

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

MONIR GÖETHEL BORBA

**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**

Porto Alegre

2016

MONIR GÖETHEL BORBA

**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 submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia modalidade
Acadêmica**

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer

Porto Alegre

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Vice Coordenador: Afonso Reguly

Borba, Monir Göethel

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 / Monir Göethel Borba. -- 2016.

41 f.

Orientador: Lirio Schaeffer.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Metalurgia do pó. 2. Máquinas elétricas. 3. Material magnético macio. 4. Aerogeradores. I. Schaeffer, Lirio, orient. II. Título.

MONIR GÖETHEL BORBA

**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**

Esta dissertação foi analisada e julgada para a obtenção adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Lirio Schaeffer

Carlos Pérez Bergmann

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Moisés de Mattos Dias (Doutor em Engenharia) - FEEVALE _____

Vicente Mariano Canalli (Doutor em Engenharia) - PUCRS _____

Vinicius Martins (Doutor em Engenharia) - IFSul _____

Dedico este trabalho aos meus pais José Monir Borba (In Memoriam) e Mériane Göethel Borba, e ao meu irmão Pietro Göethel Borba pelo infinito e constante amor que me é dado porque “o que fomos um para o outro, ainda o somos”.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me guiar no caminho percorrido até aqui, concedendo serenidade para aceitar o que não posso mudar, coragem para mudar o que posso mudar e sabedoria para perceber as diferenças.

A minha família, por ser o que possuo de mais valioso e me inspirarem a ser quem eu sou, pelo amor, carinho, respeito, apoio incondicional diante das dificuldades encontradas, compreensão pelas horas que estive ausente e incentivo para seguir em frente.

Ao Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer pela oportunidade ímpar de realizar este trabalho sobre a sua orientação e confiança em mim depositada.

Ao Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias pela sua coorientação e incentivo durante toda a realização deste trabalho, além da sua grande amizade.

Ao Prof. Dr. Eng. Vicente Mariano Canalli pela amizade e indicação da oportunidade de realização do mestrado.

Aos colegas André Carvalho Tavares, Diego Pacheco Wermuth, Felipe Guimarães Ramos, Gérson Paz Teixeira e Vinícius Martins por serem pessoas de vital importância no decorrer deste trabalho pela contribuição com ideias, sugestões, críticas, apoio, companhia, agradáveis horas de conversa, e em especial, por compartilharam o seu conhecimento, histórias e experiências, tornando-se parcerias e amizades sinceras.

Aos demais colegas da UFRGS pelo auxílio quando necessário e amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento de recursos através do Programa de Apoio a Núcleos de Excelência (PRONEX) 008/2009.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela provisão da bolsa de mestrado.

E a todos que cooperaram de maneira direta ou indireta no decorrer da concepção deste trabalho e colaboraram no esforço da sua conclusão, o meu profundo e sincero agradecimento.

Realizar no presente, as coisas como são e
trabalhar para que sejam, no futuro, como
devem ser

Fernando Abott

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o projeto, construção e 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 para aplicação em aerogeradores. Tomando como base a máquina elétrica modelo VTOP da fabricante Grupo Voges, foram realizadas mudanças na forma construtiva dos núcleos do estator e do rotor. O pacote chapas que compõem o núcleo do estator foi montado de maneira que as ranhuras apresentem um ângulo de inclinação de 10° ao longo de toda a extensão da máquina. Para o rotor, foi projetado e construído um núcleo através do processo de metalurgia do pó utilizando como matéria-prima pó de ferro puro. A esse novo núcleo foram acrescentados ímãs de neodímio-ferro-boro. Após a montagem dos componentes, a máquina elétrica foi ensaiada em uma bancada de testes. Paralelamente com a confecção do núcleo foi efetuada a simulação computacional da máquina com três tipos diferentes materiais no núcleo do rotor. Os resultados encontrados indicaram que a metalurgia do pó é uma alternativa viável para produção do núcleo de máquinas elétricas. Entretanto alterações na topologia e na forma de fixação dos ímãs são necessárias para um melhor desempenho.

Palavras-chave: Metalurgia do pó. Máquinas elétricas. Material magnético macio. Aerogeradores.

