcleo toroidal para turbinas eólicas de pequeno porte com o *nylon* aplicado em sua carcaça rotacional. O gerador em si possui uma construção simplificada com o mínimo de material, o suficiente para garantir que a estrutura ficasse estável. Foram realizados alguns ensaios incipientes com o gerador desenvolvido, onde o desempenho elétrico não se mostrou satisfatório, no entanto obteve-se um valor de 12 % para a potência mecânica do *nylon* a mais do que o aço. Este resultado mostra que devido a sua leveza, precisa-se de velocidades menores do que para o aço, para produzir uma rotação no rotor e ter valores superior de potência, o que adequa-se para regiões de microgeração.

Palavras-chaves: Gerador eólico de microgeração; ímãs permanentes; momento de inércia.

Abstract

The electric generator is the main component of wind turbines, as it converts mechanical energy into electrical energy and has been the subject of studies to improve energy efficiency by analyzing the materials that compose it. Unlike the conventional electric motor with energy availability, the generator should be as light as possible as it has no power available to lift it from inertia and accelerate it to operating speeds. With the amount of work done in this regard, too much effort is observed to find new materials that apply and that also maintain the strength and reliability of the product. The permanent magnet machine has resurged in recent years due to the development of rare earth magnets, considered super magnets, the Neodymium-Iron-Boron composition. Tests confirmed the selection of N52 magnets due to their contribution to higher induced stator voltage. The main material used in the construction of small wind generators is steel, and due to its weight and consequently inertial resistance to rotation in the equipment, it becomes less suitable for microgeneration regions. One of the alternatives of lightweight materials that may replace steel in some regions of the generator is the *nylon*, as its use in this work represented a drop in the moment of rotational inertia analyzed in CAD (Computer Aided Design). To this end, a preliminary construction and analysis of a toroidal core axial flow generator for small wind turbines with *nylon* applied to their rotational casing was made. The generator itself has a simplified construction with minimal material enough to ensure that the structure is stable. Some incipient tests were performed with the developed generator, where the electrical performance was not satisfactory, however a value of 12 % was obtained for the mechanical power of *nylon* more than steel. This result shows that because of their lightness, lower speeds than steel are required to produce rotor rotation and higher power values, which is suitable for microgeneration regions.

Key-words: Microgeneration wind generator; permanent magnets; moment of inertia.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução da Geração Eólica em GWh por ano	17
Figura 2 – Distribuição de micro e minigeradores por Estado 2017	18
Figura 3 – Brasil e regiões: potência instalada de geração de energia elétrica por fonte	21
Figura 4 – Potência instalada de usinas eólicas nos estados brasileiros	22
Figura 5 – Tipos de Aerogeradores.	25
Figura 6 – Classificação geral dos geradores.	27
Figura 7 – Desenvolvimento em anos dos ímãs de terras raras	29
Figura 8 – Representação de uma máquina a ímãs permanentes de fluxo axial . . .	31
Figura 9 – Representação de uma máquina a ímãs permanentes de fluxo radial . .	32
Figura 10 – Máximo Produto de Energia	32
Figura 11 – (A) Face única com ranhuras, (B) Face dupla com estator interno sem ranhuras, (c) Face dupla com estator externo e (D) Face dupla com rotor interno.	33
Figura 12 – Formas Construtivas da Máquina de Fluxo Axial	33
Figura 13 – Máquina de Fluxo Axial Toroidal (A) Estrutura Construtiva, (B) Vista Frontal do estator bobinado e (C) Vista Frontal do Disco de ímã. . . .	34
Figura 14 – Direção de Fluxo para máquinas de fluxo magnético axial com rotor (A) Tipo N-N e (B) Tipo N-S.	35
Figura 15 – Curvas de Histerese	36
Figura 16 – Modelo mecânico simplificado de um aerogerador	38
Figura 17 – Máquina completa, detalhe de ímãs, ranhuras e dentes	40
Figura 18 – Peças do rotor do gerador Enersud	41
Figura 19 – Topologia do gerador	42
Figura 20 – Estator bobinado	42
Figura 21 – Esquema do gerador proposto	43
Figura 22 – Gerador confeccionado	44
Figura 23 – Vista do gerador montado	45
Figura 24 – Vista frontal da montagem do rotor e estator	46
Figura 25 – Modelo do gerador G3 de 24 polos	47
Figura 26 – Rotor construído com os ímãs montados	48
Figura 27 – Gerador eólico de eixo vertical para microgeração	52
Figura 28 – Rotor eólico vertical para microgeração	53
Figura 29 – Desenho técnico do rotor eólico vertical	53
Figura 30 – Núcleo de silício	54
Figura 31 – Núcleo de silício	54

Figura 32 – Ímãs de Neodímio Colados	55
Figura 33 – Ímãs de Neodímio no rebaixo usinado	56
Figura 34 – Máquina para bobinar núcleos Toroidais	56
Figura 35 – Bobina Toroidal com núcleo Silício	57
Figura 36 – Bobina Toroidal montada no eixo do gerador	58
Figura 37 – Bancada de testes	58
Figura 38 – Teste de continuidade nas bobinas	60
Figura 39 – Secção da Bobina	60
Figura 40 – Carga de teste	61
Figura 41 – Aerogerador montado com rotor de aço	62
Figura 42 – Aerogerador montado com rotor de nylon	63
Figura 43 – Gráfico Potencia extraida x Velocidade do vento	66
Figura 44 – Momento de inércia para o aço	67
Figura 45 – Momento de inércia para o nylon	68
Figura 46 – Resultado osciloscópio com valores de tensão gerados	70
Figura 47 – Velocidade angular	71
Figura 48 – Comparação da Potência do nylon x aço	71
Figura 49 – Curvas da oscilação da velocidade de vento no IFCE	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Projetos eólicos de geração distribuída nos Estados brasileiros	22
Tabela 2 – Cargas sobre um aerogerador de pequeno porte	51
Tabela 3 – Resumo principais trabalhos	66
Tabela 4 – Tensão gerada, por bobina, em função da velocidade e do tipo de ímãs	69

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AFPMSC	Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
B	Campo de Indução Magnética
Br	Densidade de fluxo remanescente
C	Celsius
CA	Corrente Alternada
CAD	Desenho Assistido por Computador
CC	Corrente Continua
cm	Centímetro Cúbico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
EFCAD	<i>Electromagnetic Fields Computer Aided Design</i>
f	Frequência
FUNCEME	Fundação Cearense de Metrologia e Recursos Hídricos
g	gramas
GWh	Giga Watt hora
GW	Giga Watt
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
H	Campo Magnético
Hz	Hertz
I	Momento de Inércia
kg	Quilogramas
kW	Kilowatt

M	Momento de Inércia rotacional
m	Metro
m/s	Metro/Segundo
mm	milimetro
mW	mili Watt
m	Metros quadrados
N	Número de espiras da Bobina
n	Número de Rotações por minuto
NdFeBr	Neodímio - Ferro - Boro
N-N	Norte Norte
N-S	Norte Sul
P	Fósforo
p	Número de Pares de Pólos
P ²	Potência ao quadrado
PM	Permanent Magnet
R	Raio externo do Rotor
r	Raio interno do Rotor
rad	Radianos
REN	Resolução Normativa
RFPMSM	<i>Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine</i>
RL	Resistor de Carga
RMS	Valor Eficaz de Tensão
RPM	Rotações por Minuto
s	Segundos
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SmCo	Samário Cobalto

t	tempo
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TW	Tera Watt
U	Tensão
UV	Ultra Violeta
V	Volts
W	Watt
Wb	Weber
wg	Velocidade Angular do gerador
wrg	Velocidade Angular do rotor e do gerador
wr	Velocidade Angular do rotor

Lista de símbolos

α	velocidade angular
ϕ	fluxo magnético
θ	ângulo interno
Δ	variação
ϵ	força eletromotriz

Sumário

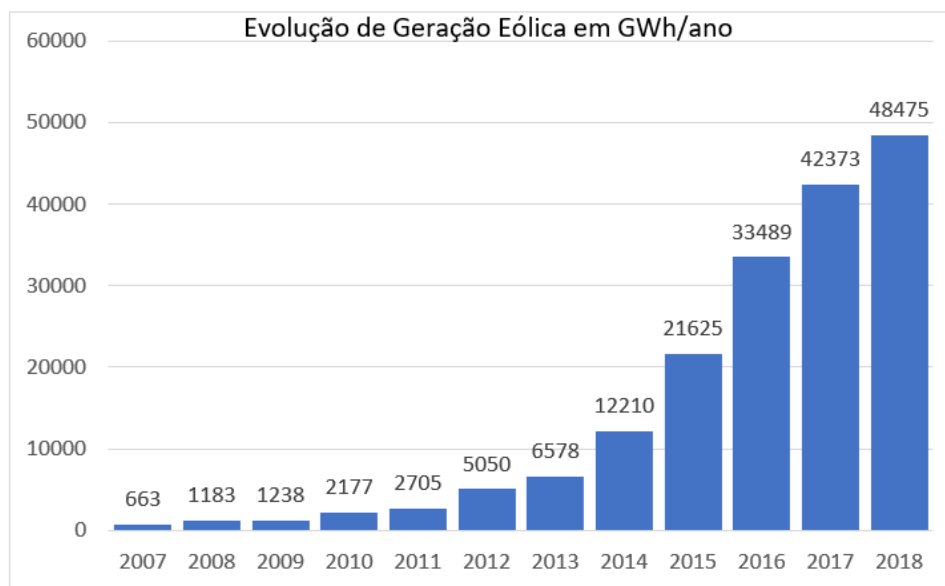
1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Potenciais de Energia eólica	20
1.2	Justificativa	23
1.3	Objetivo Geral	24
1.4	Objetivos Específicos	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Tipos de Turbinas Eólicas	25
2.2	Componentes do Aerogerador	27
2.2.1	Gerador elétrico	27
2.2.1.1	Gerador de Indução ou Assíncrono	29
2.2.1.2	Gerador Síncrono	29
2.3	Gerador síncrono de ímãs permanentes com fluxo axial	30
2.4	Gerador síncrono de ímãs permanentes com fluxo axial com núcleo toroidal	34
2.5	Materiais magnéticos duros	35
2.5.1	Ímã de neodímio ferro boro (Nd-Fe-Bo)	37
2.6	Momento de Inércia	37
2.7	Estudo da Arte	39
2.8	Contribuições da pesquisa	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	Materiais	50
3.1.1	Tecnologia de Materiais	50
3.1.2	Configuração Construtiva	51
3.1.3	Protótipo do gerador eólico	52
3.1.3.1	Rotor eólico	52
3.1.3.2	Estator	53
3.1.3.3	Ímãs de Neodímio	55
3.1.3.4	Construção das Bobinas	56
3.2	Métodos	57
3.2.1	Bancada de testes	57
3.2.2	Análise dos ímãs	59
3.2.3	Análise das bobinas	59
3.2.4	Potência eólica extraída	61
3.2.5	Análise do Momento de Inércia	62

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5	CONCLUSÕES	73
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	74
	REFERÊNCIAS	75

1 Introdução

O crescimento das empresas fabricantes de turbinas eólicas e instalação de novos parques eólicos no Brasil são impulsionados pelo aumento da demanda e pelo constante desenvolvimento de tecnologias cada vez mais econômicas e eficientes. A evidência desse crescimento é observado no aumento de produção da energia elétrica utilizando a energia dos ventos, conforme ilustrado na Figura 1. A tendência é que a geração utilizando esta fonte renovável continue aumentando nos próximos anos, o que pode tornar mais acessível o custo de produção da energia no país. Dentre as opções de tecnologias para a geração de eletricidade consideradas 'limpas', a que se mostra mais promissora, em algumas regiões do Brasil, é a energia obtida a partir dos ventos (EPE, 2018).

Figura 1 – Evolução da Geração Eólica em GWh por ano



Fonte: EPE (2018).

De acordo com a classificação divulgada pela *Global Wind Energy Council (GWEC)*, organização internacional especializada em energia eólica, no início de 2018 a capacidade instalada de produção de energia eólica no Brasil já ultrapassou a marca de 15 GW, representando um crescimento de 19 % de potência em relação a 2016, onde agora ocupa a 8ª posição na classificação mundial (CASTRO, 2017).

Assim como observado na geração de energia eólica provinda de empreendimentos de média e alta potência, a geração distribuída de energia no país tem ganhado um crescimento exponencial com a micro e mini geração de energia, após a publicação da REN 482/12 (Resolução Normativa), que estabelece as condições gerais para a geração elétrica por meio de sistemas de pequeno porte instalados em unidades consumidoras de energia

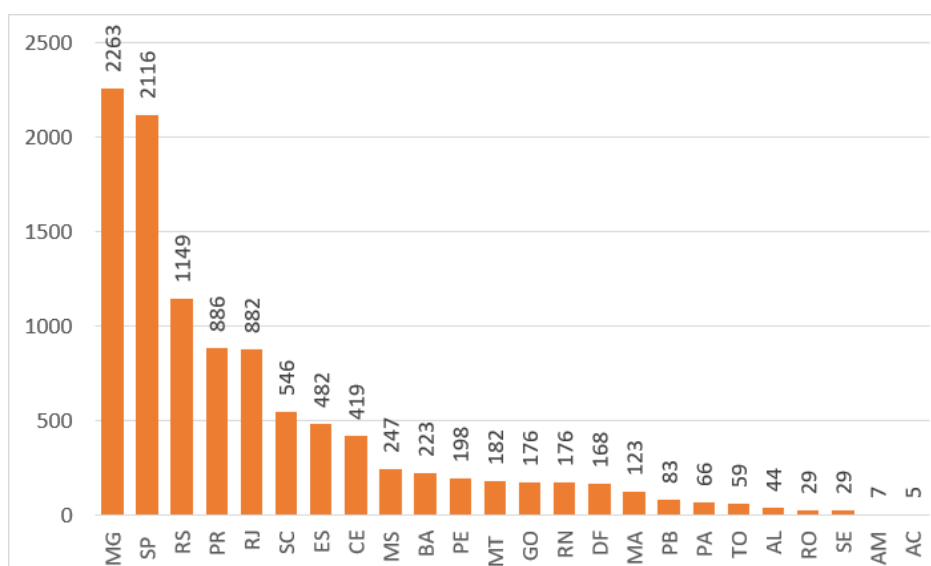
elétrica. Depois foi publicado a REN 687/15 que alterou a REN 482/12 e os módulos 1 e 3 do procedimento de distribuição.

A geração distribuída é uma forma de produção de energia elétrica que se encaixa no contexto do desenvolvimento sustentável. A microgeração corresponde a centrais geradoras no qual a potência instalada seja menor ou igual a 75 KW, a minigeração é constituída por centrais geradoras com potência instalada superior a 75 KW e menor ou igual a 5MW (ANEEL, 2018).

O número de pessoas utilizando a micro geração no ano de 2017 quando comparadas com o ano de 2016 já é 5 vezes maior, porém ainda abaixo do potencial de expansão do país. A fonte solar fotovoltaica representa 99 % do número total de instalações e em segundo lugar tem-se a fonte eólica, para os principais consumidores de energia solar tem-se como destaque a classe residencial com 79,5 % e a classe comercial com 15 % (EPE, 2018).

Quanto ao número de conexões instaladas por estado percebe-se que a região Nordeste é um grande polo de energia eólica, porém os sistemas de micro geração de energia no Ceará são menos explorados quando comparados aos estados de Minas Gerais e São Paulo, conforme a Figura 2. A região nordestina está em 8º colocado dentre todos os estados do Brasil, possuindo 419 conexões no Ceará, mas quando comparado com os outros estados no Nordeste é o melhor colocado e está em 1º lugar (CASTRO, 2017).

Figura 2 – Distribuição de micro e minigeradores por Estado 2017



Fonte: Adaptado Castro (2017).

Ao analisar as regiões do Brasil com o foco na micro e minigeração eólica, a região Nordeste continua a ser o maior polo brasileiro para geração de energia elétrica a partir dos ventos conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). É beneficiado por temporadas de ventos fortes, segundo dados da Fundação Cearense de Metrologia e

Recursos Hídricos (FUNCEME), tornando promissora a utilização de energia eólica na região, apesar da grande maioria (99 %) dos empreendimentos se utilizarem de energia solar.

Os sistemas de geração eólica de micro e mini geração tem uma taxa de retorno até maior que os painéis fotovoltaicos, no entanto devem atuar, assim como os painéis, em zonas urbanas, onde a qualidade do vento é menor que no litoral. Regiões de forte turbulência e oscilações frequentes do vento são encontradas nos grandes centros urbanos. Portanto, equipamentos de geração eólica que respondam rapidamente a tais oscilações são desejados (MOREIRA *et al.*, 2018).

O elemento principal do sistema de geração de energia a partir de fontes eólicas é o aerogerador, sendo o responsável por receber, converter e transmitir a força mecânica dos ventos. O aerogerador é composto pelas pás, eixo, gerador e outros componentes secundários. A diferença de um aerogerador de pequeno porte para um de grande porte, consiste basicamente na menor dimensão dos seus componentes como: pás, gerador e inclusive sua altura. Por isso, ao utilizar um micro gerador é importante analisar o local selecionado e verificar as condições de vento da região.

É importante que o terreno selecionado para a instalação do aerogerador e o entorno da edificação não tenha nenhuma estrutura próxima a localização dele, pois isso pode mudar o comportamento do vento, diminuindo sua intensidade. Kumara *et al.* (2018) mostram a importância da seleção do local. Quanto maior a velocidade do vento projetada sobre a hélice do aerogerador, maior a força para movimentar as pás e com isso se tem uma maior rotação e consequentemente uma maior geração de potência (DAGHIGH *et al.*, 2016).

No sistema eólico, o gerador elétrico é o responsável por converter a energia mecânica do eixo em energia elétrica, onde, para os sistemas de micro geração esse componente funciona sem a utilização da caixa de engrenagens, contando com um arranjo entre ímãs e bobinas sobre o estator, conforme Ahmad e Amin (2017), sendo o último responsável pela energia elétrica disponibilizada. A utilização de um gerador bem dimensionado é de suma importância para manter um alto nível de eficiência de conversão, além da vida útil do equipamento.

Os geradores usados em sistemas eólicos, podem ser divididos em gerador de fluxo radial e de fluxo axial. Na máquina de fluxo radial, o fluxo magnético circula no estator, pelo espaço de ar e pelo rotor. Para a de fluxo axial, o fluxo se processa originando maior conjugado eletromagnético, balanceamento das forças atrativas motor-estator e melhor remoção de calor, apresentando um *air gap* ajustável (PEREIRA *et al.*, 2016).

A utilização de um gerador de fluxo axial com ímãs permanentes apresenta vantagens para: simplificar a estrutura mecânica da turbina eólica, não utilizar a caixa de engrenagens,

reduzir as perdas elétricas, não sendo necessário fonte externa para excitação do campo magnético e tem estrutura leve como uma de suas principais vantagens (MAIA, 2011).

Com a disponibilidade no mercado de ímãs com alta energia e baixo peso, tornou-se possível construir topologias de máquinas com elevada eficiência e com dimensões reduzidas. Assim os geradores de ímãs permanentes aparecem como uma alternativa promissora, onde os geradores de fluxo axial montados com ímãs permanentes se apresentam como uma solução competitiva no mercado, tanto em turbinas eólicas de eixo horizontal como de eixo vertical (WESCHENFELDER *et al.*, 2012b).

A utilização de ímãs permanentes em geradores é de grande importância, pois afeta diretamente o desempenho e custos da máquina. Por isso, fazer uma seleção adequada do ímã, entendendo as suas propriedades magnéticas e mecânicas, assim como a relação que elas têm, influência no bom funcionamento do gerador (ALVES *et al.*, 2005).

Segundo Pereira *et al.* (2016), é de suma importância focar nas características dimensionais do gerador, tais como, níveis de tensão e potência para conexão à rede, compatibilidade da estrutura com relação ao volume e peso, dentre outros. Tais fatores são igualmente determinantes e limitam alguns parâmetros do projeto. Verificou-se que devido ao acoplamento direto do rotor e da turbina eólica se tem limitações estruturais. No entanto, quanto mais leve for o conjunto rotor/gerador, menor será a velocidade inicial de geração, ampliando assim a faixa de produção de energia elétrica.

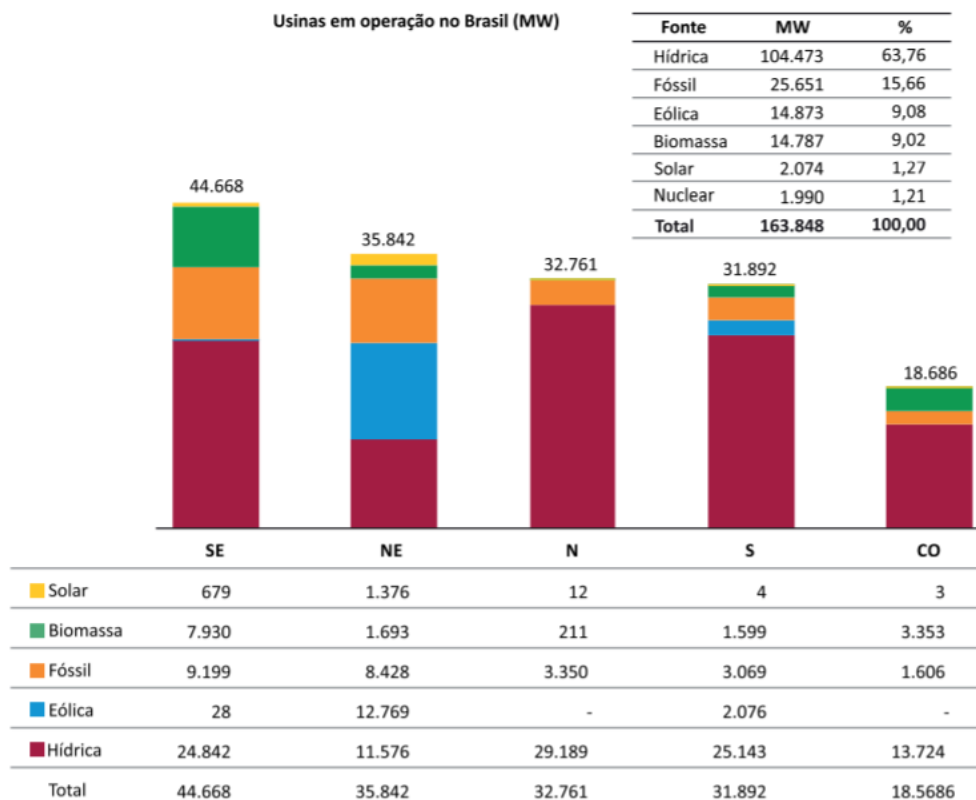
Conforme Albuquerque e Matos (2016), as turbinas de eixo vertical são vantajosas por serem de pequeno porte, porém, as do tipo *Darrieus* geralmente possuem uma elevada inércia inicial sendo necessário um mecanismo de partida.