ABSTRACT

This work aims at the design, construction and performance analysis of a three-phase synchronous electric machine with a rotor core produced by powder metallurgy and neodymium-iron-boron magnets for application in wind turbines. Based on the electric machine VTOP model of the manufacturer Grupo Voges, changes were carried out in the constructive form of the stator and rotor cores. The bundle of plates that make the role of stator core were mounted with a 10° slope along the entire length of the machine. For the rotor, a core was designed and built by employing powder metallurgy process using pure iron powder as raw material. The neodymium-iron-boron magnets were added to this new core. After assembling the components, the electric machine was tested on a test bench. Simultaneously with the core fabrication, the machine was simulated with three different materials in the rotor core. The results indicated that powder metallurgy is a viable alternative to produce the core of electric machines. However, changes in the topology and shape of the magnets are necessary for better assembly, improving the performance.

Keywords: Powder metallurgy. Electrical machine. Soft magnetic material. Wind turbine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da urbanização	17
Figura 2 - Pesquisas desenvolvidas no GDER	19
Figura 3 - Partícula de <i>Soft Magnetic Composite</i>	25
Figura 4 - Comparativo de volume entre motor de ímãs permanentes e de indução	26
Figura 5 - Máquina de fluxo radial.....	27
Figura 6 - Máquina de fluxo axial	27
Figura 7 - Máquina de fluxo transversal.....	28
Figura 8 - Gerador multipolos para energia eólica	29
Figura 9 - Réplicas dos primeiros moinhos de vento orientais.....	29
Figura 10 - Componentes de um aerogerador de eixo vertical.....	31
Figura 11 - Gerador assíncrono de rotor com gaiola de esquilo ligado à rede elétrica	32
Figura 12 - Gerador assíncrono de dupla excitação ligado à rede elétrica	33
Figura 13 - Gerador síncrono de rotor bobinado com conversor de frequência ligado à rede elétrica	34
Figura 14 - Gerador síncrono de ímãs permanentes e com conversor de frequência ligado à rede elétrica	35
Figura 15 - Diagrama de bloco da metodologia empregada.....	36
Figura 16 - Microscopia eletrônica de varredura do pó de ferro ASC100.29	39
Figura 17 - Partícula de pó ASC100.29 (a) formato externo e (b) seção transversal.....	39
Figura 18 - Chapa do núcleo e detalhe da ranhura	42
Figura 19 - Estator finalizado	43
Figura 20 - Ímã de Neodímio-Ferro-Boro	45
Figura 21 - Dimensões dos ímãs de neodímio-ferro-boro.....	45
Figura 22 - Punção (a) superior, (b) matriz de compactação e (c) punção inferior.....	46
Figura 23 - Desenho técnico (a) punção superior, (b) matriz de compactação e (c) punção inferior	47
Figura 24 - Geometria final das peças que compõem o núcleo.....	49
Figura 25 - União entre peças do núcleo e ímãs.....	49
Figura 26 - Conjunto matriz e punções fixados à prensa	51
Figura 27 - Desenho da peça compactada	52
Figura 28 - Curva de sinterização.....	52
Figura 29 - Desenho do rotor finalizado.....	53

Figura 30 - Colagem dos ímãs de NdFeB.....	53
Figura 31 - Vistas (a) superior e (b) frontal do rotor completo	54
Figura 32 - Vista frontal da montagem do rotor e do estator	54
Figura 33 - Captura de tela do desenho da máquina em 2D no AutoCAD 2012	55
Figura 34 - Captura de tela com a definição dos materiais no FEMM.....	56
Figura 35 - Banca de testes.....	57
Figura 36 - Peças compactadas a verde	58
Figura 37 - Peça sinterizada típica.....	59
Figura 38 - Peça parcialmente usinada	60
Figura 39 - Comparação entre peças (a) antes e (b) após usinagem parcial.....	60
Figura 40 - Densidade e linhas de fluxo magnético para os rotores de (a) aço M-15, (b) Fe puro e (c) Fe2%P	61
Figura 41 - Captura de tela das formas de onda da tensão e corrente na frequência de 18 Hz	63
Figura 42 - Rotor com ímã descolado durante o ensaio	64
Figura 43 - Ímãs de NdFeB novo e danificado.....	64
Figura 44 - Rotor com ímã parcialmente oxidado.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características gerais da máquina elétrica empregada neste trabalho.....	37
Tabela 2 - Propriedades pó de ferro ASC100.29.....	38
Tabela 3 - Especificações da prensa hidráulica.....	40
Tabela 4 - Especificações do pacote de chapas.....	41
Tabela 5 - Especificações do bobinamento.....	42
Tabela 6 - Peças compactadas a verde.....	59
Tabela 7 - Comparativo entre torque e densidade de fluxo máximo.....	62
Tabela 8 - Ensaio com carga.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	Antes de Cristo
AWG	<i>American Wire Gauge</i> (Escala Americana Normalizada)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
d.C.	Depois de Cristo
FEMM	<i>Finite Element Method Magnetics</i> (Método de Elementos Finitos para Materiais Magnéticos)
GDER	Grupo de Desenvolvimento de Energias Renováveis
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
rpm	Rotações por minutos
SMC	<i>Soft Magnetic Composite</i> (Compósito Magnético Macio)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VTOP	Modelo utilizado do motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo
.dxf	<i>Drawing Exchange Format</i> (Arquivo de intercâmbio para modelos CAD)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área da peça compactada	[mm ²]
B	Densidade de fluxo magnético	[T]
ρ	Densidade	[g/cm ³]
F	Força de compactação	[N]
F_{inv}	Frequência selecionada no inversor	[Hz]
h_{pc}	Altura da peça compactadas	[mm]
m_{pc}	Massa da peça compactada	[kg]
n	Rotações por minuto	[rpm]
P	Pressão de compactação	[MPa]
$P_t 1$	Primeiro patamar de tempo durante a sinterização	[min]
$P_t 2$	Segundo patamar de tempo durante a sinterização	[min]
t	Tempo de sinterização	[min]
T_s	Temperatura de sinterização	[°C]
T	Torque	[N·m]
η	Fator de potência	[%]
\emptyset_{pc}	Diâmetro das peças compactadas	[mm]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1.	MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS E DUROS PRODUZIDOS POR METALURGIA DO PÓ	21
2.2.	APLICAÇÃO DA METALURGIA DO PÓ EM NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS	22
2.3.	MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS SÍNCRONAS TRIFÁSICAS COM ÍMÃS PERMANENTES	25
2.4.	AEROGERADORES	29
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1.	MÁQUINA ELÉTRICA USADA COMO REFERÊNCIA	36
3.2.	PÓ DE FERRO PURO	38
3.3.	METALURGIA DO PÓ.....	40
3.4.	ESTATOR	41
4.	ANÁLISE EXPERIMENTAL	44
4.1.	ROTOR	44
4.1.1.	Ímãs de Neodímio-Ferro-Boro	44
4.1.2.	Projeto do núcleo	45
4.1.3.	Produção do núcleo do rotor através da metalurgia do pó	49
4.1.4.	Montagem do rotor	53
4.2.	MONTAGEM FINAL DA MÁQUINA ELÉTRICA	54
4.3.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	55
4.4.	BANCADA DE TESTES.....	56
5.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	58
5.1.	PEÇAS DO NÚCLEO OBTIDAS POR METALURGIA DO PÓ	58
5.2.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	61
5.3.	TESTES DE FUNCIONAMENTO E DESEMPENHO	62
6.	CONCLUSÃO	66
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
8.	REFERÊNCIAS	69
	ANEXO A - CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	78
	ANEXO B - MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO VTOP - FOLHA DE DADOS	79

ANEXO C - MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO VTOP - CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	80
ANEXO D - MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO VTOP - CARACTERÍSTICA DE DESEMPENHO.....	81

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é, sem sombra de dúvida, uma das formas de energia mais utilizada pela humanidade nos dias de hoje. A sua popularização ao longo do tempo ocorreu graças a sua grande versatilidade de uso, facilidade de transporte, baixo índice de perdas durante a conversão e, atualmente, em virtude da evolução tecnológica dos dispositivos eletrônicos como *smartphones*, *notebooks* e *tablets*. O aumento na demanda mundial de energia elétrica tem sido impulsionado por diversos fatores, entre os quais pode-se citar o crescimento demográfico da população mundial, expansão das áreas urbanizadas, desenvolvimento das indústrias, aquecimento global, mudanças nos padrões de vida em regiões de alta densidade populacional etc. A Figura 1 mostra a veloz e impressionante evolução urbanística ocorrida nas cidades de Dubai e Singapura a partir dos anos 2000. (ASIF; MUNEER, 2007; BORED PANDA,2016)