1.1 Potenciais de Energia eólica

Conforme o atlas de potencial eólico brasileiro Amarante *et al.* (2001) o potencial eólico do Brasil atinge 143 GW, onde desse valor a metade é do Nordeste. Atualmente 15 GW estão instalados e 6,2 GW em construção no país conforme ANEEL (2018). Esse valor foi estimado, tendo como base velocidades de vento no valor médio de 7 m/s a uma altura de 50 metros, porém como as torres no Brasil geralmente ultrapassam 80 metros avalia-se que o potencial eólico brasileiro seja muito maior.

A respeito do potencial brasileiro *offshore* também é imenso, e calcula-se alcançar 1,3TW, onde as regiões costeiras oceânicas do Nordeste possuem as áreas mais favoráveis. Na região nordestina avalia-se um potencial *onshore* de 309 GW, aproximadamente 4 vezes maior do que o publicado no Atlas de potencial eólico brasileiro. A energia eólica vem gradativamente ocupando espaço na matriz elétrica nacional e já é a terceira maior dentre as fontes de geração conforme a Figura 3 (PEREIRA, 2016).

Figura 3 – Brasil e regiões: potência instalada de geração de energia elétrica por fonte



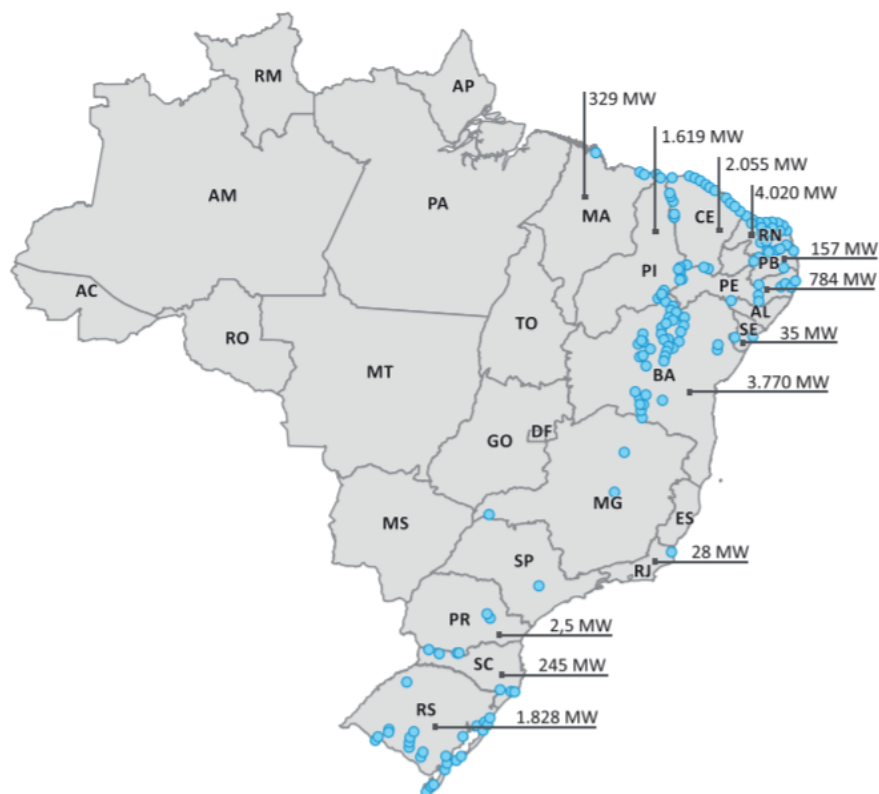
Fonte: Bezerra (2019).

Sobre o potencial eólico brasileiro para microgeração, ainda é necessário se fazer uma avaliação adequada, o atlas de potencial eólico brasileiro como foco na geração de grande porte mostra importantes sítios que possibilitam o crescimento comercial eólico de grande porte no Brasil. No entanto, as publicações de atlas eólicos brasileiros não se aplicam a geração de pequeno porte, pois para as aplicações de mini e microgeração as alturas para análise de velocidade de vento ficam entre 10 a 40 metros de altura e as informações geradas são para alturas a partir de 50 metros conforme Figura 4 (GIANNINI *et al.*, 2013).

Almeja-se, que o Brasil e a região Nordeste possam gerar inovações no campo de geração eólica, fidelizando a implantação dessa tecnologia no país. Destaca-se que estão no Nordeste as áreas que mais favorecem à geração eólica e por isso alguns fabricantes de aerogeradores optaram por instalar suas fábricas nessa região.

Se tratando de geração eólica distribuída, é muito tímida a inserção no Brasil. Tinha-se no país apenas 57 usinas eólicas na modalidade de geração distribuída, totalizando 10,3 MW. Dentre os estados brasileiros cabe destaque ao Ceará que reúne 24 unidades consumidoras e 97 % da capacidade instalada de geração eólica do país em geração distribuída conforme é mostrado na Tabela 1 (BEZERRA, 2019).

Figura 4 – Potência instalada de usinas eólicas nos estados brasileiros



Fonte: Bezerra (2019).

Tabela 1 – Projetos eólicos de geração distribuída nos Estados brasileiros

Estado	Quantidade de usinas	Potência (kW)
Ceará	24	10.065,0
São Paulo	5	34,4
Rio Grande do Norte	7	133,4
Rio Grande do Sul	6	20,7
Paraná	5	35,0
Bahia	2	8,2
Pernambuco	2	5,7
Santa Catarina	3	6,6
Paraíba	1	2,4
Para	1	2,0
Rio de Janeiro	1	1,0
Total	57	10.314,4

Fonte: Adaptado de Bezerra (2019).

Diante do grande potencial eólico que existe no Ceará e da necessidade de aumentar a geração de energia no estado, estudos mostram que o potencial eólico de pequeno porte é significativo e que é possível a utilização deles em centros urbanos, regiões inviáveis para o uso de parques eólicos de grande porte. Portanto, a geração doméstica pode ser explorada onde os aerogeradores tenham a capacidade de produzir energia em baixas e intermitente velocidades do vento (GIANNINI *et al.*, 2013).

Os valores de velocidade média de vento para mini e micro geração são de aproximadamente 4 a 6,5m/s na região do litoral Cearense. As aplicações de pequeno porte podem usar ventos intermitentes nas regiões de grandes centros. No período de Agosto à Dezembro se tem um valor de velocidade de vento mais alto em média de 10m/s consideravelmente maior (LIRA *et al.*, 2011).

No Ceará, a micro e mini geração vem crescendo e conta com 24 unidades consumidoras com geração distribuída de aerogeradores de pequeno porte, totalizando uma potência instalada de 10.065 KW. A geração eólica no estado por meio de unidades consumidoras ainda está baixa principalmente quando comparada a solar que tem 20.828 KW. As unidades produtoras eólicas no Ceará estão instaladas no município de Fortaleza (8), Aquiraz (7), Eusébio (5), Caucaia (2), Maracanaú (1), Trairi (1) (IPECEL, 2018).

Com o crescimento da geração distribuída de micro e minigeração eólica no Ceará, verifica-se um aumento da possibilidade de expansão nas regiões urbanas. Neste trabalho é realizado um levantamento bibliográfico do uso de materiais nos geradores eólicos, as configurações construtivas para aerogeradores de pequeno porte existentes para a geração de energia elétrica, as velocidades de vento locais e a potência gerada para diferentes tipos de materiais usados na construção dos geradores eólicos. Foi avaliado a construção de um gerador eólico de fluxo axial para micro geração adaptado as exigências locais no município de Maracanaú/Ce, que é uma região urbana.

1.2 Justificativa

Com base em um levantamento bibliográfico verificou-se a necessidade de ampliar a microgeração no Ceará, desenvolvendo um gerador eólico de fluxo axial para pequenas turbinas, onde o *nylon* foi usado como material principal para o corpo do gerador. As justificativas para esse trabalho são:

- 1 É observada uma forte demanda por sistemas de geração distribuída no Ceará;
- 2 Poucos trabalhos foram encontrados com análises em baixas rotações para microgeração no estado;

- 3 Não foram encontrados trabalhos com uma análise comparativa entre as propriedades e materiais dos microgeradores;

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é comparar diferentes tipos de aerogeradores de pequeno porte referente aos seus principais componentes e principalmente dos materiais utilizados na construção deles, assim como, desenvolver um microgerador de fluxo axial para pequenas turbinas eólicas de eixo vertical, onde busca-se um menor peso.

1.4 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos apresentam-se:

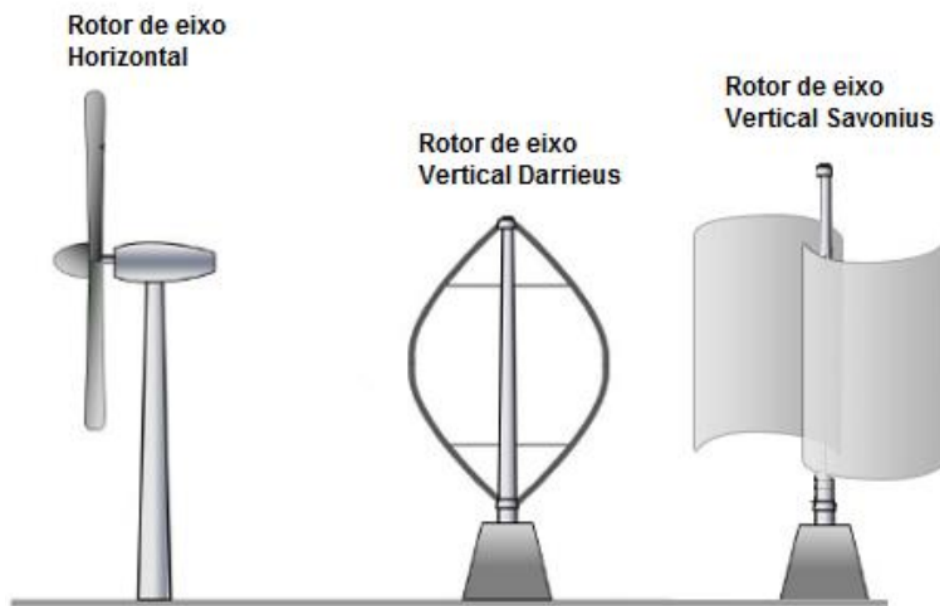
- a) Analisar as condições climáticas para instalação de microgeradores;
- b) Identificar os principais componentes utilizados nos microgeradores e os seus materiais de construção;
- c) Fazer uma seleção adequada do ímã a ser usado no projeto e entender as suas propriedades magnéticas;
- d) Testar o *nylon* como material de construção de um minigerador eólico para as condições de vento de Maracanaú-Ce;
- e) Realizar análise do momento de inércia mássico com o *software* de CAD dos principais materiais utilizados na bibliografia de referência.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Tipos de Turbinas Eólicas

Os aerogeradores podem ser classificados quanto a configuração das turbinas eólicas, sendo eles de eixo vertical (TEEV) e de eixo horizontal (TEEH). A maioria das turbinas existentes são de eixo horizontal, onde as pás rodam em torno de um eixo que deve permanecer alinhado com a direção do vento. Para os rotores de eixo vertical o seu eixo de rotação é perpendicular a direção do vento, operando com ventos de qualquer direção. Para os rotores de eixo vertical existem duas configurações principais, *Savonius* e *Darrieus*, apresentados na Figura 5 ([TOLMASQUIM, 2016](#)).

Figura 5 – Tipos de Aerogeradores.



Fonte: [Tolmasquim \(2016\)](#).

No rotor tipo *Savonius* tem-se que a geração de energia ocorre em sua maior parte pela absorção da força de arrasto, de pressão, onde as suas principais características são o seu alto torque, baixa velocidade e baixa eficiência. Para o rotor tipo *Darrieus* tem-se que a geração de energia é feita usando as forças de sustentação que ocorrem em perfis de pás aerodinamicamente projetadas e uma de suas particularidades são as elevadas velocidades e altas eficiências ([HUI *et al.*, 2018](#)).

As turbinas do tipo Darrieus são disponíveis com duas e três lâminas finas, curvas ou retas e o interesse no seu uso tem crescido devido a algumas vantagens em relação às turbinas de eixo horizontal, como por exemplo ([REZAEIHA *et al.*, 2018](#)):

- 1 Baixo ruído, devido a diâmetro pequeno e a velocidade baixa na ponta da lâmina;
- 2 Baixo custo de fabricação, pois tem um perfil simples de lâmina assim como o sistema de controle;
- 3 Baixo custo de instalação e manutenção, devido às baixas altitudes do equipamento a manutenção se torna mais acessível;
- 4 Escalabilidade: a altura da turbina pode aumentar de escala com um efeito mínimo de desempenho;
- 5 Robustez e confiabilidade;
- 6 Alta eficiência de espaço, por ter uma área de plano menor quando comparada com as turbinas de eixo vertical

De acordo com [Ahmad e Amin \(2017\)](#), o uso de mecanismos de engrenagem é a principal desvantagem das turbinas eólicas, causando perdas de eficiência e aumentando o investimento inicial. Esta caixa de engrenagens pode ser eliminada quando o gerador é acionado diretamente pelo eixo do rotor, reduzindo assim as perdas de energia, o custo de manutenção e, portanto, o custo total.

A microgeração de energia está se tornando uma das formas mais baratas de se ter acesso a energia. Quando se utilizam turbinas de pequeno porte, tem-se a vantagem e a facilidade de instalá-las em um maior número de lugares. Turbinas de pequenas dimensões podem ser instaladas em universidades, escolas, casas, hotéis, fazendas e instalações industriais.

Para os geradores síncronos de pequeno porte conforme [Alves et al. \(2005\)](#) quando conectados na rede de distribuição tem controle diferente dos valores de tensão e frequência. Verifica-se que durante o máximo carregamento a instalação de um gerador de corrente alternada ajuda a diminuir as perdas elétricas no sistema, e o uso de gerador síncrono aumenta a margem de estabilidade de tensão de um sistema.

Apesar do crescimento expressivo, a aceitação das turbinas eólicas de pequeno porte na região urbana ainda é pequena, a maior parte dos fabricantes de turbinas eólicas de eixo vertical se encontra na China, Europa e Estados Unidos da América. É necessário realizar mais pesquisas para mostrar a viabilidade dessas turbinas, a sua confiabilidade e de que a mesma é uma solução de energia acessível para muitas aplicações de baixa demanda ([KUMARA et al., 2018](#)).

Conforme [Pereira et al. \(2016\)](#), o gerador de ímãs permanentes tem se mostrado mais eficiente do que os de excitação de campo, por serem mais fáceis de se construir, mostrando e podendo apresentar um grande número de polos em operações com baixa velocidade de operação. No trabalho citado foi necessário usar dois estatores para se obter

a tensão de 12 volts, aumentando o custo e a complexidade do projeto. As perdas devido a contra-corrente gerada nas bobinas, são minimizadas com o uso de fios de cobre de pequeno diâmetro de secção e por denso enrolamento, limitando o valor da carga por não suportar altas resistências.

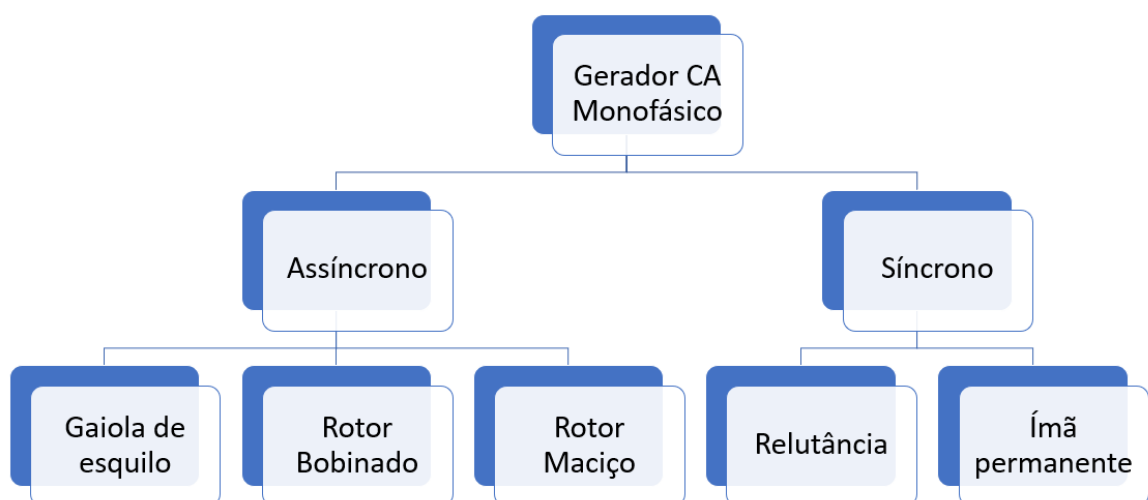
2.2 Componentes do Aero gerador

Os componentes principais dos aerogeradores de pequeno porte de eixo vertical são: o rotor, o eixo e o gerador. O rotor é formado basicamente pelo conjunto das pás, o eixo é o elo que transfere a energia captada no rotor para o gerador e este é responsável pela conversão de energia mecânica em elétrica (TOLMASQUIM, 2016). Nos rotores de eixo horizontal e de eixo vertical, é mais comum se utilizar três pás, devido a relação entre a eficiência aerodinâmica, custo, velocidade de rotação, peso, estabilidade e ruído. (DUTRA, 2008).

2.2.1 Gerador elétrico

As máquinas elétricas que funcionam como gerador, são responsáveis por transformar a energia mecânica em energia elétrica. Os geradores são dimensionados conforme a necessidade de energia. Diversos tipos de geradores podem ser usados em turbina eólicas, sendo classificados em Máquinas Assíncronas ou Máquinas Síncronas, conforme mostrado na Figura 6 (FITZGERALD, 2006).

Figura 6 – Classificação geral dos geradores.



Fonte: Autor.

Pode-se afirmar que na construção das máquinas rotativas existem duas partes principais, o rotor e o estator. O estator é a parte fixa das máquinas, onde geralmente

tem sua estrutura feita por chapas de aço laminadas, e o rotor é a parte rotacional da máquina, onde nele também podem ser colocados ímãs, dependendo da configuração da máquina (NIADA *et al.*, 2015).

Uma das principais diferenças das máquinas elétricas está na construção do rotor e do estator conforme Figura 4, pois eles podem ser construídos com diferentes arranjos e diferentes tipos de materiais. A dimensão dos mesmos tem sua relevância para a obtenção de bons resultados, pois conforme modifica-se seu diâmetro e sua rotação obtêm-se modificações na potência extraída.

A máquina síncrona de ímãs permanentes, objeto de estudo deste trabalho, utilizam ímãs com fluxo magnético constante, os ímãs em alguns casos são fixados na superfície do rotor ou podem ser embutidos no mesmo. Neste tipo de máquina suas principais classificações são (KUMARA *et al.*, 2018):

- 1 Máquina de fluxo axial com ímãs permanentes de rotor simples e estator simples;
- 2 Máquina de fluxo axial com ímãs permanentes de rotor simples e estator duplo;
- 3 Máquina de fluxo axial com ímãs permanentes de rotor duplo e estator simples;
- 4 Máquina de fluxo axial com ímãs permanentes de múltiplos rotor e estator.

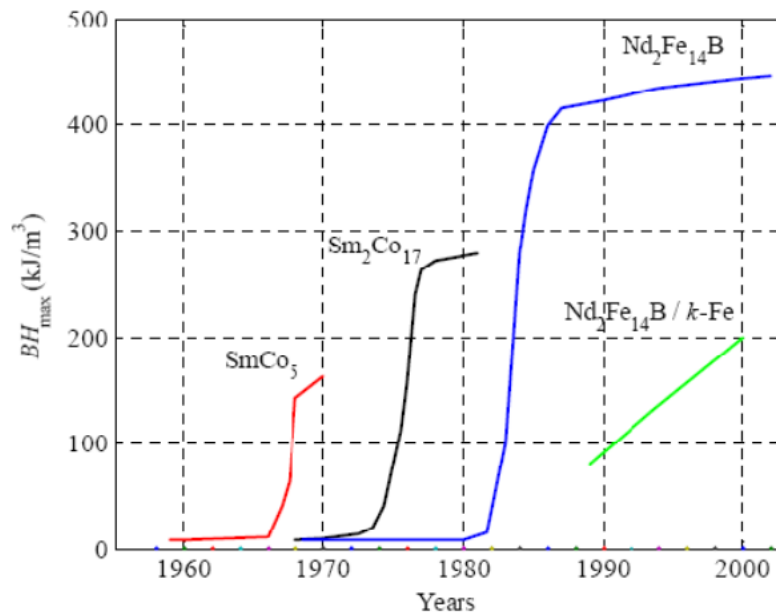
A utilização de ímãs permanentes com alto produto energético, substituindo os enrolamentos de campo em máquinas elétricas, tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. A partir da utilização de novos materiais magnéticos, como os ímãs permanentes de terras raras, que possuem um produto energético ($BH_{\text{máx}}$) superior a ferrita, obteve-se um importante desenvolvimento conforme mostrado na Figura 7 (WESCHENFELDER *et al.*, 2012a).