Figura 1 - Evolução da urbanização



Fonte: adaptado de BOREDPANDA.COM (2016)

Em virtude destes fatores o consumo de energia elétrica está crescendo em um ritmo mais veloz do que o abastecimento de energia primária é realizado. A atual matriz energética global mostra que as fontes primárias predominantes para obtenção de energia elétrica são do tipo não renováveis e um eventual aumento da sua utilização acelera o seu futuro esgotamento. A diversificação da matriz energética, a partir da utilização de fontes de energias renováveis, vem sendo o grande desafio para este momento. (ASIF; MUNEER, 2007; U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2015)



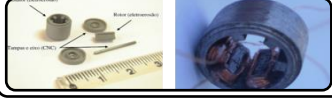
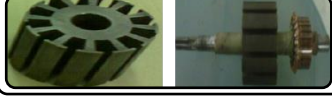

A utilização da energia cinética disponível no vento para geração de energia elétrica é uma das principais apostas no campo das fontes renováveis de energia e o seu uso vem crescendo exponencialmente a cada dia. A evolução tecnológica ocorrida com os diversos componentes dos aerogeradores permitiu a fabricação de máquinas com tamanho e potência cada vez maiores. Com o atual estado de desenvolvimentos dos componentes, a busca por equipamentos que convertam uma maior quantidade de energia cinética em elétrica tem norteado uma inúmera quantidade de pesquisas, principalmente na área de máquinas elétricas.

O gerador elétrico é o responsável por realizar a conversão de energia mecânica em elétrica. A integração entre o gerador elétrico e os demais componentes de conversão eólica apresentam diversos problemas, tais como: variações na velocidade do vento e do torque de entrada, necessidade de frequência e tensão constantes na energia final produzida, dificuldade de transporte e instalação (devido as dimensões e peso do gerador), além das dificuldades de operação e manutenção decorrente do isolamento geográfico dos aerogeradores, entre outros. Em virtude do estado da arte dos geradores elétricos se encontrar muito próximo ao limite, a busca por soluções para alguns dos problemas existentes passa por alterações no processo de fabricação deste componente e nos materiais utilizados na construção dos núcleos do rotor e/ou estator. (DIAS, 1999; CUSTÓDIO, 2009).

A metalurgia do pó é um processo de fabricação que tem ganhado espaço na produção de máquinas elétricas por permitir a fabricação do núcleo de rotores e estatores em blocos maciços únicos, o que pode resultar dependendo da liga de materiais utilizados em uma máquina elétrica com características superiores a construída de forma tradicional. Além disto, a metalurgia do pó vem ao encontro dos ideais das energias renováveis por ser um processo que tem como característica o baixo impacto ambiental quando comparado com as tecnologias concorrentes. A metalurgia do pó exige um menor consumo de energia de transformação e possibilita um alto aproveitamento da matéria prima. (CHIAVERINI, 2001; GRUPO SETORIAL DA METALURGIA DO PÓ, 2009).

O Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) tem se destacado como um dos principais locais onde é realizado o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias voltados para a metalurgia do pó. A sua utilização para a produção de núcleos de máquinas elétricas rotativas tem norteado inúmeras pesquisas realizadas no Grupo de Desenvolvimento de Energias Renováveis (GDER) que visam aperfeiçoar o rendimento da conversão eletromecânica de energia. Ao longo dos anos diversos estudos foram realizados utilizando inúmeras formulações de ligas na produção dos núcleos de máquinas elétricas rotativas. A Figura 2 apresenta trabalhos realizados no GDER ao longo dos anos.

Figura 2 - Pesquisas desenvolvidas no GDER

	Construção de uma máquina síncrona de relutância trifásica com rotor de material magnético macio sinterizado - Moisés de Mattos Dias (1999)
	Desenvolvimento de compósitos magnéticos macios utilizados em núcleos de máquinas elétricas - Jorge Alberto Lewis Esswein Junior (2009)
	Construção e análise do desempenho de um motor de indução trifásico com núcleo produzido via metalurgia do pó - Philippe Pauletti (2012)
	Desenvolvimento de um mini motor de passo à partir da moldagem por injeção de pós metálicos - Maiquel Emersom Pffingstag (2014)
	Desenvolvimento de uma máquina síncrona com ímãs permanentes e núcleo sinterizado utilizada em aerogerador - Luciano Lohmann Cerva (2014)
	Desenvolvimento de um rotor por metalurgia do pó a ser utilizado em um motor universal - Roberto Luis Ribeiro da Cas (2015)
	Desenvolvimento de um mini-motor com o estator produzido por processo de metalurgia do pó - Rafael Francisco Niada (2015)
	Desenvolvimento de um estator por metalurgia do pó a ser utilizado em um motor universal - Fernando Martins Fernandes (2015)
	Construção e análise do desempenho de um motor de corrente contínua utilizando materiais magnéticos macios a partir da metalurgia do pó - Franciele Peruchi Ronchi (2015)
	Desenvolvimento de uma máquina síncrona trifásica com ímãs de Nd-Fe-B e núcleo do estator a partir de Fe2%P sinterizado aplicado em aerogerador de 1kW - Felipe Guimarães Ramos (2015)
	Utilização do processo de moldagem por injeção de pós metálicos nanométricos (MIM) para o desenvolvimento de rotor e estator em servomotor aplicado à área médica - Vinicius Martins (2016)

Em razão das grandes vantagens apresentadas pela metalurgia do pó, este trabalho possui como objetivo geral projetar, construir e analisar o funcionamento de uma máquina elétrica síncrona trifásica com ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro que seja aplicável em aerogeradores, onde o núcleo do rotor usualmente construído a partir de chapas de aço baixo carbono ou ferro-silício laminadas será substituído por um novo núcleo produzido a partir de pó de ferro puro sinterizado. São tidos como objetivos específicos do trabalho a revisão do emprego da metalurgia do pó na produção de materiais magnéticos e núcleos de máquinas elétricas rotativas, simulação computacional da máquina projetada, confecção do novo núcleo para o rotor, montagem de um estator com núcleo de chapas inclinadas e a construção de uma bancada de ensaios para máquinas elétricas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A fundamentação teórica é o ponto de partida para a busca de respostas de qualquer trabalho científico. Através de uma revisão da literatura é possível definir o problema, obter uma ideia sobre o atual estado da arte, suas lacunas e as contribuições que estão sendo realizadas para o desenvolvimento do tema. Materiais magnéticos, metalurgia do pó, máquinas elétricas e aerogeradores são os principais tópicos abordados na revisão da literatura para fornecer o conhecimento necessário que permita uma boa compreensão desta pesquisa.

2.1. MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS E DUROS PRODUZIDOS POR METALURGIA DO PÓ

A observação dos fenômenos de interação entre os materiais desperta a curiosidade do ser humano desde os primórdios da humanidade. Os primeiros relatos sobre o magnetismo são muito antigos, sendo atribuída a civilização grega, que observou a atração de pedaços de ferro por uma pedra. A região onde esse evento ocorreu era chamada de Magnésia, localizada na Ásia, dando origem assim ao termo “magnetismo”. Hoje em dia são conhecidos diversos materiais com propriedades magnéticas que estão presentes em diversas aplicações. Eles podem ser encontrados em alto-falantes, disco rígido para computador, equipamento de ressonância magnética, aparelhos de telecomunicação, cartões magnéticos, máquinas elétricas, ímãs, entre outros. (LUZ; ALVARENGA, 2006).

Devido à grande variedade de materiais magnéticos disponíveis surgiu a necessidade de haver uma classificação. Os materiais foram então divididos em dois grupos: macios e duros. Os materiais magnéticos macios têm como principal característica a sua fácil magnetização e desmagnetização, ou seja, conseguem atingir sua magnetização de saturação com a aplicação de um campo relativamente baixo. Possuem também alta permeabilidade inicial e indução de saturação, baixas remanência e coercitividade, além de pequenas perdas de energia por histerese e por correntes de Foucault quando utilizados em fluxos alternados. Encontram principal aplicação em dispositivos que estão sujeitos a campos magnéticos alternados, onde a perda de energia deve ser baixa, como por exemplo, o núcleo de transformadores. Os materiais magnéticos duros apresentam características opostas aos magnéticos macios. Suas principais características são a grande resistência à desmagnetização, baixa permeabilidade inicial e elevadas remanência, coercitividade, densidade do fluxo de saturação e perdas por histerese.