Dentre os mais variados tipos de geradores eólicos, os de ímãs permanentes aparecem como uma alternativa promissora. Com a disponibilidade no mercado de ímãs com alta energia, é possível construir topologias de máquinas com alta eficiência e com dimensões mais reduzidas. Sendo mais específico aos geradores de ímãs permanentes, com fluxo axial, onde estes se mostram como uma solução competitiva no mercado (WESCHENFELDER *et al.*, 2012a).

A utilização de ímãs permanentes em geradores é de grande importância, pois afeta diretamente o desempenho e custo da máquina. Por isso, fazer uma seleção adequada do ímã, entendendo as suas propriedades magnéticas e mecânicas, assim como a relação que elas têm, influencia totalmente para um bom funcionamento do gerador (AHMAD; AMIN, 2017).

As novas configurações das máquinas elétricas resultaram em altos rendimentos, assim como em outras características que são difíceis de comparar com máquinas sem

Figura 7 – Desenvolvimento em anos dos ímãs de terras raras



Fonte: S.Deshpande (2003)

ímãs permanentes. A utilização desses ímãs diminui os riscos de desmagnetização, uma vez que esses ímãs possuem elevada coercitividade, além de possibilitar o desenvolvimento de máquinas com uma elevada relação torque/volume (KAHOURZADE *et al.*, 2014).

O avanço da tecnologia já permite realizar simulações e estimar o real comportamento dos geradores com ímãs permanentes de alta energia quando comparados aos ímãs de baixa energia. Para caracterizar o ímã permanente é importante conhecer seu ciclo de histerese e analisar o segundo quadrante, que corresponde a curva de desmagnetização. Assim como os ferromagnéticos, os ímãs permanentes, podem ser caracterizados pela curva de histerese B-H (STRNAT, 1990).

2.2.1.1 Gerador de Indução ou Assíncrono

Para os geradores Assíncronos ou de indução afirma-se que eles necessitam de um maior torque de partida e que as variações de rotações possíveis são limitadas, dentro da margem de escorregamento dele. O que permite maior elasticidade em rotações, reduz tensões mecânicas e variações elevadas de potência gerada por rajadas de ventos de curta duração, são mais robustos, requerem mínima manutenção e possuem uma extensa vida em operação (AZEVEDO, 2012).

2.2.1.2 Gerador Síncrono

O gerador síncrono converte energia mecânica em elétrica, o nome dessa máquina se deve ao fato de operar em uma velocidade de rotação constante e sincronizada com

a frequência de tensão elétrica alternada aplicada nos terminais da mesma. O gerador estando ligado a rede elétrica tem sua rotação estabelecida pela frequência da rede (MAIA, 2011).

Tem como principal vantagem de não ter virtualmente limitação de potência para a sua fabricação, também podem ser ligados diretamente a rede elétrica, tem alta eficiência e possui melhor controle do fator de potência da carga. Porém necessitam de regulador de tensão e é necessário manter velocidade de rotação constante no sistema, devido a frequência depender da constância da velocidade de rotação.

2.3 Gerador síncrono de ímãs permanentes com fluxo axial

Nos geradores eólicos de ímãs permanentes a tecnologia simplificada possui um menor volume. O seu sistema de excitação funciona por meio de uma excitatriz auxiliar, constituída por um campo magnético constante produzido por uma peça magnetizada antes da montagem e induz uma tensão elétrica nos enrolamentos de armadura ao girar em torno desses. Com isso, os geradores de ímãs permanentes, com fluxo axial se mostram como uma solução competitiva no setor de geração eólica (PEREIRA *et al.*, 2016).

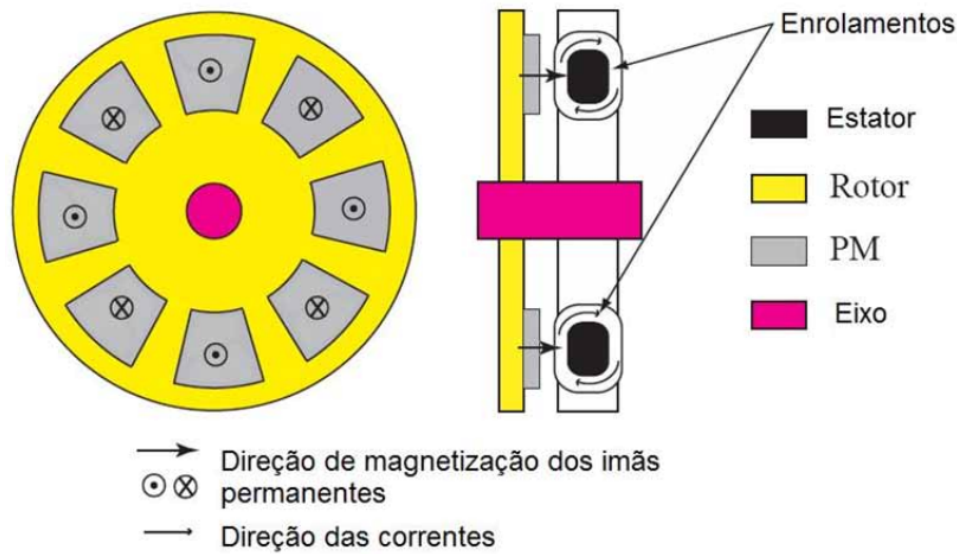
Apesar do histórico da máquina de fluxo axial ser antiga, ela deixou de ser utilizada por cerca de cem anos, devido à precariedade de fabricação e ao pouco desenvolvimento dos ímãs permanentes de alta densidade energética (MAIA, 2011).

Com o esperado desenvolvimento dos ímãs permanentes de terras raras e também ao progresso da eletrônica de potência, os geradores de ímãs permanentes evoluíram muito nos últimos anos. São recentes, mas já possuem certa evolução, apresentando boa eficiência e densidade de potência. Devido ao princípio de funcionamento dos geradores e a possibilidade de serem montados sem escovas ocasionando na substituição das máquinas de corrente contínua e das máquinas de indução, em diversos setores (AHMAD; AMIN, 2017).

Existem duas classificações para as máquinas síncronas de ímãs permanentes: as de fluxo axial (AFPMSM - *Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine*) e as de fluxo radial (RFPMSM - *Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine*). A de fluxo axial conforme mostrado na Figura 8, vem sendo utilizada em turbinas eólicas, tendo como uma de suas principais vantagens a portabilidade (AZEVEDO, 2012).

A máquina de fluxo axial tem rotor e estator no formato de disco, e podem ter um grande diâmetro no rotor possuindo um alto momento de inércia. Dependendo das suas dimensões podem acomodar um grande número de par de polos, permitindo com isso que operem em baixas rotações, onde nos trabalhos citados como Maia (2011) Ahmad e Amin (2017) Daghigh *et al.* (2016) e Pereira *et al.* (2016), foram feitos testes apenas

Figura 8 – Representação de uma máquina a ímãs permanentes de fluxo axial



Fonte: [Libert \(2004\)](#)

para altas rotações.

A direção do fluxo magnético é paralelo ao sentido de rotação, onde existem poucos registros comerciais para essa configuração. Elas demonstram superioridade em densidade de potência e reduzido volume efetivo, o que favorece a utilização dessa topologia em sistemas eólicos conforme visto em [Wang *et al.* \(2015\)](#), [Ahmad e Amin \(2017\)](#), [Rezaeiha *et al.* \(2018\)](#) [Daghighi *et al.* \(2016\)](#) e [Jung \(2012\)](#).

Para o fluxo magnético, a orientação no interior da máquina elétrica pode proporcionar diferenças entre tamanho, potência e eficiência, considerando potências equivalentes com orientação de fluxo diferente. Para o caso de um gerador eólico onde uma maior densidade de potência pode ser obtida, as máquinas de orientação axial superam os projetos de máquinas de orientação radial ([KAHOURZADE *et al.*, 2014](#)).

No caso da potência para a máquina de fluxo axial Figura 8, a sua estrutura eletromagnética é semelhante a de fluxo radial ilustrada na Figura 9, permitindo concluir que seu processo de construção e montagem é igualmente complexo ([MAIA, 2011](#)).

A máquina de ímãs permanentes resurgiu nos últimos anos devido ao desenvolvimento de ímãs de terras raras como o Neodímio - Ferro - Boro (NdFeBr) e ao barateamento dessa liga, dando mais alternativas para essa configuração de geração de energia de fluxo axial ([WESCHENFELDER *et al.*, 2012a](#)).

O ímã mais utilizado em máquinas elétricas rotativas é o Neodímio-Ferro-Boro devido a sua grande densidade de fluxo, conforme Figura 10. Os dois tipos principais de máquinas com fluxo axial são classificados nos que contém escova e nos sem escova. A

Figura 9 – Representação de uma máquina a ímãs permanentes de fluxo radial

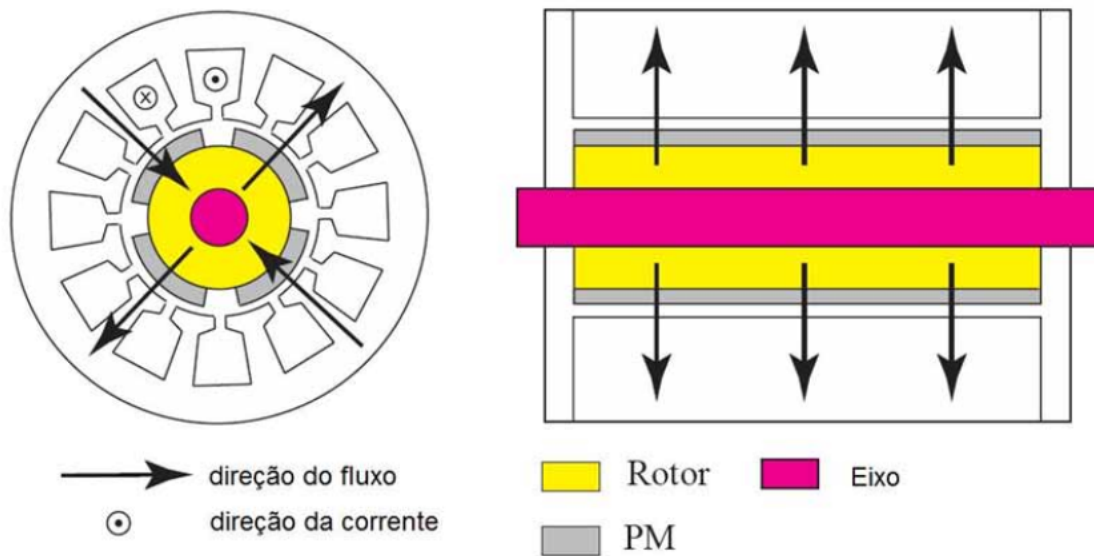
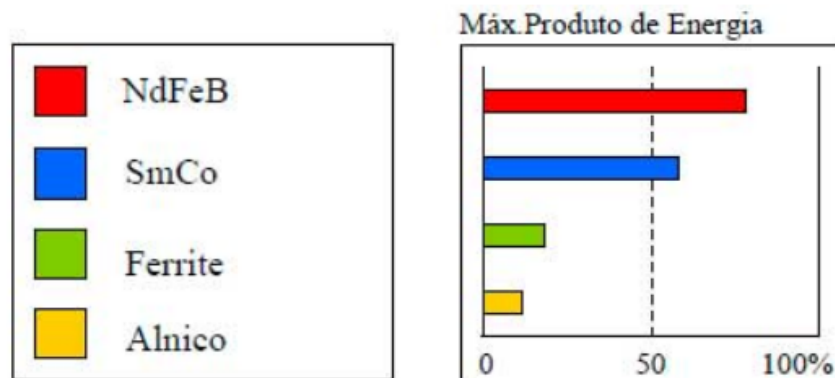
Fonte: Autor [Libert \(2004\)](#)

Figura 10 – Máximo Produto de Energia



Fonte: Adaptado Autor

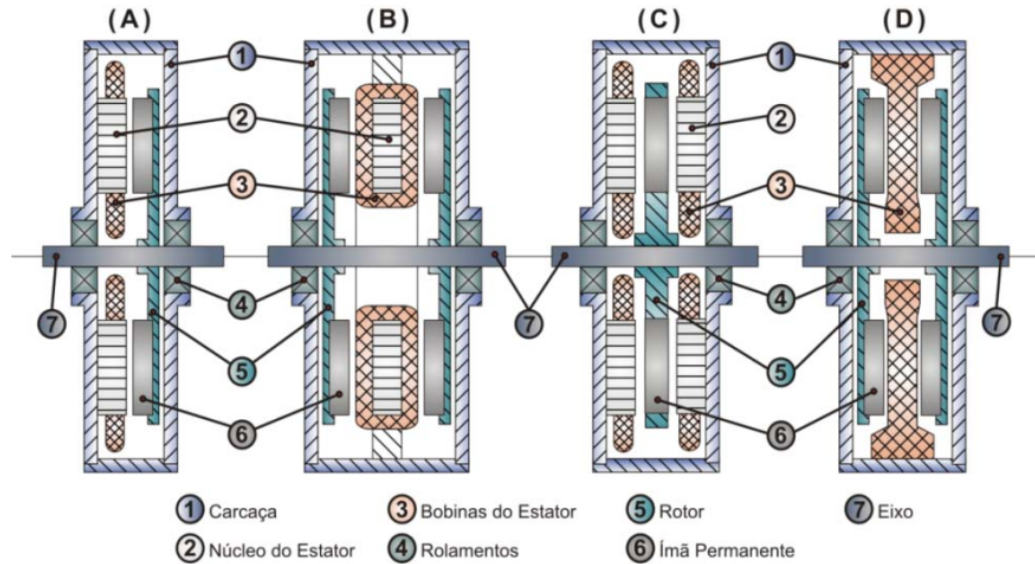
que contém escovas são restritas às aplicações específicas, gera ruído e aumenta o custo de fabricação. Ela gera na saída da máquina uma tensão contínua. As do tipo sem escova são mais utilizadas e concretizadas, possui estator fixo, rotor e ímã permanente com diversas formas construtivas ([WESCHENFELDER et al., 2012b](#)).

As máquinas sem escovas podem ser divididas em máquinas CC sem escova, onde a forma de onda da tensão é trapezoidal e a máquina é operada com corrente contínua. E também em máquina CA síncrona em que a forma de tensão de onda é sinusoidal. As diferenças estruturais dessas duas máquinas são muito pequenas ([FITZGERALD, 2006](#)).

Tem-se muitas configurações possíveis para a construção de uma máquina síncrona, alguns exemplos conforme identificado na Figura 11, onde é possível montar máquinas

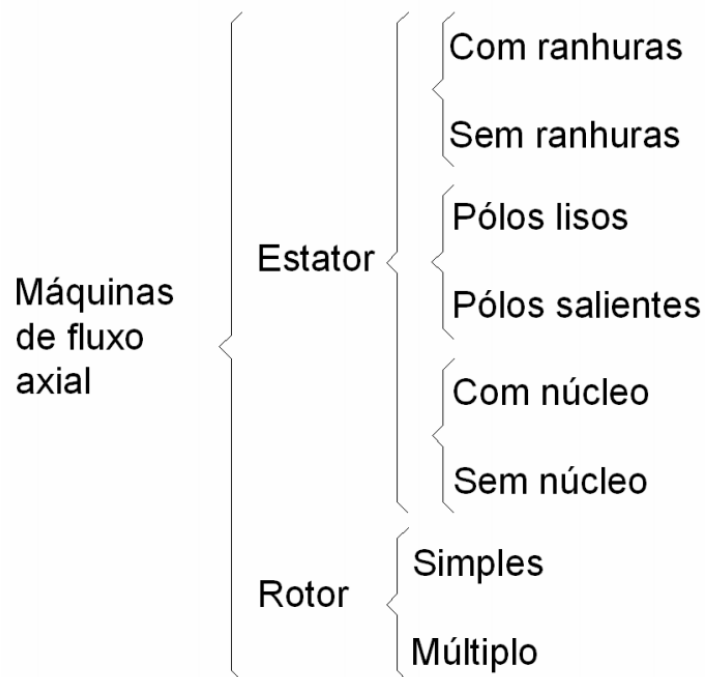
em disco de face única ou dupla face, com ou sem ranhura, com rotor a ímã interno ou externo. Classifica-se as máquinas de fluxo axial de diversas formas conforme a Figura 12 (KUMARA *et al.*, 2018).

Figura 11 – (A) Face única com ranhuras, (B) Face dupla com estator interno sem ranhuras, (c) Face dupla com estator externo e (D) Face dupla com rotor interno.



Fonte: Tibola (2009)

Figura 12 – Formas Construtivas da Máquina de Fluxo Axial

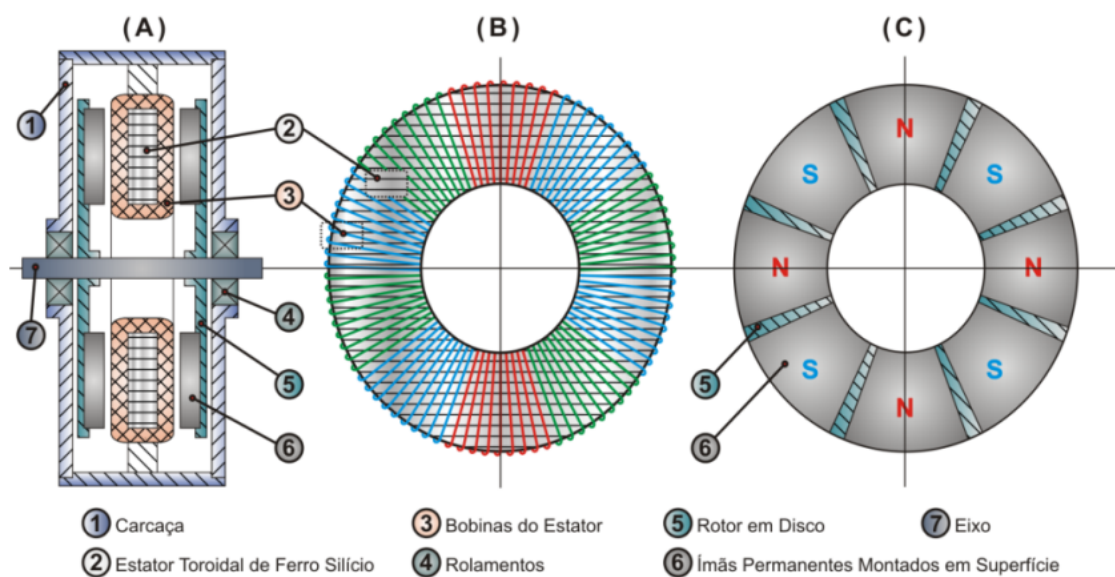


Fonte: Loureiro (2008)

2.4 Gerador síncrono de ímãs permanentes com fluxo axial com núcleo toroidal

É uma máquina de fluxo axial com pequeno comprimento axial, constituída por estator simples e rotor duplo, é denominada Torus coforme a Figura 13. A utilização de ímãs permanentes na referida máquina possibilitou a obtenção de uma relação conjugado x massa atraente. A disposição do rotor proporciona uma boa ventilação para os enrolamentos do estator (AZEVEDO, 2012).

Figura 13 – Máquina de Fluxo Axial Toroidal (A) Estrutura Construtiva, (B) Vista Frontal do estator bobinado e (C) Vista Frontal do Disco de ímã.



Fonte: Tibola (2009)

Os enrolamentos são constituídos por bobinas montadas em torno do núcleo do estator que é toroidal. O núcleo pode ser constituído com ou sem ranhuras, contribuindo para reduzir as indutâncias das bobinas. A utilização de ímãs permanentes possibilita a redução de volume e de massa, e a obtenção de carregamento elétrico elevado (FITZGERALD, 2006).

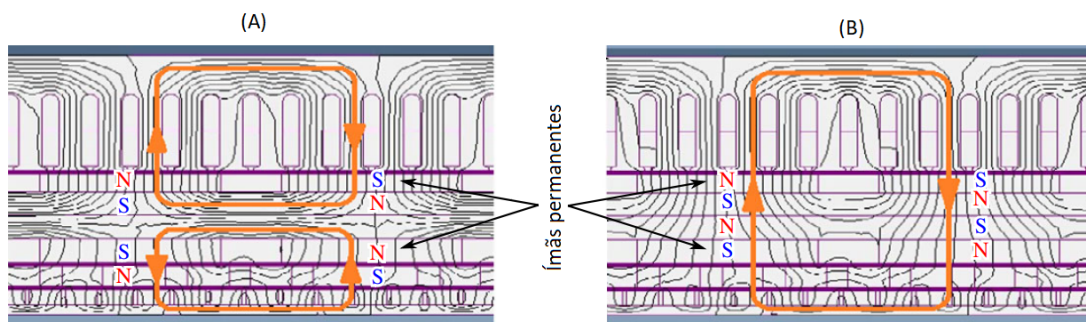
O carregamento magnético elevado possibilita a obtenção de forças eletromotrizes especificadas com pequenos números de espiras, e resistências e indutâncias reduzidas. Os rotores são dois discos com ímãs polarizados axialmente. Devido a sua topologia compacta com pequeno comprimento axial, a máquina Torus se adequa mecanicamente para integração com o rotor da turbina eólica, podendo ser montada diretamente no local de junção das pás do rotor eólico (OSORIO, 2011).

A máquina sem ranhuras apresenta uma vantagem adicional que é um menor torque de relutância, em função da não interação entre os ímãs permanentes do rotor e a ranhuras

do estator. A principal desvantagem da máquina deve-se ao grande entreferro que ela possui. Esta característica requer ímãs de maior espessura o que eleva o custo da máquina (MAIA, 2011).

Com relação ao seu fluxo magnético ele pode ser apresentado de duas formas N-N e N-S, mostrado na Figura 14, as figuras estão com estator ranhurado, mas o mesmo fluxo se aplica para o estator sem ranhuras. Tem-se na Figura 14.a que o caminho do fluxo é por dentro do estator, que pede um núcleo com maior largura. Na 14.b, o fluxo principal flui axialmente pelo estator, onde ele requer pequena largura do núcleo (RAMOS, 2015).

Figura 14 – Direção de Fluxo para máquinas de fluxo magnético axial com rotor (A) Tipo N-N e (B) Tipo N-S.



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2015).

Com a rotação do rotor, a forma da onda de fluxo passa pelas bobinas. Onde a tensão induzida resultante nos terminais de uma bobina é uma função do tempo, tendo a mesma forma de onda da distribuição da indução magnética. A tensão da bobina passa por um ciclo completo para cada rotação de p polos. A frequência em ciclos por segundos [Hz], se a máquina possuísse somente um par de polos, ela teria sua velocidade igual a do rotor em rotações por segundo, mas com maior quantidade de pares de polos a rotação será influenciada por eles (AZEVEDO, 2012).

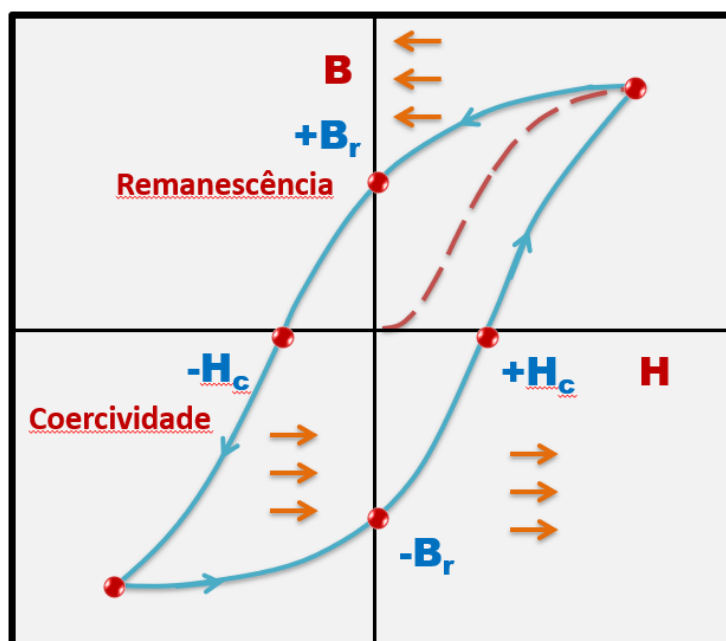
Os ímãs são distribuídos e fixados no rotor, onde os seus polos estão montados de forma alternada na polaridade norte e sul, quanto maior o número de polos maior a frequência para uma rotação, devido a tensão em uma bobina passar por mais ciclos completos por revolução no rotor. A tensão induzida em uma bobina passa por um ciclo completo toda vez que um par de polos passa por ela ou $p/2$ vezes cada rotação (LOUREIRO, 2008).

2.5 Materiais magnéticos duros

Materiais magnéticos se caracterizam por apresentar um magnetismo residual também chamado de remanência. Magnéticos duros são utilizados em ímãs permanentes e possuem um elevado produto energético, ou seja, maior capacidade de armazenar energia na

ausência de um campo magnético externo, ou seja, refere-se a máxima força magnética que se pode atingir ou magnetizar um ímã. Para caracterizar o ímã permanente é importante conhecer seu ciclo de histerese e analisar o segundo quadrante, que corresponde à curva de desmagnetização, mostrado na Figura 15. Assim como os ferromagnéticos os ímãs permanentes, podem ser caracterizados pela curva de histerese B-H (CALLISTER, 2016).

Figura 15 – Curvas de Histerese



Fonte: Adaptado de Callister (2016).

Quando o campo magnético aplicado em um material ferromagnético for aumentado até a saturação e em seguida for diminuído, a densidade de fluxo B não diminui tão rapidamente quanto o campo H. Dessa forma quando H chega a zero, ainda existe uma densidade de fluxo remanescente, B_r . Para que B chegue a zero, é necessário aplicar um campo negativo, chamado de força coercitiva. Se H continuar aumentando no sentido negativo, o material é magnetizado com polaridade oposta (FERREIRA, 2000).

Desse modo, a magnetização inicialmente será fácil, até quando se aproxima da saturação, passando a ser difícil. A redução do campo novamente a zero deixa uma densidade de fluxo remanescente, $-B_r$, e, para reduzir B a zero, deve-se aplicar uma força coercitiva no sentido positivo. Aumentando-se mais ainda o campo, o material fica novamente saturado, com a polaridade inicial. Esse fenômeno que causa o atraso entre densidade de fluxo e campo magnético é chamado de histerese magnética, enquanto o ciclo traçado pela curva de magnetização é chamado de ciclo de histerese (LUCIANO; SILVA, 1997).

Quando uma barra de aço não está magnetizada, seus domínios magnéticos estão dispostos de maneira aleatória. Porém, ao aplicar uma força magnetizante, os domínios se

alinham com o campo aplicado. Se o sentido do campo for invertido, os domínios também invertem sua orientação ([CALLISTER, 2016](#))

Em um gerador, o campo magnético muda de sentido muitas vezes por segundo, de acordo com o sinal alternado aplicado. O mesmo ocorre com os domínios do material do núcleo. Ao inverter sua orientação, os domínios precisam superar o atrito e a inércia. Ao fazer isso, dissipam certa quantidade de potência na forma de calor, que é chamada de perda por histerese ([WESCHENFELDER *et al.*, 2012a](#)).

2.5.1 Ímã de neodímio ferro boro (Nd-Fe-Bo)

Considerados super ímãs, a composição Neodímio-Ferro-Boro, faz parte da segunda geração dos Terras-Raras. A presença do neodímio é justificada devido a maior abundância em relação ao samário, e o ferro substitui o cobalto, elemento de elevado custo. São os materiais magnéticos com maiores valores de produto energético e força coerciva ([FERREIRA, 2000](#)).

2.6 Momento de Inércia

Quando o gerador é considerado como sendo um corpo rígido, sua massa e seu momento de inércia podem ser facilmente avaliados na maioria dos programas de CAD atuais, com modelo tridimensionais. Mesmo tendo geometria complexa de pás, a massa e o momento de inércia do rotor podem ser avaliados. Por outro lado, as propriedades de inércia do rotor também devem levar em conta o efeito do escoamento. O atrito, assim como a massa e a inércia do rotor influenciam na sua aceleração e desaceleração, quando existe variação do vento ou de carga. Seria importante analisar esse comportamento nas partes do gerador, levando em consideração todos os seus componentes ([MAGNOLI, 2005](#))

No gerador devido a magnetização dos polos e do estator, surgem forças de atração entre ambos que, se distribuem de maneira axissimétrica ao redor do rotor do gerador. Com isso, todo o carregamento se balancearia e a resultante dessas forças seriam nulas. O gerador possui grande influência nos resultados dos cálculos da linha de eixo. Por isso, suas características dinâmicas devem ser modeladas com precisão ([ARAB *et al.*, 2017](#)).

Conforme [Magnoli \(2005\)](#) o gerador não se comporta rigidamente em relação ao eixo, mas sim de maneira elástica, fazendo com que as velocidades angulares críticas sejam alteradas e também o modo de vibrar e o movimento do sistema. Admite-se a importância do efeito elástico do gerador, porém ele não é incluído na modelagem, onde se torna interessante realizar essa análise e ver qual seu comportamento.

O eixo da máquina contribui para a dinâmica do sistema com massa e rigidez. Apesar de sua massa ser pequena se comparada ao gerador e ao rotor da turbina ela não

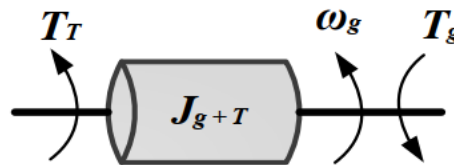
pode ser desprezada.

Existem algumas desvantagens como, elevadas cargas nos componentes mecânicos da turbina, principalmente no torque de acionamento, que provoca fadiga nos componentes mecânicos diminuindo o tempo de vida útil da turbina. Qualquer variação da velocidade do vento será convertida em variação de potência da saída.

No sistema eólico convencional o rotor contribui mais para a inércia rotacional, onde a mesma é dividida entre o trem de acionamento e rotor, porém se torna interessante investigar se o mesmo ocorre no sistema de microgeração, pois não se tem trem de acionamento no mesmo (JASSMANN *et al.*, 2014).

Quando uma turbina eólica é de pequeno porte, isto é, atua em uma faixa de potência de até 10 KW, estando sujeita a diversas condições de velocidade de vento e não havendo conexão direta do gerador com a rede elétrica, a dinâmica do eixo pode ser desprezada. Pode-se utilizar um modelo de apenas uma massa com inércia equivalente obtendo uma relação entre a rotação do rotor e gerador $wrg = wr = wg$. Assim temos o modelo simplificado da figura 16, onde o mesmo possui caixa multiplicadora e faz teste com altas rotações e altas velocidades de vento (MARTINELLO, 2015).

Figura 16 – Modelo mecânico simplificado de um aerogerador



Fonte: Martinello (2015).

A região de Maracanaú selecionada para a instalação do microgerador, possui ventos no valor médio de 5 m/s, porém esse valor foi analisado em altitudes de 20, 50 e 78 m conforme Carvalho (2015). O local que o gerador eólico será testado possui baixas velocidades de vento variando entre 1 à 8 m/s, o que se torna interessante para analisar se o valor de vento da região é suficiente para vencer a inércia do aerogerador e a partir de quais valores isso se torna possível.

A partir da segunda lei de Newton, pode-se introduzir o conceito físico chamado massa inercial, que consiste na resistência de um corpo a mudança de movimento, quantificada pela massa do corpo rígido. A propriedade dos objetos de resistirem à alteração no seu movimento é chamada de inércia. Por outro lado, a propriedade de um objeto de resistir a alterações em seu estado de movimento de rotação é chamada de inércia rotacional, também conhecida por momento de inércia. Sabendo a dimensão e a forma do corpo a ser analisado, a aplicação de forças externas pode fazer o corpo apresentar

movimento translacional e rotacional. O movimento translacional do corpo é governado pela segunda lei de Newton e o rotacional pela seguinte Equação 2.1 ([HIBBELER, 2005](#)).

$$T = I.\alpha \quad (2.1)$$

Onde, I é denominado momento de inércia de massa e α a aceleração angular do corpo. No entanto, o objetivo é de relacionar a descrição dinâmica do gerador, levando em conta o seu torque (T) e a sua velocidade angular (w) conforme a Equação 2.2 para calcular a potência (P). Esta metodologia é o foco de um estudo mais detalhado envolvendo algumas propriedades mecânicas do gerador, como também a influência de diferentes tipos de materiais utilizados na construção do mesmo.

$$P = T.w \quad (2.2)$$

2.7 Estudo da Arte

No trabalho de [Veiga \(2011\)](#) para o dimensionamento e construção do gerador eólico de fluxo radial utilizou - se o aço como principal elemento de construção da estrutura dele. A escolha do material teve um peso importante para as perdas e resistência térmicas. Foi necessário utilizar materiais elétricos com baixas perdas no aço. O ímã utilizado na construção do protótipo foi de NdFeB - 40SH e o material do estator também foi aço conforme Figura 17.

Outras informações relevantes para o trabalho foi a utilização do EFCAD para fazer cálculos eletromagnéticos em elementos finitos bidimensionais. Todos os cálculos são feitos visando a construção de um protótipo de 3kW/220 V, procurou-se alinhar ou pelo menos buscou - se a melhor aproximação entre as possíveis medições físicas e o resultado analítico das simulações, com o intuito de reunir as equações que modelam o comportamento eletromagnético ([VEIGA, 2011](#)).

Alguns valores importantes para o dimensionamento do projeto são informados como, velocidade de rotação angular do rotor é 250 rpm, tensão nominal de saída de 220 V, número de pares de polo é 10, número de fases do gerador que é 3 e 46 espiras por bobina. São realizadas avaliações de perdas no aço, os maiores valores de massa calculados são massa de aço no rotor e massa de aço no estator. Após a realização dos cálculos e simulações foi concluído que a abordagem escolhida mostrou resultados satisfatórios para o projeto do gerador e que seria interessante acompanhar uma futura construção do protótipo para validar os cálculos feitos ([VEIGA, 2011](#)).

Para [Ramos \(2015\)](#) ele desenvolveu um gerador eólico de pequeno porte utilizando ímãs de Neodímio ferro boro, um estator com uma composição de ferro e fósforo (Fe2%P)

Figura 17 – Máquina completa, detalhe de ímãs, ranhuras e dentes



Fonte: [Veiga \(2011\)](#).

sinterizado a partir do processo da metalurgia do pó. A configuração do gerador é de fluxo axial com núcleo tipo Torus, onde se faz a substituição do núcleo comercial laminado pelo novo fabricado conforme Figura 18, para que se possa realizar uma comparação do desempenho das máquinas.

Foram realizados ensaios de rendimento do gerador em bancada de ambos os núcleos, o estator obtido pelo processo de metalurgia do pó obteve rendimentos elétricos equivalente ao da máquina que utiliza núcleo comercial. Durante o teste em vazio o gerador com o núcleo Fe20P apresentou uma potência mecânica de acionamento superior a máquina de núcleo comercial ([RAMOS, 2015](#)).

Para as bobinas foram utilizados dois tipos de fios o AWG 23 para as bobinas primários e o AWG 26 para as bobinas secundárias, sendo 160 espiras no primário e 270 espiras no secundário. É um gerador com potência de até 1 KW, onde possui um estator e duas partes do rotor onde em cada parte se tem 14 ímãs de categoria N32 de NeFeB, totalizando 28. Tem uma tensão de operação de 24 V trifásico, possui 21 enrolamentos e cada fase possui 7 enrolamentos conectados em série elevando a tensão induzida em cada fase. A máquina foi testada em vazio variando a rotação de 82 a 526 rpm ([RAMOS, 2015](#)).

[Pereira et al. \(2016\)](#), apresenta um procedimento de projeto de um gerador eólico de pequeno porte para pequenas turbinas de fluxo axial conforme Figura 19, onde utilizou-se na sua construção ímãs de Neodímio - Ferro - Boro, topologia de duplo rotor que é construído de aço ABNT 1020, as 6 bobinas de pequeno diâmetro são construídas de fio de cobre com 210 voltas e ficam fixadas no estator onde se conectam duas a duas para se ter três fases na tensão gerada, o material do estator não foi mencionado pelo autor.

Figura 18 – Peças do rotor do gerador Enersud



Fonte: [Ramos \(2015\)](#).

Com o objetivo de satisfazer as condições de simplicidade mecânica, de fácil construção e manutenção de baixo custo e operar sobre condições de baixa velocidades de vento. O gerador consiste na potência de 100 W, voltagem de saída 12 V, velocidade de 300 rpm, um total de 16 ímãs de NeFeB, sendo 8 fixo em cada rotor ([PEREIRA et al., 2016](#)).

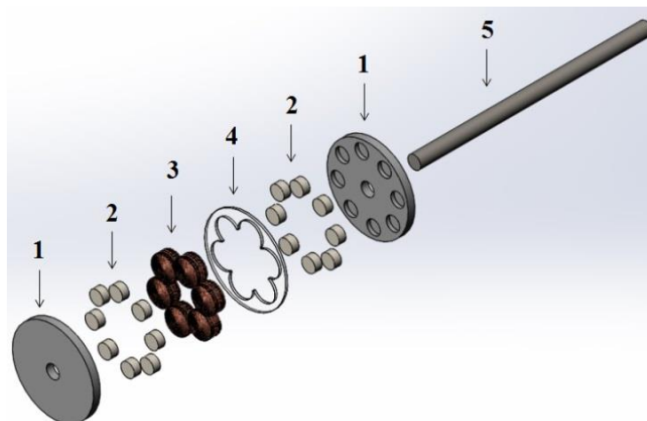
Foi descrito o projeto, o procedimento de cálculo e o desempenho de um gerador axial de ímãs permanentes para uso com turbinas eólicas de pequeno porte, podendo ser usado em pequenas turbinas hidráulicas. É de fácil construção, e os materiais empregados na sua construção são facilmente encontrados no comércio especializado. Atendendo aos parâmetros de cálculos e dimensionamentos adotados, obtém-se eficiência superior a 80 %, particularmente boa para esse tipo de gerador ([PEREIRA et al., 2016](#)).

O autor [Maia \(2011\)](#), realizou o dimensionamento e desenvolvimento de um gerador eólico de pequeno porte de fluxo axial tipo Torus que possui eixo horizontal. Os materiais utilizados na construção do gerador eólico foi Aço ABNT 1020 para o rotor externo e interno e eixo de sustentação, para o núcleo do estator foi utilizado o aço - silício E110 e o alumínio é usado para a sustentação do mesmo, bobinas de cobre e ímãs de Neodímio - Ferro - Boro, conforme a Figura 20.

O dimensionamento é trabalhado através de equacionamentos analíticos e validado com o auxílio de *softwares* de cálculo de elementos finitos. Esse procedimento garantiu algumas vantagens como o ganho com o tempo de processamento, seja com variação de parâmetros elétricos, dimensionais ou de materiais, ou através de um processamento de otimização de projeto que permitiu um considerável aumento de eficiência, e uma redução de custo ([MAIA, 2011](#)).

O desenvolvimento do gerador Torus se mostrou desafiador em vários aspectos,

Figura 19 – Topologia do gerador



Legenda: 1) disco rotor; 2) ímãs;
3) armadura das bobinas;
4) disco estator; 5) eixo gerador

Fonte: [Pereira et al. \(2016\)](#).

principalmente na montagem dos 16 ímãs N45H e no acoplamento entre rotor e estator. A máquina foi testada com as rotações de 20 a 240 rpm, e a sua potência é de 10 KW e tensão nominal de 180 V, foram utilizadas 48 bobinas do fio AWG 15 com 40 voltas ligadas em arranjo trifásico. Além dos materiais mencionados também foi usado alumínio 6151 na construção da coroa, a máquina teve um custo de construção e confecção de R\$: 19.258,37 ([MAIA, 2011](#)).

Figura 20 – Estator bobinado



Fonte: [Maia \(2011\)](#).

Segundo [Linard \(2014\)](#), que desenvolveu um projeto de gerador eólico com ímãs permanentes e fluxo axial e núcleo toroidal conforme Figura 21. Utilizou o aço SAE 1010 para a construção do rotor e estator, usou os ímãs de Neodímio- Ferro- Boro N45H devido as suas boas propriedades magnéticas e bobinas construídas com fio de cobre. A máquina foi composta por três rotores, onde os ímãs foram fixados, e entre os rotores, foram posicionados os dois estatores, onde ficam as bobinas.

O gerador tem como objetivo a potência de 50KW e um rendimento de 0,92, o projeto utiliza a topologia Torus sem ranhura, pois ela não irá gerar variação de fluxo, e as perdas magnéticas no rotor e no ímã são desprezíveis. Observou-se que a máquina ficaria com diâmetro desproporcional para este nível de potência, então para uma diminuição do diâmetro do gerador, resolveu-se utilizar uma máquina com dois estágios (LINARD, 2014).

Para acionar o rotor foi usado uma rotação de 285 rpm, valor no qual representa o vento do litoral cearense que chega até 9 m/s para alturas de 60 metros, onde essa altura não corresponde a micro e mini geração. O número de pares de polos usados para os ímãs são 10, a máquina é trifásica e o valor de tensão é 380 V, o valor do diâmetro externo do rotor foi de 602 mm e a espessura do ímã de 11 mm. Na modelagem da máquina que usou o *software* COMSOL *Multiphysics*, foi usado cobre para as 12 bobinas, porém não foi especificado o número de espiras (LINARD, 2014).

A simulação foi realizada testando dois arranjos distintos para os ímãs a NN e a NS, foi observado que a densidade de fluxo magnético tem um valor máximo maior quando a distribuição dos ímãs é do tipo NN, isso apenas para uma seção. Para gerar a máquina completa foi realizada uma rotação sobre o eixo z do setor simulado e foi observado que tanto para o rotor como para o estator a densidade de fluxo magnético para o arranjo do tipo NN, também mostrou um aumento quando comparado a distribuição do tipo NS (LINARD, 2014).

Figura 21 – Esquema do gerador proposto



Fonte: Linard (2014).

No trabalho de Ahmad e Amin (2017), ele constrói, projeta e estuda uma pequena turbina de eixo vertical e de fluxo axial, utilizando ímãs permanentes para a construção do gerador. Para as duas placas dos rotores ele utiliza material ferromagnético, os ímãs são de Neodímio - Ferro - Boro N42, o estator é feito de um material não condutor e não magnético, as bobinas são construídas de fio de cobre e usam núcleo de ar conforme a Figura 22.

No projeto o método de levitação magnética é usado para aumentar a eficiência deste tipo de turbina, a levitação magnética é inserida usando ímãs de terras raras de NeFeB, a força de repulsão dos ímãs é usada para suspender a parte rotativa da turbina e

o gerador. Devido a seu *design* simples que é facilmente utilizado sem um mecanismos de engrenagem, isso diminui o custo e a complexidade do sistema, reduzindo a quantidade de sistemas de acionamento (AHMAD; AMIN, 2017).