Encontra vastas aplicações na produção ímãs permanentes. (CALLISTER JUNIOR., 2007; CULLITY; GRAHAM, 2009; PELEGRINI, 2012).

A metalurgia do pó é um processo de fabricação muito utilizado para a produção de materiais magnéticos macios e duros. As principais razões de sua utilização estão na possibilidade de obter peças com forma definitiva ou dimensões muito próximas das desejadas, controlar o tamanho do grão e a quantidade de fases que se formam nos contornos de grão, obter isotropia magnética macroscópica por meio da orientação de partículas aleatórias ou anisotropia magnética uniaxial ou multiaxial por intermédio do alinhamento magnético de partículas magnéticas do pó antes das etapas de compactação e sinterização, melhorar a densificação dos componentes, permitir um melhor controle da estequiometria do material, entre outros. Dentre os materiais magnéticos macios produzidos por metalurgia do pó estão armaduras, núcleos de relês, circuitos impressos de computadores, anéis para sensores de freios ABS, solenoides, atuadores, rotores para máquinas elétricas com ímãs e peças estruturais. Os materiais magnéticos duros obtidos por metalurgia do pó podem ser encontrados em ímãs permanentes de alto produto energético, alto-falantes, motores, eletroválvulas e em inúmeras outras aplicações. (CHIAVERINI, 2001; DIAS et al, 2005; GUTFLEISCH et al, 2011; RODRIGUES, 2008; GRUPO SETORIAL DA METALURGIA DO PÓ, 2009; LUNA, 2012).

2.2. APLICAÇÃO DA METALURGIA DO PÓ EM NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

As máquinas elétricas rotativas estão presentes em diversas situações da vida cotidiana. Estas máquinas existem há mais de um século, sendo dispositivos utilizados para conversão da energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. As principais evoluções ocorreram no seu dimensionamento e nas formas de acionamento, ao contrário da estrutura básica que tem permanecido inalterada. O desenvolvimento de programas de elementos finitos possibilitou a simulação de máquinas com diversas configurações de chapas com diferentes ranhuras utilizadas para o estator e o rotor. A descoberta dos circuitos integrados e de novas técnicas de controle vetorial foram fundamentais para a evolução das formas de acionamento das máquinas elétricas. No entanto, as máquinas elétricas passaram por poucos avanços no que diz respeito a utilização de novos materiais na sua implementação. O avanço tecnológico relacionado a topologia das máquinas elétricas ocorreu em maior grau nos modelos síncronos do que nos de indução. As máquinas de indução ainda são encontradas na sua fabricação tradicional enquanto as síncronas apresentam uma grande variação para princípios já consolidados, tais como

utilização de ímãs permanentes com alto poder energético, relutância chaveada, motor de passo, servo motor BLDC, entre outras. (DIAS, 1999; ESSWEIN JUNIOR., 2009).

A fabricação tradicional dos núcleos do rotor e do estator é realizada utilizando como matéria-prima aços elétricos de grão não-orientado. A preferência pelo uso de materiais magnéticos macios em núcleos de máquinas se deve ao fato destes materiais atuarem como eficientes multiplicadores de fluxo, principalmente em equipamentos que funcionam com corrente alternada. A escolha do aço como matéria prima se deve ao fato de ser um material magnético macio com excelentes características mecânicas, possuir propriedades mecânicas semelhantes à do ferro e apresentar um índice de corrosão menor que o ferro. Outra vantagem da utilização do aço está na sua alta permeabilidade, o que maximiza o acoplamento entre as bobinas dos enrolamentos e aumenta a densidade de energia magnética associada com a interação eletromecânica. Entretanto, o aço acaba sendo um ótimo condutor elétrico, favorecendo as perdas por correntes de Foucault. (DIAS, 1999; LANDGRAF, 1999; SCHLICKMANN, 2010; GOLTZ, 2012; FITZGERALD; KINGSLEY JUNIOR; UMANS, 2006).