A saída do gerador é trifásica e é convertida em corrente contínua através de um retificador trifásico para carregar baterias de 12 V. O gerador funcionou de maneira ideal conforme projetado, ele utilizou 24 ímãs de NdFeB, 9 bobinas de cobre com 600 espiras cada e o diâmetro externo do rotor é de 254 mm. Os testes foram realizados usando uma velocidade de vento de até 3m/s um pouco mais de 200 rpm e gerou uma potência de 12 mW, os ímãs foram montados no arranjo N-S-N-S. Devido a levitação magnética a eficiência da turbina aumenta em 23 % (AHMAD; AMIN, 2017).

Figura 22 – Gerador confeccionado



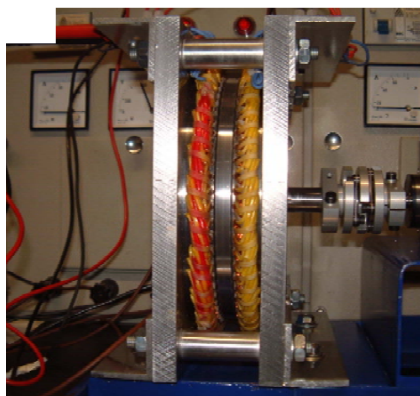
Fonte: Ahmad e Amin (2017).

O trabalho realizado por Ferreira (2011), desenvolveu e projetou um gerador eólico de pequeno porte com ímãs permanentes de fluxo axial, constituídos por dois rotores de material ferromagnético, o estator foi construído reutilizando aço de auto transformador, o núcleo toroidal é de silício, os ímãs são de Neodímio - Ferro - Boro e as bobinas de cobre como mostra a Figura 23.

Foram desenvolvidas e incorporadas rotinas de interações eletromagnéticas e térmicas baseado em ferramentas analíticas e de simulações. Foi investigada a distribuição da indução magnética no espaço da máquina assim como a forma de onda da indução magnética em vazio e a caracterização do seu conteúdo harmônico, salientando-se naqueles os harmônicos de ranhuras. A validação do efeito menor da reação do induzido neste tipo de máquinas elétrica, devido ao elevado entreferro equivalente que a caracteriza (FERREIRA, 2011).

Foi construído um protótipo para micro e mini geração, onde seu funcionamento foi validado através de testes em laboratório. O gerador tem potência de 387 W, utilizou 20 ímãs de NdFeB, com 60 bobinas de 24 espiras cada, o diâmetro externo do estator de 180 mm, os testes foram feitos entre 300 e 600 rpm. Os parâmetros elétricos e térmicos do projeto foram validados, porém foi constatado a necessidade de se construir um novo rotor que cumpra as especificações do projeto (FERREIRA, 2011).

Figura 23 – Vista do gerador montado



Fonte: [Ferreira \(2011\)](#).

A análise de projeto feita por [Borba \(2016\)](#) da Figura 24, assim como a construção, análise do funcionamento de uma máquina elétrica síncrona trifásica com núcleo do rotor produzido a partir da metalurgia do pó e ímãs de neodímio - ferro - boro. Foram realizadas mudanças construtivas no núcleo do estator e rotor, o pacote de chapas do estator foi montado de forma angulada e o rotor foi construído através da metalurgia do pó, utilizando o ferro puro, o eixo da máquina é de aço SAE 1045.

A máquina consiste em 4 polos de ímãs, tensão de 220 V, potência de 7,5 KW, rotação nominal de 1760 rpm. O núcleo do estator é composto por chapas de aço de baixo teor de carbono tratadas termicamente ou por chapas de aço silício, estes materiais propiciam baixas perdas e elevada permeabilidade magnética. O pacote de chapas é montado na carcaça de maneira que as ranhuras não apresentem inclinação entre elas ao longo do comprimento do núcleo, o rotor da máquina é do tipo gaiola de esquilo ([BORBA, 2016](#)).

A matéria-prima usada para substituir o rotor é o pó de ferro puro, a principal característica desse pó é a alta compressibilidade permitindo a obtenção de compactados com boa densidade. O estator usado foi montado com alterações na sua forma construtiva, ele foi reprojetoado para que apresente um melhor desempenho quando utilizado em conjunto com o rotor de ímãs permanentes. O novo rotor substituiu o antigo núcleo de chapas laminadas de aço por um novo núcleo produzido pela metalurgia do pó e foi realizada a substituição da gaiola por ímãs permanentes ([BORBA, 2016](#)).

Foi utilizado cinco núcleos compactados, quatro ímãs com polaridade norte na face superior, quatro ímãs com polaridade sul na face superior, um eixo e dois rolamentos. Os testes foram realizados em bancada nas rotações de 300, 400, 450 e 540 rpm, não foi percebido a presença de harmônicos nas formas de onda de tensão, o que para um sistema gerador significa que as perdas na transmissão e distribuição serão reduzidas. A cola a base de poliuretano não se mostrou eficiente e o ímã descolou durante os testes, onde o mesmo

teve que ser suspenso não sendo possível medir os valores de rendimento da máquina. Em alguns pontos o revestimento do ímã se soltou e ocasionou oxidação do mesmo (BORBA, 2016).

Figura 24 – Vista frontal da montagem do rotor e estator



Fonte: Borba (2016).

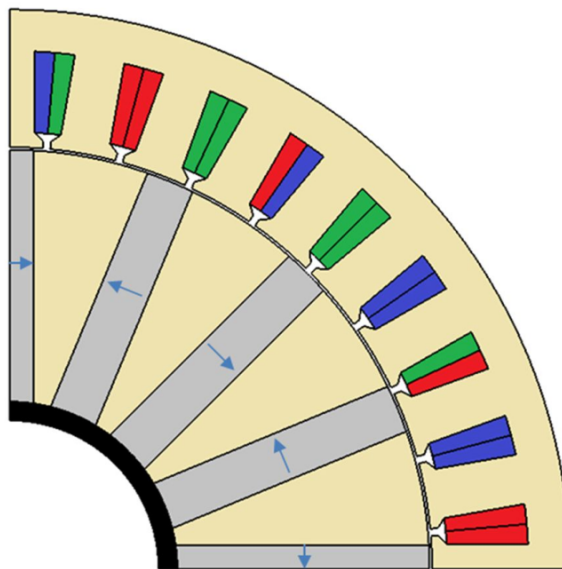
Kolzer (2017), desenvolveu um modelo de dimensionamento orientado a otimização de microgerador síncrono com ímãs permanentes de ferrite de desempenho equivalente a uma máquina de ímãs permanentes de neodímio - ferro - boro conforme a Figura 25. Foi utilizado um programa EFCAD para verificar o diagrama de distribuição de perdas no aço a plena carga, onde o modelo G3 de 24 polos mostrou melhor resultado. Essa análise comparativa mostrou uma redução significativa no custo de material ativo, em densidade de potência equivalente e desempenho similar a máquina de NdFeB.

Algumas restrições foram colocadas a primeira por motivo de rigidez mecânica e a segunda está relacionada a dificuldade de se obter elevados fatores de preenchimento para ranhuras de largura reduzida. Foram construídas cinco topologias de geradores síncronos com ímãs permanentes de ferrite, três de rotor interno e duas de rotor externo. Das cinco máquinas modeladas, a primeira é um máquina com ímãs de superfície e as outras quatro de rotor com concentração de fluxo, cada topologia montada possui 16 polos e foi simulada no EFCAD (KOLZER, 2017).

Constatou-se que a utilização de ferrite no projeto de geradores síncronos de elevado desempenho é viável apenas com topologias que permitam concentração de fluxo magnético no entreferro. Verificou-se que utilizando essas topologias com concentração de fluxo, é possível projetar máquinas com ímãs de ferrite de elevado desempenho com custo de material ativo significativamente menor que na máquina de NdFeB, mas apresentando menor densidade de potência. Dentre as máquina com ímãs de ferrite convencionais, o G3

apresentou o menor custo de material ativo e a maior densidade de potência (KOLZER, 2017).

Figura 25 – Modelo do gerador G3 de 24 polos



Fonte: Kolzer (2017).

O projeto de Almeida (2010), consiste em construir e avaliar uma máquina com grande número de polos, de enrolamentos de fios de cobre concentrados, com ímãs permanentes de NdFeB, inseridos no interior do rotor que é de material SAE 1006 recozido e o eixo em aço SAE 1045, onde se compara com o rotor gaiola de esquilo construído em aço silício conforme a Figura 26.

O projeto usou um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo de 250 W de 12 polos, a 560 rpm. Partindo dos próprios dados construtivos do estator, calculou-se a densidade de fluxo magnético, especificando os ímãs de neodímio. Foi construído um novo rotor, a máquina foi avaliada em laboratório para verificar a quantidade e qualidade da energia com a máquina atuando como gerador (ALMEIDA, 2010).

Os resultados encontrados na avaliação da máquina funcionando como gerador com ímãs alinhados revelaram distorção harmônica total de 16 %, capacidade de geração de 475 W a 221 V - 60Hz e com aspecto desfavorável de alto torque de travamento. Os ímãs inclinados modularmente são uma opção de máquina elétrica com satisfatório desempenho de máquina como gerador de energia com razoável qualidade no contexto de geração distribuída de pequena potência, tem-se o baixo custo e manutenção reduzida no gerador de ímãs inclinados em relação ao gerador síncrono convencional (ALMEIDA, 2010).

O principal aspecto desfavorável na configuração com ímãs inclinados foi a baixa capacidade de geração em relação a outra configuração, confirmando-se a teoria, na qual o projeto revelava possivelmente uma capacidade de tensão gerada em torno de 200 V,

em virtude da aplicação dos ímãs N35 de remanência inferior ao especificado. Os aspectos favoráveis para a configuração dos ímãs alinhados não foram encontrados, esta configuração tem um alto valor de torque de travamento na partida, o que restringe a sua aplicação em micro centrais elétricas ([ALMEIDA, 2010](#)).

Figura 26 – Rotor construído com os ímãs montados



Fonte: [Almeida \(2010\)](#).

Dentre todos os trabalhos citados, foi construída uma tabela resumo que se encontra no capítulo 4 de resultados, na página 66, mostrando os materiais usados em cada um e algumas principais características da sua construção, para que se possa de forma mais clara observar todos esses aspectos e compara-los da melhor forma.

2.8 Contribuições da pesquisa

É possível perceber o setor de estudo no qual a referida pesquisa está inserida.

Fazer um resumo através de um levantamento bibliográfico dos principais aerogeradores de micro e minigeração de energia eólica foram realizados no país, principalmente no estado do Ceará, devido a necessidade de mostrar a viabilidade, confiabilidade e que a mesma é uma solução de energia acessível, para as regiões urbanas conforme sinalizado por ([KUMARA *et al.*, 2018](#)).

A configuração do gerador de um único rotor e um estator torna o mesmo inédito para a região, conforme percebe-se o arranjo de rotor e estator nos trabalhos de: [Azevedo \(2012\)](#), [Maia \(2011\)](#), [Wang *et al.* \(2015\)](#), [Pereira *et al.* \(2016\)](#), [Loureiro \(2008\)](#) e [Ramos \(2015\)](#), são diferentes do proposto neste projeto.

Uma otimização de projeto do gerador de ímãs permanentes com fluxo axial foi realizada onde se substituiu a estrutura metálica do rotor por *nylon* para diminuir o peso da estrutura da máquina e se utilizar o mínimo de aço possível na mesma, também deixando esse arranjo inédito na região conforme os trabalhos: [Azevedo \(2012\)](#), [Maia](#)

(2011), Wang *et al.* (2015), Pereira *et al.* (2016), Loureiro (2008) Ramos (2015) e Veiga (2011).

Trabalhar com baixas rotações mostra ser outro desafio inédito para a região, pois os trabalhos a seguir Azevedo (2012), Maia (2011), Wang *et al.* (2015), Pereira *et al.* (2016), Loureiro (2008) e Ramos (2015) mostram seus resultados para elevadas rotações, onde o parâmetro principal para trabalhar com baixas rotações foi a velocidade de vento real no qual a região possui.

3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais

Tão variada quanto a construção e funcionamento dos aerogeradores de pequeno porte é também a utilização de materiais. Foi realizada uma seleção com os principais trabalhos publicados na área para que se possa comparar os principais materiais utilizados nos componentes. Com isso, será possível fazer um comparativo sensato entre funcionalidade, peso, rendimento de potência, preço e vida útil.

Para produzir com sucesso em determinadas regiões do Brasil, um aerogerador de pequeno porte não deve somente ter uma tecnologia atualizada, mas também é necessário corresponder aos pré-requisitos climáticos da região e deve ser adaptado as condições sócio - econômicas do local onde será utilizado.

Com as respectivas análises dos principais materiais usados na construção de geradores foi desenvolvido um projeto de um gerador eólico de pequeno porte de fluxo magnético axial, com o rotor construído de *nylon*, núcleo toroidal, onde a máquina projetada utiliza a topologia Torus sem ranhuras descrita no capítulo 2. A justificativa da escolha é devido a máquina sem ranhuras não gerar variação de fluxo, e as perdas magnéticas no rotor e no ímã serem desprezíveis.

3.1.1 Tecnologia de Materiais

O material para pás de rotor deve apresentar boas propriedades de fadiga, uma alta resistência contra a abrasão e a radiação UV. Um problema especial para aerogeradores de pequeno porte consiste no fato que a construção e o material devem resistir a pressão do vento também em situações de vento extremo.

Os rolamentos do rotor devem ser dimensionados suficientemente em relação a sua resistência contra a abrasão para garantir uma longa vida útil devido as velocidades de vento na região nordeste. Já para baixas velocidades de vento é importante que os rolamentos tenham baixa fricção, para favorecer a quebra de inércia da máquina.

No gerador eólico é necessária uma estrutura compacta e otimizada em relação a rigidez, resistência, dissipação de calor, peso, processo de produção, onde o ideal seria que o material utilizado tenha uma proteção contra a corrosão. Devido a diferentes tipos de cargas podem ocorrer a deformação e alguma avaria de funcionamento de componentes de pequeno porte, abaixo na Tabela 2, temos a classificação de algumas cargas que atuam sobre o aerogerador de pequeno porte (LUTZ, 2006).

Tabela 2 – Cargas sobre um aerogerador de pequeno porte

Térmicas
Temperatura alta
Temperatura baixa
Mudança de temperatura
Perda de resistência
Fissuras
Químicas
Radiação Ultra Violeta
Umidade do ar
Chuva ácida
Corrosão
Oxidação
Mecânica
Tração
Pressão
Fricção
Flexão
Mudança de cargas
Deformação
Desgaste
Fissuras

Fonte: Adaptado Autor

3.1.2 Configuração Construtiva

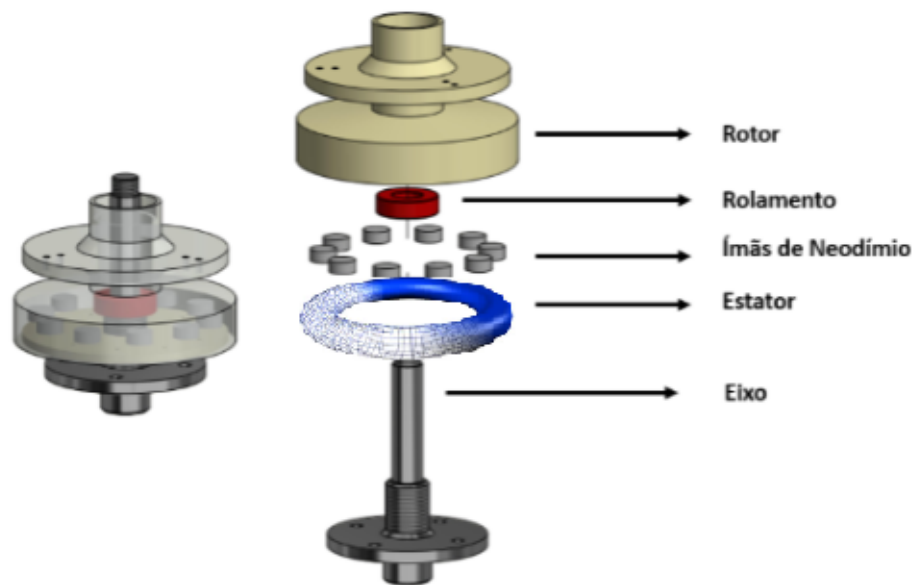
É necessário adaptar a configuração de construção de um aerogerador de pequeno porte, ele deve ser adaptado as condições locais. As pás do rotor devem possuir configuração específica para o sistema através de cálculos de corrente de ar, otimização experimental do ângulo da pá e torção do ângulo da pá em direção ao cubo. O gerador deve ter alto grau de eficiência, modelos mono e trifásicos, boa dissipação de calor, diferentes classe de potência, deve ter isolamento e possuir blindagem.

O mastro deve possuir estrutura simples, possibilidade de montagem e desmontagem simples e baixa rigidez de flexão das pás do rotor. Os parafusos devem estar em menor quantidade possível, longa vida útil e segurança operacional, componentes fundidos e devem ser grandes. Todos os componentes do gerador devem ser blindados como proteção contra situações climáticas extremas e a temperatura da operação de funcionamento dele deve ser até 45 °C.

3.1.3 Protótipo do gerador eólico

Pelas análises dos principais materiais usados na construção de geradores eólico de pequeno porte, foi criado um projeto com o intuito de diminuir o seu momento de inércia rotacional utilizando um material mais leve. Visando um melhor custo benefício para o trabalho ele foi confeccionado utilizando o material de *nylon* para diminuir seu peso e diminuir as perdas magnéticas. O gerador eólico de pequeno porte para eixo vertical apresentado neste trabalho possui os seguintes componentes: rotor, estator, eixo central e rolamentos de fixação, conforme a Figura 27.

Figura 27 – Gerador eólico de eixo vertical para microgeração



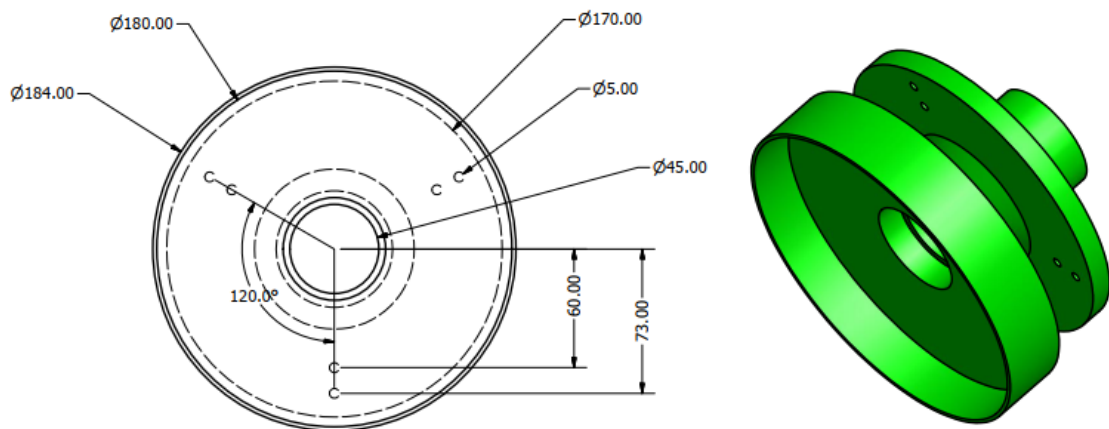
Fonte: Autor.

3.1.3.1 Rotor eólico

Componente que converte a energia cinética do vento em energia mecânica, e posteriormente transformada em energia elétrica. O rotor é constituído por pás verticais que se movimentam com a ação do vento. Com o intuito de facilitar a movimentação inicial do rotor, quebrando sua inércia, o material utilizado foi o *nylon*, deixando a estrutura com um menor peso, abaixo o desenho técnico com as dimensões necessárias para a construção do rotor para regiões de baixa velocidades de vento conforme demonstrado na Figura 28.

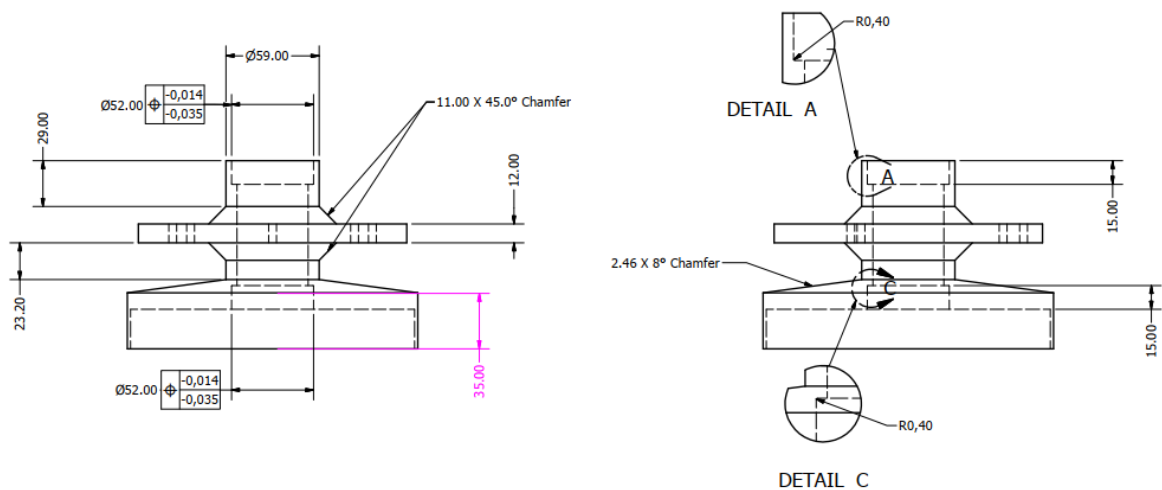
A estrutura do rotor, foi usinada conforme as dimensões propostas pelo complemento do desenho técnico na Figura 29. O mesmo é montado sobre o eixo central e funciona com a ajuda de rolamentos, os ímãs são montados na parte interna do rotor, separados a uma distância de 36° entre eles e as pás do aerogerador também ficam fixas na parte superior da sua estrutura.

Figura 28 – Rotor eólico vertical para microgeração



Fonte: Autor.

Figura 29 – Desenho técnico do rotor eólico vertical



Fonte: Autor.

3.1.3.2 Estator

O estator fabricado é onde as bobinas de cobre são enroladas, ao redor da estrutura em forma toroidal em todo o seu corpo. O material usado para o corpo do estator, foram lâminas de silício enroladas em forma espiral, devido ao estator ficar estático e a boa condução das propriedades magnéticas que o silício tem para a construção desse tipo de máquinas, ilustrado na Figura 30.

A distância de montagem entre o estator e os ímãs é pequena, conseqüentemente algumas dimensões são limitadas como a espessura do estator, a espessura da bobina, e também o raio da mesma, pois a bobina será enrolada no corpo do estator. Como não foi possível encontrar no mercado um estator com uma espessura de 6 mm, foi necessário

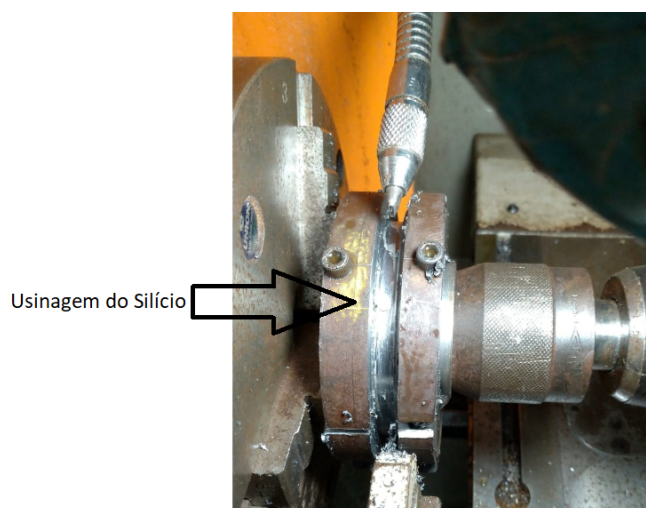
Figura 30 – Núcleo de silício



Fonte: Autor.

usinar no torno mecânico um estator de silício de 20 mm de espessura, deixando ele o mais próxima da dimensão desejada, para dar prosseguimento ao projeto, conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Núcleo de silício



Fonte: Autor.

O processo de confecção manual do estator de silício na usinagem, foi complexo, devido a fragilidade do material e conseguir conforma-lo nas dimensões ideais para o projeto foi um desafio. No entanto, após a sua construção, as bobinas foram enroladas de forma toroidal no corpo do mesmo, visando ter o melhor arranjo para se ter o melhor rendimento de energia possível em conjunto com os ímãs de neodímio.

O material ferromagnético utilizado para o núcleo de estator foi o aço - sílico de grão não orientado E110 da fabricante AcelorMital, com laminação de 0,37 mm e adequado

para a aplicação em micro geração eólica, devido as baixas perdas na geração de energia. A sustentação do estator ferromagnético, foi feita por fixação no eixo principal, para essa fixação foi utilizado um núcleo roscado de pvc e unindo a peça e o estator por uma massa branca.

3.1.3.3 Ímãs de Neodímio

Para o projeto, foi utilizado 10 ímãs de neodímio com formato circular, onde o mesmo fica instalado dentro do rebaixo que foi usinado no rotor, e foi fixado utilizando araldite. A montagem do ímã teve suas limitações, devido a grande força magnética que eles possuem, fazendo com que a atração entre eles fosse algo que dificultasse o processo de montagem. Porém a forma como eles estavam organizados, em pólos opostos N-S tornou possível a montagem, conforme a Figura 32.

Figura 32 – Ímãs de Neodímio Colados



Fonte: Autor.

Inicialmente os ímãs que foram selecionados para o projeto eram os ímãs de neodímio N35, porém foi verificado a existência de outro ímã com um campo magnético maior. A dimensão do rotor é reduzida e não poderia ser aumentada, devido ao pouco espaço a quantidade de ímãs ficou reduzida e limitada evidenciando a necessidade de usar um ímã com um campo magnético maior. Depois de alguns testes substituímos o N35 pelo ímã de neodímio N52, porém para uma melhor fixação dos ímãs foi necessário fazer uma usinagem com a máquina CNC, construindo rebaiços no rotor. O valor da profundidade do rebaixo usinado foi de 10 mm conforme a Figura 33.

Figura 33 – Ímãs de Neodímio no rebaixo usinado

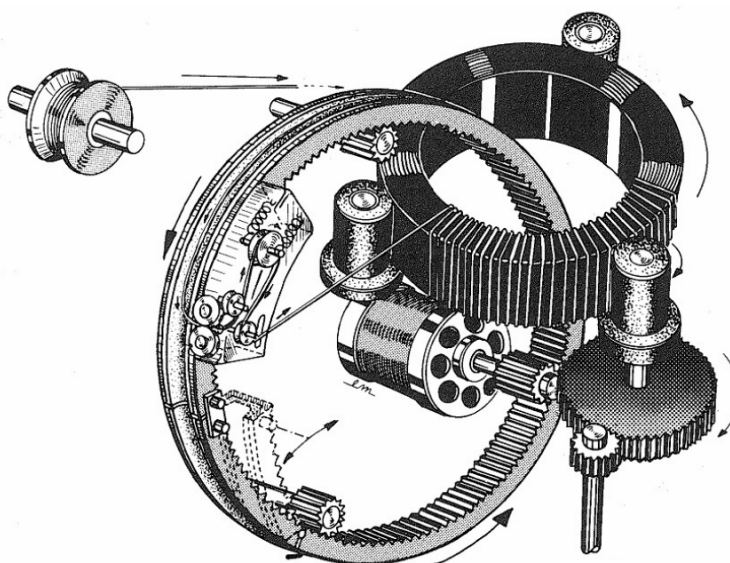


Fonte: Autor.

3.1.3.4 Construção das Bobinas

A fabricação das bobinas toroidais sobre o núcleo de silício, comparadas com as demais é mais complexa, sendo difícil a sua confecção manual, trazendo a necessidade de se utilizar uma máquina específica para esse tipo de construção semelhante a Figura 34. Na montagem é necessário que os fios de cobre estejam montados da forma mais compacta possível. Inicialmente considerou-se, um comprimento da cabeça da bobina de 10 mm devido ao espaço do rotor e o fio utilizado foi o AWG 18.

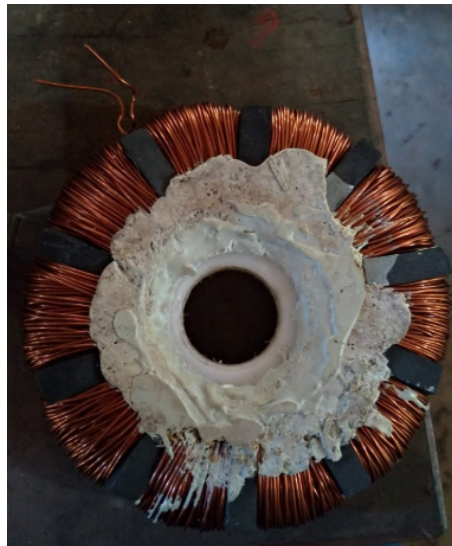
Figura 34 – Máquina para bobinar núcleos Toroidais



Fonte: Adaptado Autor.

O circuito de armadura possui 10 bobinas ligadas em série, onde cada uma possui 110 voltas e estão ligadas de forma oposta a cada 36° de distância uma das outras, tendo o valor do diâmetro do fio de 1,024 mm e capacidade de corrente até 2,5 A. A estrutura foi construída sobre as lâminas de silício e no centro foi colocado uma peça de pvc para ser encaixada no eixo do aerogerador conforme a Figura 35.

Figura 35 – Bobina Toroidal com núcleo Silício



Fonte: Autor.

Foi necessário confeccionar uma peça central para a bobina, onde ela foi construída com as mesmas medidas da rosca do eixo principal. Essa luva roscaada foi desenvolvida desta forma para poder regular sua posição no eixo, variando a distância da bobina em relação ao ímã. Onde o objetivo é com a mínima distância obter-se o melhor valor de campo magnético, o mesmo está posicionado no eixo conforme a Figura 36.

3.2 Métodos

3.2.1 Bancada de testes

A bancada de teste consiste em uma bancada desenvolvida com o objetivo de variar a rotação para simular as diferentes velocidades de vento da região, acompanhar os valores de tensão eficaz gerados pelo circuito de armadura e acompanhar qual a frequência em Hertz para os respectivos valores.

Foi utilizado um motor elétrico monofásico para acionar o gerador de modo a simular o comportamento do vento. A frequência elétrica de rotação utilizada nos testes foram limitadas entre 10 e 33 Hz no osciloscópio, para simular as diferentes velocidades de vento. Esses valores são verificados no osciloscópio, que fica conectado em paralelo em relação ao conjunto de bobinas, assim como também se analisa o valor da tensão eficaz.

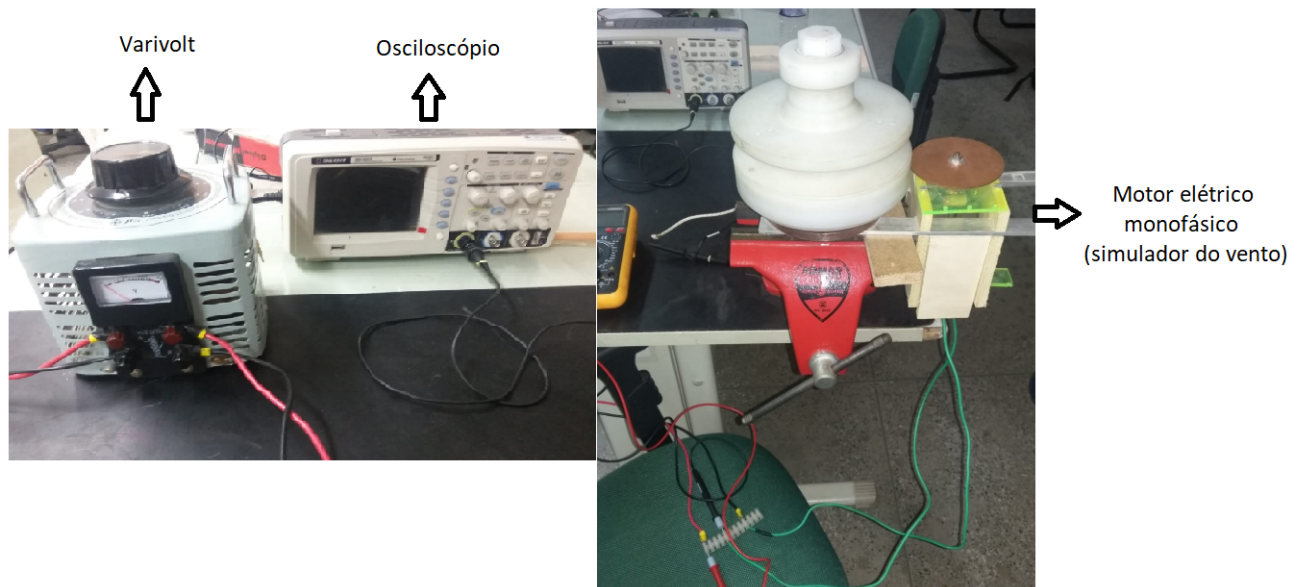
Figura 36 – Bobina Toroidal montada no eixo do gerador



Fonte: Autor.

Para se variar a velocidade de rotação do motor elétrico, foi instalado um regulador de tensão monofásico (varivolt), no qual torna possível alterar as rotações conforme a Figura 37.

Figura 37 – Bancada de testes



Fonte: Autor.

Para transformar o valor de frequência (f) em rotação por minuto (n), utilizou - se a Equação 3.1, que relaciona a frequência e a rotação com o número de polos (p).

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad (3.1)$$

Com isso, tem - se que, para cinco pares de polos que 10 Hz representa 120 rpm e 33 Hz representa 396 rpm. Estas rotações foram utilizadas nos testes, considerando as baixas velocidades de vento para regiões urbanas, conforme foi mencionado no capítulo 2.

3.2.2 Análise dos ímãs

Com o gerador montado e com o primeiro tipo de ímã N35 inserido, foi colocado sobre o estator uma bobina de cobre com 300 espiras de diâmetro de 0,3mm. Em seguida a bobina foi substituída por uma com 300 espiras, mas de diâmetro 0,45mm. Para o segundo ímã de N52 realizou - se o mesmo procedimento, onde as frequências para os dois ensaios foram as mesmas, assim como as bobinas utilizadas no teste anterior. Para os dois tipos de ensaios a quantidade de ímãs nos dois casos foi a mesma, sendo de 10 ímãs, ou seja, 5 pares de polos.

Foi constatado que a tensão eficaz induzida no circuito de armadura aumenta em função da maior densidade de fluxo magnético do ímã empregado no circuito de campo, neste caso o N52, mostrando a importância das propriedades magnéticas para a geração de energia. Devido ao aumento do diâmetro do fio a área da seção reta foi ampliada, com isso permitindo a passagem de um maior fluxo de corrente, uma redução da resistência elétrica e consequentemente um maior valor de tensão. Os ensaios realizados confirmaram a percepção de que o ímã de neodímio N52 contribui para a maior tensão induzida no circuito do estator, sendo verificado um ganho de tensão de até 2,5 vezes quando comparado com o ímã de neodímio N35.

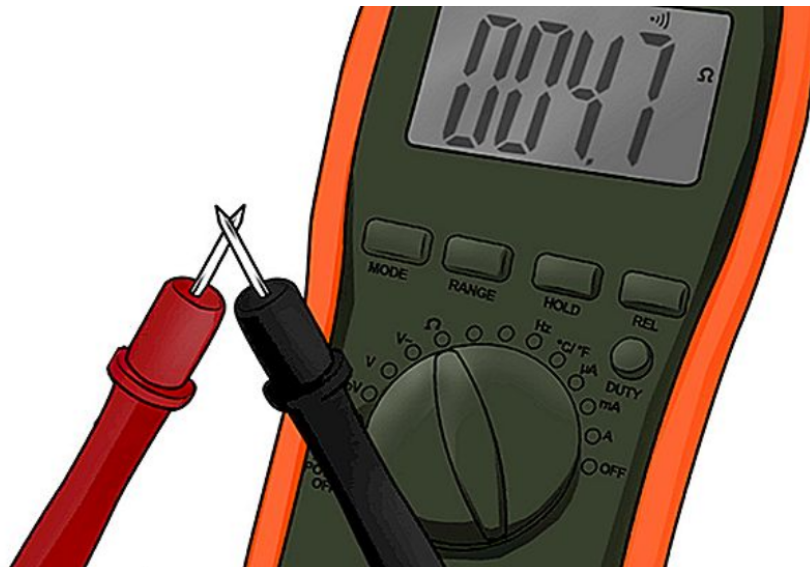
3.2.3 Análise das bobinas

Após a confecção das bobinas elas foram testadas antes de serem instaladas no eixo, utiliza-se o multímetro para verificar a sua continuidade no circuito de armadura e evitar possíveis perdas na geração de energia, conforme a Figura 38 utiliza-se as pontas de prova nos fios da bobina e verifica-se se existe a continuidade na bobina indicando que o circuito está fechado.

É importante analisar o circuito magnético construído pela geometria das bobinas e o valor do fluxo magnético que se pode obter com a respectiva área gerada, essa análise nos ajuda a comparar o valor de tensão gerada analiticamente com o valor obtido em laboratório, para que se possa verificar possíveis perdas no circuito, conforme a Equação 3.2, precisamos definir o valor de área da bobina para analisar o fluxo magnético (ϕ), usando os valores do campo de indução magnética (B), a área total (A) e o cosseno de θ .

$$\phi = B.A.\cos\theta \quad (3.2)$$

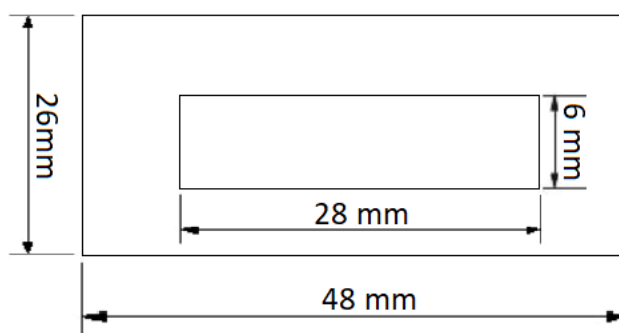
Figura 38 – Teste de continuidade nas bobinas



Fonte: Adaptado Autor.

Logo, ao aplicar um corte transversal na seção do estator temos que o desenho da área da bobina é representado por uma seção retangular, onde para se obter a área total foi necessário analisar a área externa e interna, logo ao subtrair as duas encontramos o valor da área total que será usada na Equação 3.2, conforme a ilustração da Figura 39.

Figura 39 – Secção da Bobina



Fonte: Autor.

Então temos que a Área total = $0,001080 \text{ m}^2$, como sabemos o valor do campo magnético para a distância de 2 mm, que é $B = 0,5 \text{ Wb/ m}^2$, substituindo na Equação 3.2, temos o valor de $\phi = 4,95 \times 10^{-3} \text{ Wb}$.

Sabendo que o valor de tempo Δt é: 0,05s e que o número de voltas da bobina N é: 110 voltas, vamos substituí-los na Equação 3.3, para encontrar o valor da força eletromotriz (ϵ).

$$\epsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.3)$$

Com a substituição dos valores, teremos que: $\epsilon = 19,31 \text{ V}$

Para analisar o valor de potência obtida no circuito de armadura, utilizou-se um resistor de carga (R_L), que foi de 470 ohms conforme a Figura 40, colocado na saída das bobinas que estão ligadas em série, com ele analisou-se o valor de potência de saída pela Equação 3.4, onde:

$$P = \frac{U^2}{R_L} \quad (3.4)$$

Figura 40 – Carga de teste



Fonte: Autor.

3.2.4 Potência eólica extraída

Com a definição de valores de velocidade do vento coletados no IFCE Maracanaú, altura da pá de 1,4 metros e diâmetro de rotação da pá até o centro do rotor de 1,142 metros, se calcula a potência do vento, posteriormente se calcula a potência extraída multiplicando a capacidade de potência de 0,35 pela potência do vento. Com as equações estabelecidas no *software* octave, foi realizado a plotagem do gráfico potência extraída x velocidade do vento. A utilização desse *software* foi de grande importância para análise dos parâmetros da máquina, dos parâmetros elétricos, assim como dos parâmetros dimensionais.

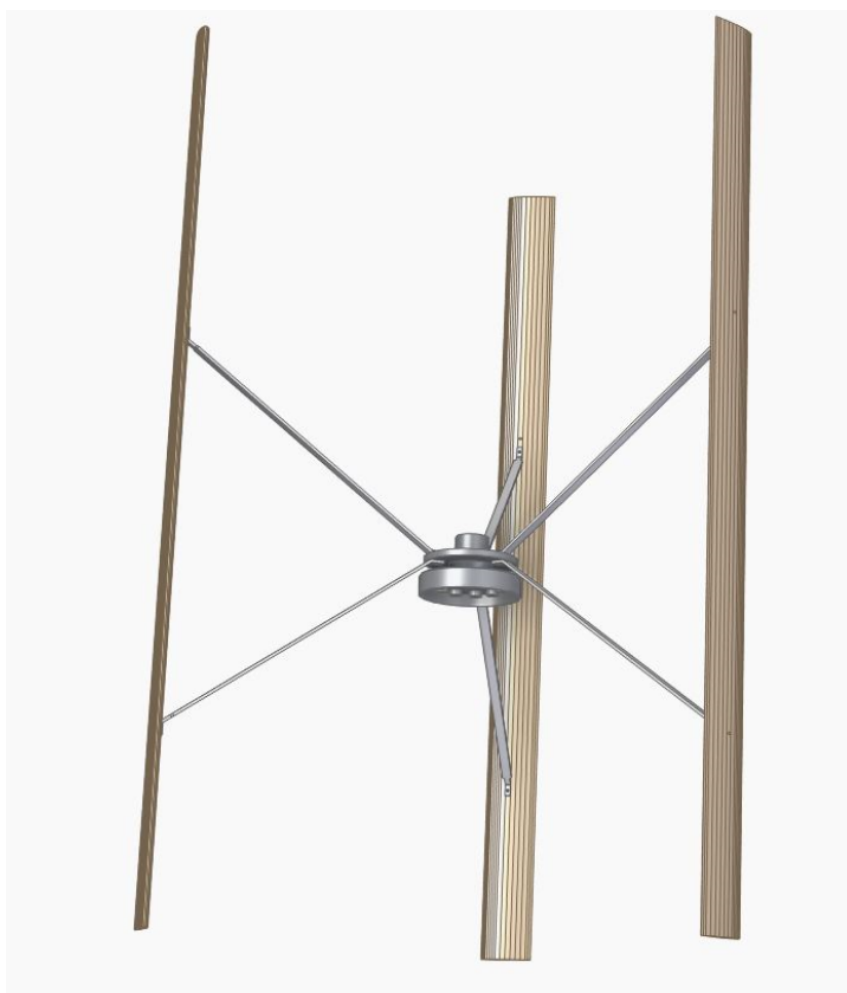
O gráfico fornece informações importantes, mostrando que conforme temos um aumento da velocidade do vento em metros por segundo, a potência extraída também vai

crescendo conforme a velocidade do vento no Maracanaú, assim como o horário em que os dados da torre eólica de microgeração serão analisados, tem total relevância.