Para máquinas que exijam melhor desempenho energético, é possível reduzir as correntes de Foucault adicionando silício ao aço. Os aços elétricos de grão não-orientados utilizados para confecção dos núcleos de máquinas elétricas são os modelos ABNT 1006/1008, semi-processado e totalmente processado. O aço ABNT 1006/1008 é o mais utilizado atualmente na fabricação de núcleos. Este material não é produzido para fins eletromagnéticos, mas é largamente empregado devido ao seu baixo custo. Os aços semi-processados podem apresentar um teor de silício de 0,5% e o comprador fica responsável pela realização do tratamento térmico que ocasiona a redução das tensões residuais, decarbonetação e recristalização com grande tamanho de grão final. Os aços totalmente processados possuem um teor de silício superior a 1,5%, são entregues já com baixo teor de carbono e com recozimento final, não necessitando de tratamento térmico. Possuem excelentes propriedades elétricas decorrentes do crescimento dos grãos ocasionado pelo recozimento após a laminação e pelo revestimento superficial característico, estando pronto para o processo de estampagem. (SANTOS, H. 1999; LANDGRAF, 1999, 2002; SANTOS, J. 2005; OLIVEIRA, 2009; FIORILLO, 2010; GOLTZ, 2012).

O processo de fabricação dos núcleos do rotor e do estator compreende as seguintes etapas: laminação das chapas, puncionamento no formato requisitado para o estator e para o rotor, tratamento térmico para isolamento elétrica interlamelar por oxidação e empacotamento para posterior fixação. Estes processos geram custos elevados, além de uma quantidade excessiva

de sobras, em torno de 40%, no momento em que as chapas são puncionadas. Com o intuito de melhorar o aproveitamento de matéria prima, tornando o processo de produção mais sustentável e aumentar a eficiência das máquinas elétricas, a metalurgia do pó surge como alternativa ao processo tradicional de obtenção dos núcleos. O uso dos materiais magnéticos macios por metalurgia do pó encontra promissoras aplicações. Através da formulação de diversas ligas, novos produtos são desenvolvidos para aplicação em máquinas elétricas, visando melhorar fatores que dependem tanto da composição química do material quanto da microestrutura. (DIAS, 1999; BARBOZA, 2009; BITTENCOURT, 2012; CERVA, 2014).

Partindo de matérias primas como o pó de ferro puro ou ligas mais elaboradas que contenham adição de elementos como o níquel, fósforo, silício, cobalto, molibdênio e outros, os núcleos podem ser produzidos em formato de um bloco único. Para a construção dos núcleos, a metalurgia do pó proporciona um melhor controle de propriedades físicas e elétricas que interferem no rendimento das máquinas, como por exemplo, permeabilidade magnética, indução de saturação, conectividade magnética, retentividade e resistividade elétrica. De acordo com a literatura e diversos trabalhos já realizados sobre metalurgia do pó no Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, existem inúmeras maneiras para influenciar positiva ou negativamente determinada propriedade física e/ou elétrica dos materiais. Por exemplo: a adição de silício ao ferro puro favorece o aumento da resistividade elétrica e da permeabilidade magnética e a diminuição da coercitividade e da indução de saturação; os materiais sinterizados apresentam maior resistividade elétrica, grande parte devido a porosidade e oxidação que ocorre na superfície do material; a resistividade elétrica das ligas decresce conforme a densidade do material é aumentada; a partir de pós com elevado grau de pureza é possível alcançar valores de baixa força coercitiva e alta permeabilidade; e outros. (DIAS, 1999; LANDGRAF, 1999; THORSEN; PERSSON, 2004; BARBOZA, 2009; BITTENCOURT, 2012; CERVA, 2014).

Uma evolução da formulação convencional de pós metálicos utilizados para materiais magnéticos macios que está sendo amplamente estudada são os chamamos *Soft Magnetic Composite* (SMC). Este material é composto de partículas metálicas envoltas em uma superfície isolante, mostrada na Figura 3, conferindo assim ao material a propriedade de isotropia. Esta propriedade permite que o fluxo magnético no material seja tridimensional. Outro benefício deste material está na camada isolante utilizada, que ajuda a restringir as correntes de Foucault geradas quando o material é exposto a um campo magnético alternado. (THORSEN; PERSSON, 2004; MEURER, 2005; RODRIGUES, 2008).