3.2.5 Análise do Momento de Inércia

Como visto no Capítulo 2, pode-se calcular o torque no aerogerador, no entanto é necessário analisar o momento de inércia em função do material usado que é o *nylon* e compará-lo com os outros materiais usados pelos principais trabalhos aqui mencionados. Para essa análise utilizou-se um *software* de CAD para encontrar os valores do momento de inércia. A Figura 42 apresenta o aerogerador montado com o rotor de aço.

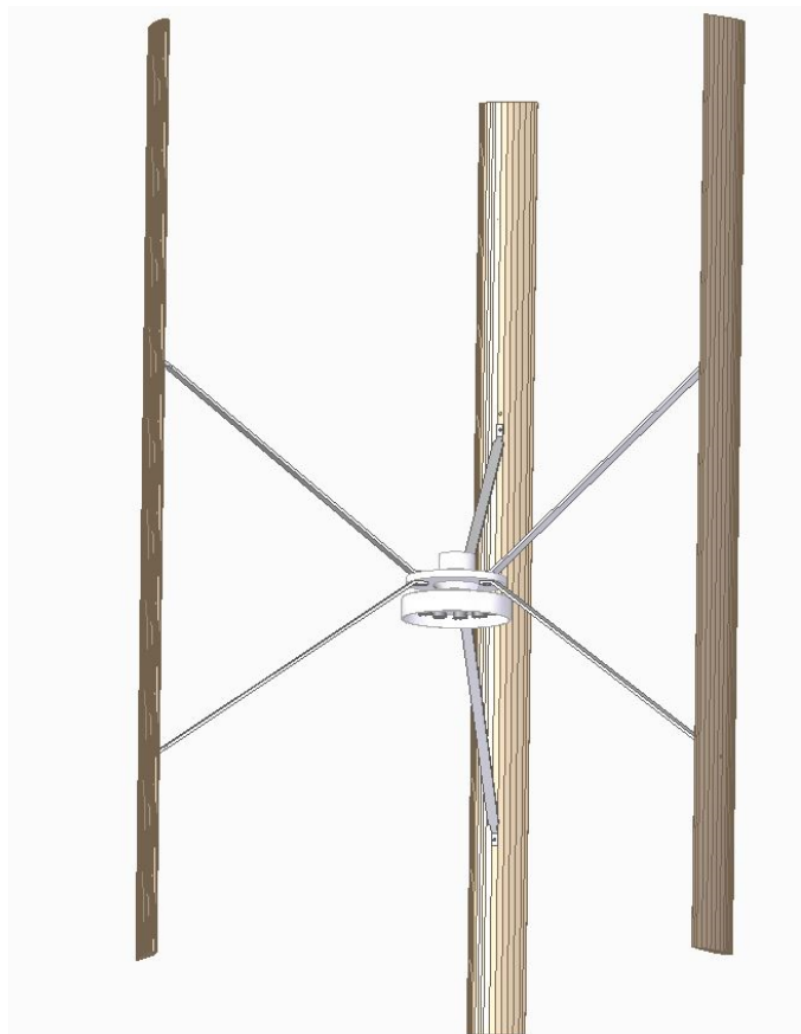
Figura 41 – Aerogerador montado com rotor de aço



Fonte: Autor.

Os mesmos componentes apresentados na Figura 42 foram mantidos, mas o material do rotor na nova montagem foi modificado para *nylon* conforme apresentado pela Figura 43. Através dessa simulação obteve-se os valores de momento de inércia do conjunto montado com rotor de aço e com rotor de *nylon*.

Figura 42 – Aerogerador montado com rotor de nylon



Fonte: Autor.

A Equação 2.2 é usada para calcular a potência do aerogerador, precisou-se usar valores de velocidade de vento coletados no IFCE de Maracanaú para encontrar as variáveis da equação. A coleta foi realizada usando um instrumento de medição específico para medições de velocidade de vento: o anemômetro, ele foi instalado no topo do Bloco 1, onde a altitude é de 10 metros. Utilizou-se um período de 6 dias de coletas ininterruptas, onde o intervalo de tempo entre uma coleta e outra foi de 10 minutos.

Foi selecionado o período de tempo onde apresentou-se uma maior variação de velocidade de vento entre aproximadamente 10 e 15 horas do segundo dia de coleta. Pode-se perceber a oscilação da velocidade do vento em função do tempo, esta oscilação foi usada para simular valores correspondentes de velocidade angular através de uma equação senoidal do tipo da Equação 3.5. Com isso obtendo-se, através da derivada temporal da velocidade angular, valores de aceleração angular oscilatórios com o tempo.

$$Rotação = A + B.seno(\beta.t) \quad (3.5)$$

Através dos valores de rotações coletados em bancada foi possível calcular valores da aceleração angular com a utilização da Equação 3.5 e com os valores dos momentos de inércia obtidos com as simulações em CAD, utilizou-se a Equação 2.1, para obter valores de torque e usando a Equação 2.2 com os valores de torque e também com os valores de velocidade angular calculados pela Equação 3.5, obteve-se assim valores de potência mecânica associados para os dois tipos de materiais comparados o *nylon* e o aço, onde foi plotado um gráfico da potência em função do tempo.

4 Resultados e Discussão

Exigências específicas aos aerogeradores de pequeno porte em relação a: tecnologia do sistema, à construção, ao uso de materiais, aos custos, à confiabilidade, e a facilidade de operar não podem ser completamente preenchidas pela tecnologia usada atualmente. Os geradores de pequeno porte no Brasil podem ainda ser melhorados em relação aos materiais usados e principalmente em aplicações de região com ventos de menor velocidade.

Os geradores eólicos de grande capacidade em *megawatt* são em sua grande maioria construídos usando metal, fibras ou mesmo madeira em sua composição, enquanto geradores de pequeno porte modernos, utilizam em sua construção alumínio, materiais compósitos e *nylon* como o que foi confeccionado neste projeto. É importante ressaltar que a madeira, por apresentar menor densidade que os materiais compósitos e por ser vulnerável a agentes externos como o clima, fungos, umidade e temperatura, ela precisa passar por tratamentos químicos para ser utilizada em determinados tipos de ambientes, o que aumenta o seu custo de fabricação e limita a sua utilização.

Os materiais metálicos em seu processo de fabricação são geralmente conformados compostos na forma de ligas metálicas, eles possuem grande tenacidade, boas propriedades mecânicas e também são de grande importância para trabalhar em conjunto com as propriedades magnéticas. Se tratando de aerogeradores de pequeno porte a sua utilização eleva o custo de fabricação e seu peso elevado limita um melhor desempenho do gerador para regiões de ventos fracos.

A utilização das fibras é realizada juntamente com materiais plásticos e tem características positivas como a leveza, boa resistência mecânica e resistência a agentes externos do clima como umidade e altas temperaturas, porém a sua confecção tem uma certa complexidade e eleva mais o custo de fabricação do produto. Ela também possui um processo de reciclagem difícil.

No caso do *nylon*, tem - se uma série de qualidades a seu favor, como facilidade de fabricação, elevada leveza, menor densidade dentre os materiais selecionados, boa resistência mecânica, amortecimento de vibrações, elevada resistência a agentes climáticos sendo eles umidade, baixo custo de fabricação e melhor desempenho para regiões onde os ventos são fracos, como por exemplo as regiões urbanas, se mostrando o melhor material selecionado para esse tipo de projeto.

Considerando todos os agentes levantados nas pesquisas realizadas para os principais aerogeradores de pequeno porte utilizados com foco principal na construção do gerador eólico, é apresentada a seguir a tabela resumo com o levantamento dos principais materiais usados e suas respectivas configurações construtivas conforme a Tabela 3.

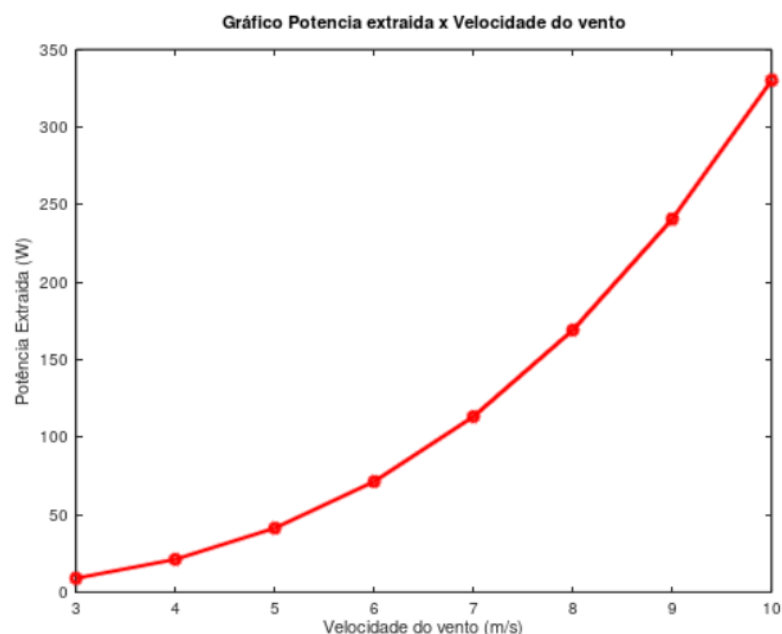
Tabela 3 – Resumo principais trabalhos

Autor	Período do projeto	Tipo de imã	Tipo de Construção	Material do Rotor	Material do Estator	Material da Bobina	Potência
Almeida, J.L.C.N	2010	NdFeB	Fluxo Axial	Aço SAE 1006	Aço SAE 1006	Cobre	250W/560 rpm
Ferreira, A.P.B.S	2011	NdFeB	Fluxo Axial - Tipo Torus	Aço	Reutilizou aço do auto - transformador Aço - silício	Cobre	387 W/ 600 rpm
Maia, T.A.C	2011	NdFeB - N45H	Fluxo Axial - Tipo Torus	Aço ABNT 1020	Aço - silício E110	Cobre	10KW
Veiga, T.N.A	2011	NdFeB - 40SH	Fluxo radial	Aço	Aço	Cobre	3KW/250 rpm
Linard, F.J.A	2014	NdFeB - N45H	Fluxo Axial - Tipo Torus	Aço SAE 1010	Aço SAE 1010	Cobre	50KW/285 rpm
Ramos, F.G	2015	NdFeB	Fluxo Axial - Tipo Torus	Aço	Fe2 % P	Cobre	1KW/717 rpm
Borba, M.G	2016	NdFeB	Fluxo Axial	Aço	Aço	Cobre	7,5KW/1760
Pereira, R.A	2016	NdFeB	Fluxo Axial	Aço ABNT 1020	Não foi mencionado, apenas que é não condutor e não magnético	Cobre	100 W/300 rpm
Ahmad, G	2017	NdFeB - N42	Fluxo Axial	Aço	Material não condutor e não magnético	Cobre	11mW/200 rpm
Kölzer, J.F	2017	Ferrite	Fluxo Radial	Aço	Aço	Cobre	3000W
GERADOR DESENVOLVIDO PELA AUTORA							
Morais, J.B.M	2019	NdFeB - N52	Fluxo Axial	Nylon	Aço - silício E110	Cobre	100W

Fonte: Autor

Também se obteve a análise da potência extraída com a velocidade do vento conforme a Figura 43, ela mostrou que conforme temos um aumento da velocidade do vento em metros por segundo, a potência extraída também vai aumentando conforme a velocidade do vento no campus Maracanaú, assim como o horário em que os dados da torre eólica de microgeração analisados, tem total relevância.

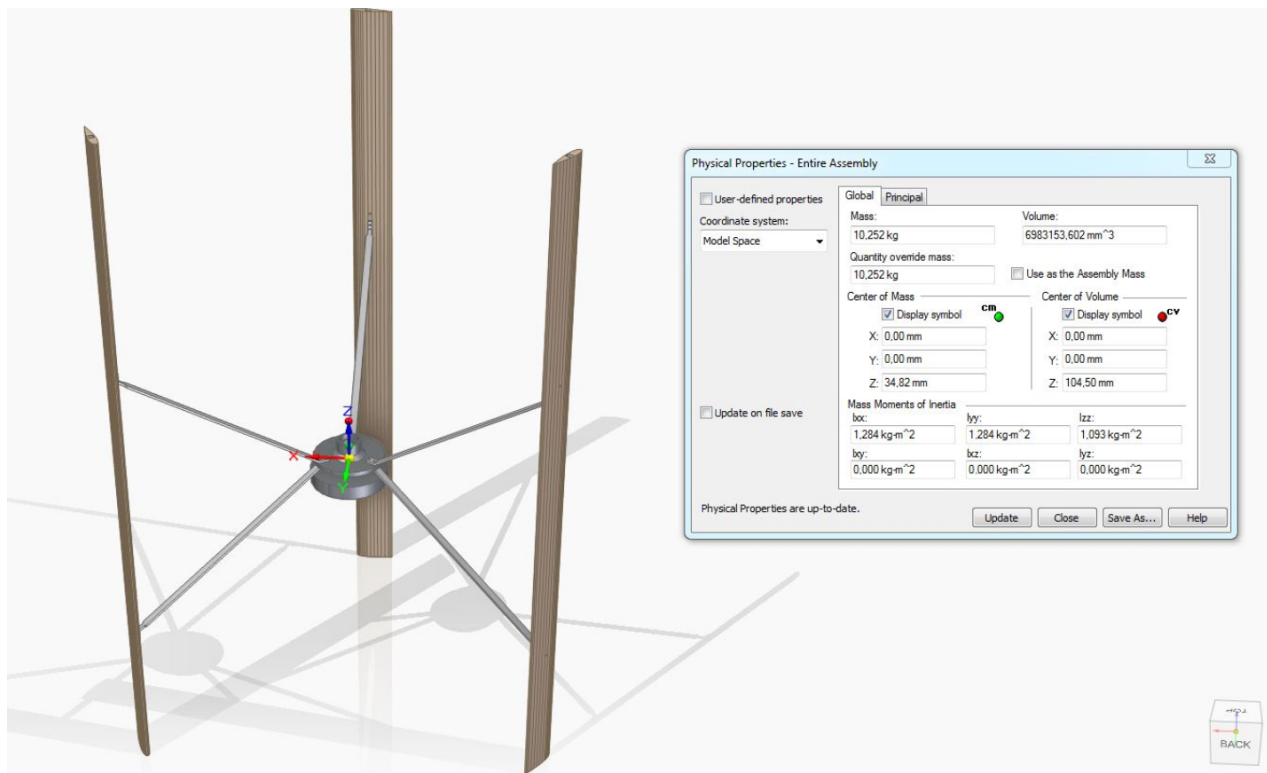
Figura 43 – Gráfico Potencia extraída x Velocidade do vento



Fonte: Autor.

Conforme as pesquisas realizadas mostram, o *nylon* e o aço são os principais materiais usados para os aerogeradores de pequeno porte. Visando um maior aprofundamento e compreensão para analisar os materiais que foram levantados nesta pesquisa foi comparado o aço com o *nylon*, onde foi feita uma simulação no *software* de CAD do momento de inércia conforme a Figura 44 e Figura 45 para cada material. Levando como principal característica para a análise o tipo de cada material selecionado.

Figura 44 – Momento de inércia para o aço



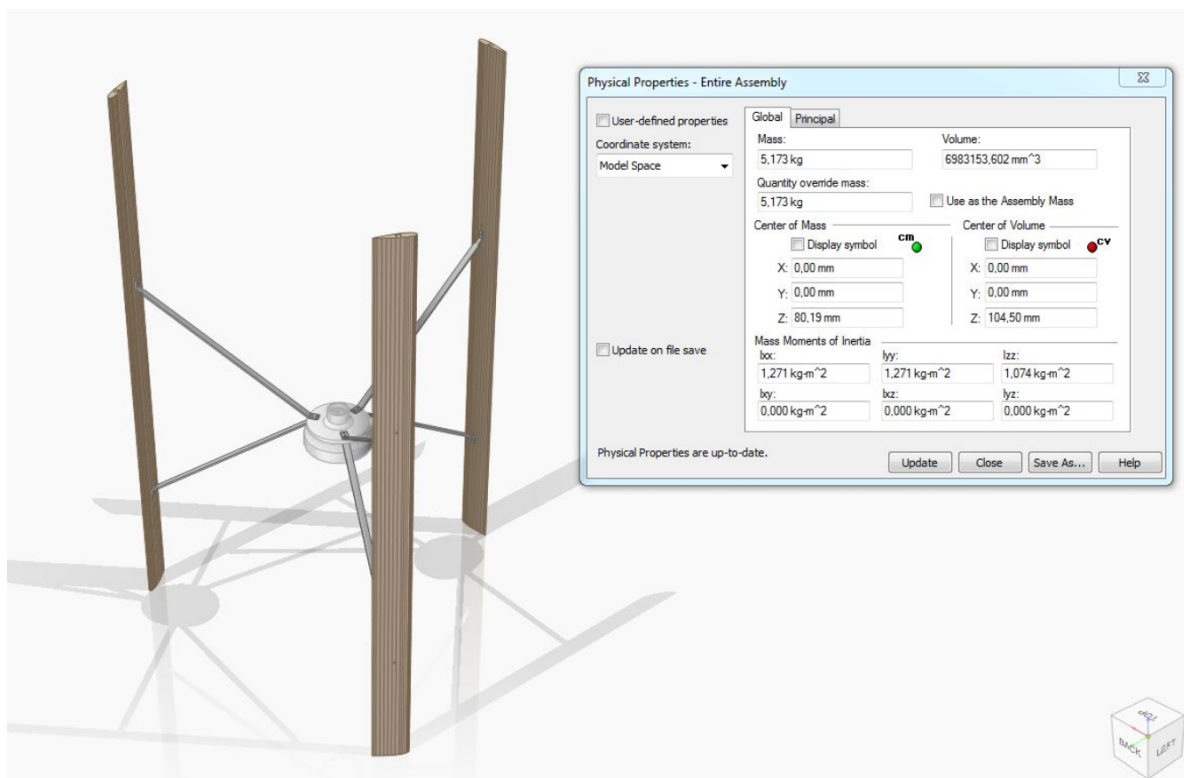
Fonte: Autor.

O processo de análise dos momentos de inércia foi obtido com a utilização do *software Solid Edge*, onde após o desenho de todas as peças concluiu-se a montagem e a seleção de todos os materiais corretos para cada componente. Os resultados da simulação foram coletados no eixo y, pois é nele onde ocorre os movimentos rotativos advindos da variação das velocidades dos ventos.

O momento de inércia mássico expressa o grau de dificuldade em alterar-se o estado de movimento de um corpo em rotação. O momento de inércia irá depender da distribuição da massa dos componentes que ficam ao redor do eixo de rotação que foi selecionado para a simulação de CAD. Como o valor do momento de inércia do aço foi superior, temos que torna-se mais difícil gira-lo e consequentemente alterar suas rotações para as condições de ventos locais.

Analizou-se que devido as dimensões do rotor adicionadas com as das pás que isso

Figura 45 – Momento de inércia para o nylon



Fonte: Autor.

contribuiu para o aumento do valor do momento de inércia, onde para a estrutura completa com o *nylon* temos uma massa de 5,173 kg e para o aço 10,52 kg de massa. Em bancada os testes realizados apenas com o microgerador sem a estrutura das pás montadas, tem valores para os seus momentos de inércia, tanto para o *nylon* quanto para o aço, menores, pois a porção de massa que está afastada do eixo de giro contribui para o aumento do valor do momento de inércia.

O resultado experimental obtido foi então comparado com os resultados analíticos, onde a diferença entre o valor do momento de inércia calculado quando comparado com o do simulado em CAD é pequena tornando-se desprezível. Considerando que os resultados analíticos utilizaram dados obtidos por meio de medição para se ter as outras variáveis necessárias para se concluir o cálculo do momento de inércia, foi possível encontrar o valor médio do momento de inércia para os dois tipos de materiais.

O momento de inercia juntamente com a aceleração angular produz um torque externo que afeta a amplitude de oscilações do rotor. Para o menor valor do momento de inércia que foi obtido com o rotor de *nylon* temos que os valores para as acelerações angulares são maiores por possuírem menos massa, consequentemente tendo uma dinâmica de desenvolvimento melhor.

No entanto, para o rotor com menor momento de inércia a turbina consegue passar

seu estágio crítico e atingir velocidades rotacionais estáveis. A velocidade de rotação da turbina varia conforme as oscilações da velocidade do vento e também dependem diretamente do valor do momento de inércia, onde essas variações afetam diretamente o valor de potência mecânica gerada. Consequentemente, conforme temos um menor valor de momento de inércia as amplitudes de velocidade de rotação da turbina aumentam.

Foram avaliadas as altas rotações de testes realizados para os trabalhos analisados, e concluiu-se que as altas rotações de testes em bancadas são necessárias com o objetivo de se chegar a frequência de 60 Hz da rede, para conseguir conectar os valores de tensão na rede elétrica, já que os valores de frequência na saída do gerador variam linearmente com a velocidade de rotação do gerador conforme a Equação 3.1. A excitação do rotor no gerador com tensões e correntes alternadas, é realizada de modo a controlar a energia gerada e manter a frequência de saída no gerador constante.

Mesmo diante de algumas dificuldades, a montagem do gerador eólico de pequeno porte foi realizada e os testes em bancada também. Foi constatado que a tensão eficaz induzida no circuito de armadura aumenta em função da maior densidade de fluxo magnético do ímã empregado no circuito de campo, neste caso o N52, mostrando a importância das propriedades magnéticas para a geração de energia. Os ensaios realizados confirmaram a percepção de que o ímã de neodímio N52 contribui para a maior tensão induzida no circuito do estator, sendo verificado um ganho de tensão de até 2,5 vezes quando comparado com o ímã de neodímio N35, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Tensão gerada, por bobina, em função da velocidade e do tipo de ímãs

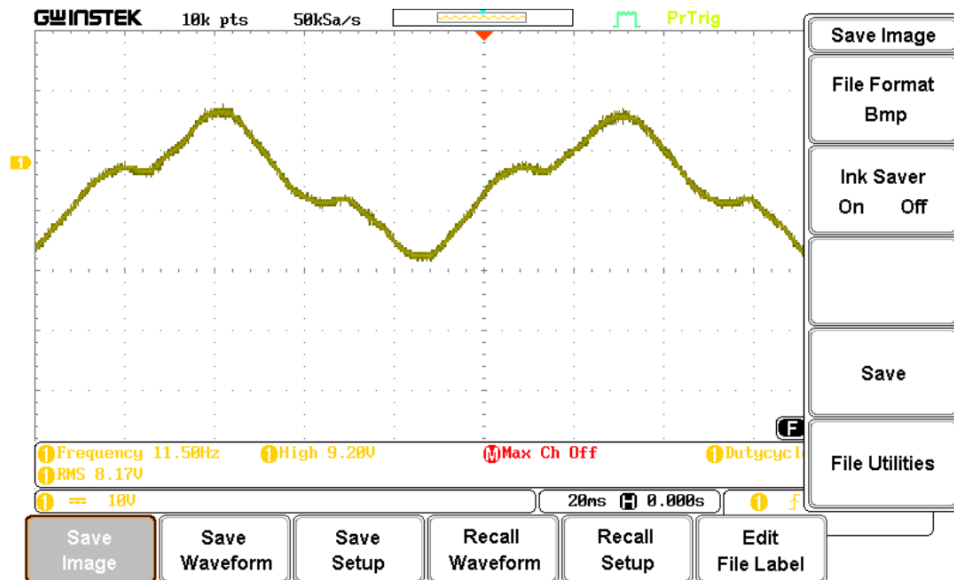
Ímã do tipo N35		
Diâmetro do fio (mm)	Vrms	Frequência(Hz)
0,300	1,6V	33
0,300	0,4V	10
0,455	1,6V	33
0,455	0,5V	10
Ímã do tipo N52		
Diâmetro do fio (mm)	Vrms	Frequência(Hz)
0,300	3,8V	33
0,300	1,2V	10
0,455	4,0V	33
0,455	1,2V	10

Fonte: Autor

Devido a ausência de um segundo rotor para direcionar melhor as linhas de campo dos ímãs e compor o projeto com uma estrutura mais assertiva, não se teve o melhor aproveitamento do campo magnético dos ímãs usados nos testes. Não foi possível inserir

um segundo rotor, devido as limitações dimensionais da peça, dificultando o aumento da potência de saída do gerador, tendo baixos valores de tensão eficaz coletados no osciloscópio conforme indicado na Figura 46.

Figura 46 – Resultado osciloscópio com valores de tensão gerados



Fonte: Autor.

Modelando pela Equação 3.5 e analisando a oscilação do vento foi possível encontrar os valores da velocidade angular (w) em função do tempo, conforme a Figura 47, e a aceleração angular (α). Pela simulação em CAD obteve-se o momento de inércia de $1,093 \text{ kg.m}^2$ para o aço e $1,074 \text{ kg.m}^2$ para o *nylon*, possibilitando-se a obtenção de valores de torque. Com a equação também foi possível calcular o valor do momento de inércia e compará-lo com o valor simulado em CAD. Consequentemente, foi possível encontrar a potência para os dois tipos de materiais: o *nylon* e o aço. O gráfico mostrado na Figura 48 facilita a comparação dos dois materiais.

A velocidade angular na Figura 47 mostra diferentes valores para os dois tipos de materiais: aço e *nylon*, onde essa oscilação foi analisada em função do tempo, com as médias das velocidades de bancada e com a diferença entre a velocidade máxima que foi simulada e o valor médio encontrado, junto com o valor de (β), que foi analisado em função das velocidades de vento coletadas, foi possível encontrar os seus valores.

Assim, foi visto que o *nylon* manteve o seu momento de inércia menor quando comparado ao aço. O gráfico comparando a potência do *nylon* com a do aço, mostrando que o valor do *nylon* foi superior ao do aço, mais precisamente em 12 % pelo valor médio de potência mecânica, deixando evidente que o *nylon* seria mais viável. Isso se comprova, pois precisaria de uma potência de vento para acionamento menor, produzindo a mesma rotação no gerador, comparado com o aço que para produzir a mesma rotação necessita

Figura 47 – Velocidade angular



Fonte: Autor.

Figura 48 – Comparação da Potência do nylon x aço



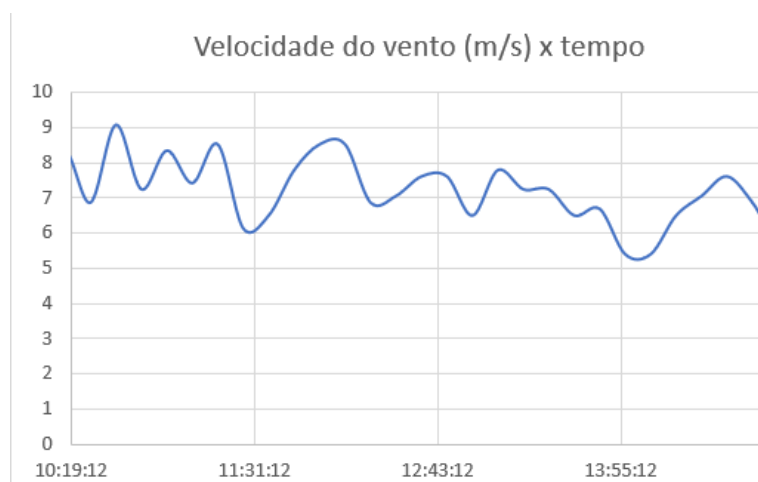
Fonte: Autor.

de uma potência maior. Foi possível perceber nitidamente que o *nylon* devido a seu menor momento de inércia, necessita de menos potencial eólico que o aço, deixando ele mais indicado para regiões urbanas com velocidades de ventos oscilatórias.

A Figura 49 foi plotada, à partir dos valores coletados de velocidades de vento no campus de Maracanaú, onde o gráfico foi construído, após analisar que entre o período de 10:00 as 15:00 horas do segundo dia, existiam oscilações maiores de velocidades de vento, sendo esse o motivo da seleção. Com essa maior variação esses valores foram adotados para dar continuidade e relacioná-los com as equações citadas e obteve-se os respectivos

valores de potência mecânica para essas oscilações de ventos.

Figura 49 – Curvas da oscilação da velocidade de vento no IFCE



Fonte: Autor.

5 Conclusões

Este trabalho buscou analisar os principais materiais usados na construção de geradores eólicos de pequeno porte. Os dez trabalhos analisados trouxeram características importantes dos materiais selecionados na construção ou projeto realizado pelos autores. Com essa pesquisa pode-se concluir que o principal material empregado na construção dos geradores eólicos de pequeno porte é o aço, porém a sua utilização aumenta o peso do equipamento fazendo com que ele necessite de maiores velocidades de ventos para um melhor rendimento, descartando a possibilidade de uso desse material para a construção de aerogerador de pequeno porte em regiões urbanas.

Percebeu-se que os valores de velocidade média de vento para microgeração são de aproximadamente 4 a 6,5 m/s na região do litoral Cearense, as aplicações de pequeno porte usam ventos intermitentes em regiões urbanas. Com a coleta de velocidade de vento realizada no IFCE de Maracanaú pode-se perceber que os principais valores de velocidade de ventos oscilaram entre 5 a 9 m/s, período esse que foi selecionado devido a uma maior variação do vento e indicando que as velocidades estão propícias para a microgeração.

Foi constatado que a tensão eficaz induzida no circuito de armadura aumenta em função da maior densidade de fluxomagnético do ímã empregado no circuito de campo, neste caso selecionamos o ímã N52, mostrando a importância das propriedades magnéticas para a geração de energia. Os ensaios realizados confirmam a percepção de que o ímã de neodímio N52 contribui para a maior tensão induzida no circuito do estator, sendo verificado um ganho de tensão de até 2,5 vezes quando comparado com o ímã de neodímio N35.

Os principais ímãs usados na construção de microgeradores é o ímã de neodímio, o principal material usado no rotor é o aço, tendo em sua grande maioria a construção com a configuração de fluxo do tipo axial e material do estator de aço ou com núcleo de silício quando são do tipo toroidal. Também foi visto que quando são do tipo toroidal usa-se configuração de duplo rotor de aço.

Foi possível construir um gerador com o material de *nylon* usado no rotor, foi usado 5 pares de polos dos ímã de neodímio N52 em polos opostos N-S montados a 36° de distância um dos outros, estator de silício com núcleo toroidal de laminação 0,37 mm, possuindo 10 bobinas construídas com fio AWG 18 e tendo cada uma um total de 110 voltas.

É possível perceber as altas rotações em que os geradores eólicos de pequeno porte são testados, eliminando a possibilidade de resultados satisfatório para a geração de energia em regiões na qual o vento possui uma velocidade reduzida. As altas rotações são usadas

com o objetivo de se chegar a frequência de 60 Hz da rede, para conseguir conectar os valores de tensão na rede elétrica, já que os valores de frequência na saída do gerador variam linearmente com a velocidade de rotação do gerador. A configuração de fluxo axial se mostrou bastante predominante nos trabalhos analisados, isso ocorre devido a sua superioridade em densidade de potência e reduzido volume efetivo.

A avaliação realizada comprovou que o *nylon* em comparação com o aço mostrou maior desempenho com momento de inércia menor. Esses resultados mostram que o *nylon* é uma opção para ser usado em regiões de ventos com menor velocidade, com grande oscilação de velocidades de ventos já que a potência de acionamento do aerogerador com momento de inércia menor também é de valor inferior à do aço.

Essa característica positiva que o *nylon* apresenta deve-se principalmente à sua densidade, pois ela é menor do que os materiais utilizados para a construção dos geradores eólicos e por isso o seu momento de inércia é menor em todos os casos. Mostrando que variáveis como o material mais adequado a ser empregado em uma determinada localidade, de acordo com as velocidades média dos ventos e análises estruturais não podem ser desprezadas, já que um gerador eólico mesmo sendo de pequeno porte é um projeto complexo.

Todos os objetivos do trabalho foram alcançados, o grande desafio no campo de geração eólica de pequeno porte é o aproveitamento dessa energia com um custo que deixe a tecnologia viável e acessível, e é nessa vertente que o estudo comparativo entre os principais materiais utilizados para aperfeiçoar a construção dessas máquinas está inserido. Quanto mais desenvolvido for esse aspecto, mais compensará a implantação dessa energia limpa e renovável.

5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar levantamento das curvas de velocidades de vento para as alturas de micro e mini geração em diferentes regiões urbanas;
- Verificar o tempo de vida útil do *nylon*, baseado nas condições climáticas urbanas;
- Fazer uma análise comparativa do material dos aerogeradores de grande porte com o de pequeno porte;
- Realizar análise comparativa de dez aerogeradores de pequeno porte que existem no estado do Ceará, de material, aplicação, potência.

Referências

AHMAD, G.; AMIN, U. Design, construction and study of small scale vertical axis wind turbine based on a magnetically levitated axial flux permanent magnet generator. **Renewable Energy**, v. 101, p. 286 – 292, 2017. ISSN 0960-1481. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116307285>.

ALBUQUERQUE, I. M.; MATOS, F. F. d. S. A characterization of vertical axis wind turbines. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 10, p. 4255–4260, Oct 2016. ISSN 1548-0992.

ALMEIDA, J. L. C. N. **PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO COM ROTOR DE ÍMÃS PERMANENTES INCLINADOS AXIALMENTE PARA MICROCENTRAIS ELÉTRICAS A PARTIR DE MOTOR DE INDUÇÃO**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia, 2010.

ALVES, F.; LEBOURGEOIS, R.; WAECKERLÉ, T. Soft magnetic materials for electrical engineering: state of the art and recent advances. **The Second International Conference on Systems, Signals and Devices (SSD' 03)**, v. 15, p. 467 – 479, 2005.

AMARANTE, O. A. C. do; ZACK, M. B. E. J.; SÁ, A. L. D. Atlas do potencial eólico brasileiro. **CEPEL - CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA**, p. 1 – 44, 2001.

ANEEL, A. N. de E. E. Banco de informação de geração big. p. 1 – 20, 2018.

ARAB, A.; JAVADI, M.; ANBARSOOZ, M.; MOGHIMAN, M. A numerical study on the aerodynamic performance and the selfstarting characteristics of a darrieus wind turbine considering its moment of inertia. **Renewable Energy**, v. 107, p. 298 – 311, 2017.

AZEVEDO, T. P. S. de. **Bancada Experimental para Ensaios em Geradores Elétricos Utilizados em Aerogeradores de Pequeno Porte**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2012.

BEZERRA, F. D. Energia eólica no nordeste. **CADERNO SETORIAL ETENE**, v. 66, p. 1 – 20, 2019.

BORBA, M. G. **DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA TRIFÁSICA COM NÚCLEO DO ROTOR PRODUZIDO A PARTIR DA METALURGIA DO PÓ E ÍMÃS DE NEODÍMIO-FERRO-BORO PARA APLICAÇÃO EM AEROGERADORES**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE MATERIAIS, 2016.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. [S.l.]: GEN – Grupo Editorial Nacional, 2016.

CARVALHO, T. C. C. and Paulo Cesar Marques de. Caracterização de potencial eólico: Estudo de caso para maracanaú (ce), petrolina (pe) e parnaíba (pi). **Revista Brasileira de Energia Solar Ano 6**, VI, p. 1 – 10, 2015.

CASTRO, M. A. L. **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024**. 2017. 1 - 26 p. 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>.

DAGHIGH, A.; JAVADI, H.; TORKAMAN, H. Design optimization of direct-coupled ironless axial flux permanent magnet synchronous wind generator with low cost and high annual energy yield. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 52, n. 9, p. 1–11, Sep 2016. ISSN 0018-9464. Disponível em: <<https://doi-org.ez138.periodicos.capes.gov.br/10.1109/TMAG.2016.2560143>>.

DUTRA, R. **Energia Eólica Princípios e Tecnologias**. [S.l.]: CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2008.

EPE. **Balanco Energetico Nacional 2018**. 2018. 1 - 62 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>.

FERREIRA Ângela P. **Probemática e Perspectiva da Utilização do Gerador de Ímãs Permanentes na Produção de Energia Eólica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto Faculdade de Engenharia, 2000.

FERREIRA Ângela Paula Barbosa da S. **Projeto de uma máquina de ímanes permanentes de fluxo axial orientado para os sistemas de conversão de energia eólica**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de engenharia da universidade do Porto, 2011.

FITZGERALD, A. E. **Máquinas Elétricas**. [S.l.]: BOOKMAN, 2006.

GIANNINI, M.; DUTRA, R. M.; GUEDES, V. G. Estudo prospectivo do mercado de energia eólica de pequeno porte no brasil. **Brazil Windpower 2013 conference e exhibition**, p. 1 – 10, 2013.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. [S.l.]: PEARSON,, 2005.

HUI, I.; CAIN, B. E.; DABIRI, J. O. Public receptiveness of vertical axis wind turbines. **Energy Policy**, v. 112, p. 258 – 271, 2018. ISSN 0301-4215. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517306857>>.

IPECEL, I. de Pesquisa e Estratégia Econômica do C. anorama da produção de energia elétrica no estado do ceará: Um enfoque para a matriz eólica. v. 141, p. 1 – 33, 2018.

JASSMANN, U.; REITER, M.; ABEL, D. An innovative method for rotor inertia emulation at wind turbine test benches. **Proceedings of the 19th World Congress**, v. 19, p. 10107 – 10112, 2014.

JUNG, T.-U. Electromagnetic design analysis and performance improvement of axial field permanent magnet generator for small wind turbine. **JOURNAL OF APPLIED PHYSICS**, v. 111, p. 07E708, 2012.

KAHOURZADE, S.; MAHMOUDI, A.; PING, H. W.; UDDIN, M. N. A comprehensive review of axial-flux permanent-magnet machines. **CANADIAN JOURNAL OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING**, v. 37, p. 19–33, 2014. ISSN 0840-8688.

KOLZER, J. F. **PROJETO ÓTIMO MULTIDISCIPLINAR DE GERADORES SÍNCRONOS COM ÍMÃS PERMANENTES DE FERRITE PARA MICROGERAÇÃO EÓLICA**. Dissertação (Mestrado) — Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

KUMARA, R.; RAAHEMIFARB, K.; FUNG, A. S. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 281 – 291, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118301254>>.

LIBERT, F. **Design, optimization and comparison of permanent magnet motors for a low speed direct driven mixer**. Dissertação (Mestrado) — Royal Institute of Technology, 2004.

LINARD, F. J. A. **Projeto de um gerador com ímãs permanentes e fluxo axial de 50KW para aplicação de geração eólica distribuída**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CENTRO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2014.

LIRA, M. A. T.; SILVA, E. M. D.; ALVES, J. M. B. Estimativa dos recursos eólicos no litoral cearense usando a teoria da regressão linear. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 349 – 366, 2011.

LOUREIRO, L. T. dos R. **Um Estudo Sobre a Máquina Torus**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, 2008.

LUCIANO, B. A.; SILVA, S. A. da. Sobre os ímãs permanentes e suas aplicações na eletroeletrônica. **Principia**, v. 4, p. 28 – 32, 1997.

LUTZ, O. **SITUAÇÃO, NECESSIDADE DE DESENVOLVIMENTO, CONCEPÇÃO DE CONFIGURAÇÃO E PERSPECTIVAS DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE A SEREM UTILIZADOS NO BRASIL**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

MAGNOLI, M. V. **Cálculo das velocidades angulares críticas da linha de eixo de turbinas hidráulicas com ênfase no comportamento estrutural dinâmico do gerador**. Dissertação (Mestrado) — Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, 2005.

MAIA, T. A. C. **Projeto e Construção de um Gerador a ímãs permanentes de Fluxo Axial para Turbinas Eólicas de Pequena Potência**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2011.

- MARTINELLO, D. **SISTEMA DE EMULAÇÃO DE AEROGERADORES PARA APLICAÇÃO EM GERAÇÃO DISTRIBUIDA DE ENERGIA ELÉTRICA**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2015.
- MOREIRA, H. L.; BASTOS, A. M.; SANTOS, R. B. Análise comparativa da viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos e eólicos para microgeração de energia elétrica. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, v. 7, p. 1 – 10, 2018.
- NIADA, R. F.; BITTENCOURT, S. D.; MARTINS, R. M. de; AQUIM, P. M. de; DIAS, M. M. Desenvolvimento de um motor com ímãs permanentes e núcleo do rotor obtido a partir da metalurgia do pó para aeromodelos. **Ciência Tecnologia dos Materiais**, v. 27, p. 53–62, 2015. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/ldtm/publicacoes/Niada_53-62>.
- OSORIO, J. O. M. **Análise da Máquina Torus sobre Frenagem Eletrodinâmica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2011.
- PEREIRA, E. B. Segurança energética: perspectivas no enfrentamento às mudanças climáticas globais. **Conferencia Internacional do INCT para Mudanças Climáticas**, p. 1 – 37, 2016.
- PEREIRA, R. A.; SILVA, L. A. da; GIGO, W. Projeto de um gerador de ímãs permanentes de fluxo axial para pequena turbina eólica. **Jornal de Engenharia Tecnologia e Meio Ambiente**, v. 1, n. 6, p. 21–26, 2016.
- RAMOS, F. G. **Desenvolvimento de uma Máquina Síncrona Trifásica com ímãs de Nd- Fe- Br e Núcleo do Estator a partir de Fe2% P Sinterizado Aplicado em Aerogerador de 1kW**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, 2015.
- REZAEIHA, A.; MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters. **Energy Conversion and Management**, v. 169, p. 45 – 77, 2018. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418305193>>.
- S.DESHPANDE, U. Sobre os ímãs permanentes e suas aplicações na eletroeletrônica. **IEEE International Electric Machines and Drives Conference**, v. 3, p. 509–515, 2003.
- STRNAT, K. J. Modern permanent magnets for applications in electro-technology. **Proceedings of the IEEE**, v. 78, n. 6, p. 923–946, Jun 1990. ISSN 0018-9219.
- TIBOLA, G. **Sistema Eólico de Pequeno Porte para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2009.
- TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. [S.l.]: Empresa de Pesquisa Energética, 2016. ISBN 978-85-60025-06-0.

VEIGA, T. N. A. **Projeto de Geradores Síncronos a ímãs Permanentes para aplicações em sistemas Eólicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2011.

WANG, R.-J.; BRONN, L.; GERBER, S.; TLALI, P. An axial flux magnetically geared permanent magnet wind generator. **IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING**, v. 10, p. 123 – 132, 2015.

WESCHENFELDER, F.; PAULETTI, P.; BITTENCOURT, S. D.; PELEGRINI, L.; ITO, D. K. Situação atual e perspectivas da produção de Ímãs permanentes e reservas de terras raras: Brasil mundo. **Tecnologia Metalúrgica Materiais e Minerios**, v. 9, p. 309–315, 2012. Disponível em: <<http://tecnologiammm.com.br/files/v9n4/v9n4a07.pdf>>.

WESCHENFELDER, F.; PAULETTI, P.; BITTENCOURT, S. D.; PELEGRINI, L.; ITO, D. K.; SCHAEFFER, L. Situação atual e perspectivas da produção de ímãs permanentes e reservas de terras raras: Brasil x mundo. **Tecnol. Metal. Mater. Mineração**, v. 9, p. 309 – 315, 2012. Disponível em: <<http://tecnologiammm.com.br/files/v9n4/v9n4a07.pdf>>.