Figura 3 - Partícula de *Soft Magnetic Composite*

Fonte: adaptado de THORSEN; PERSSON (2004)

2.3. MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS SÍNCRONAS TRIFÁSICAS COM ÍMÃS PERMANENTES

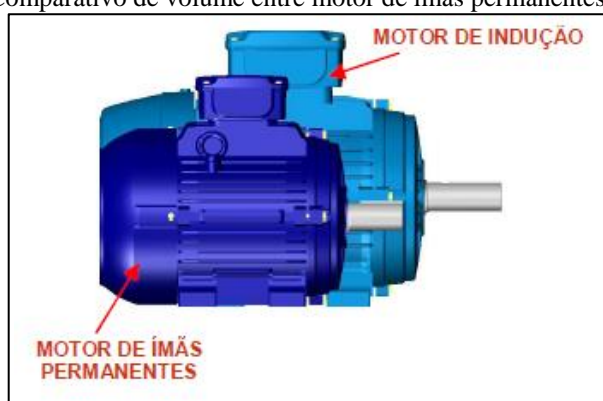
As máquinas elétricas são dispositivos de vital importância nos dias de hoje. Seu uso está em inúmeras aplicações que vão a partir pequenos acionamentos mecânicos até a geração da energia elétrica. A evolução destes equipamentos vem acontecendo dia após dia, o que tem ajudado a popularizar o seu uso. A família das máquinas elétricas atualmente é composta por diversas topologias, que são divididas em categorias como o princípio de conversão de energia, tipo de corrente elétrica utilizada na alimentação, velocidade de rotação do eixo, características construtivas do rotor e do estator, entre outros. O ANEXO A apresenta a classificação dos tipos de máquinas elétricas, destacando o tipo de máquina desenvolvida neste trabalho. (FITZGERALD; KINGSLEY JUNIOR; UMANS, 2006; BIM, 2014)

A classe que compreende as máquinas elétricas rotativas síncronas é uma das que mais evoluiu nos últimos anos graças aos avanços tecnológicos, principalmente nas áreas de ciência dos materiais e eletrônica. A grande maioria das máquinas elétricas síncronas possuem uma particularidade no seu funcionamento: operando no modo motor, ela não é capaz de entrar em operação partindo da inércia, ou seja, não é autossuficiente para produzir torque quando o estator é energizado. Porém, existe uma exceção para esta peculiaridade, que é a configuração onde o rotor possui também uma “gaiola de esquilo” semelhante a que está presente nas máquinas de indução. A inclusão desta gaiola permite que o motor síncrono tenha um torque de partida semelhante ao da máquina de indução. Como gerador, a energia elétrica somente será produzida em uma determinada velocidade de rotação do rotor. Em máquinas mais antigas este fato é explicado pela forma construtiva do rotor, que contém os enrolamentos de campo fixados ao seu redor e que precisavam ser energizados por uma fonte de corrente contínua a fim de produzir eletroímãs. A interação dos eletroímãs do rotor com o campo girante do estator é

responsável pelo funcionamento desta máquina. (NASAR; BOLDEA; UNNEWEHR, 1993; FITZGERALD; KINGSLEY JUNIOR; UMANS, 2006).

A evolução das máquinas síncronas está relacionada com o progresso e descobertas na área de materiais magnéticos. A substituição dos enrolamentos de campo por ímãs permanentes de alto produto energético permitiu significativos avanços para a máquina que hoje é considerada como a que mais apresenta variações de tamanho, forma, geometria e configurações. A utilização dos ímãs permanentes trouxe vantagens como simplificação da tecnologia, redução de aproximadamente 10% do seu volume, eliminação da fonte de alimentação externa, escovas e anéis coletores, desenvolvimento de equipamentos com uma maior relação potência por volume de material, redução de massa e do momento de inércia etc. Os ímãs produzidos com ligas de materiais chamados de terras-raras, como o samário-cobalto e o neodímio-ferro-boro, são os que apresentaram melhores resultados em aplicações que requerem alto desempenho ou que precisem de máquinas leves e compactas. A Figura 4 apresenta um exemplo da redução de volume entre motor de ímãs permanentes e de indução. (NASAR; BOLDEA; UNNEWEHR, 1993; FITZGERALD; KINGSLEY JUNIOR; UMANS, 2006; CUSTÓDIO, 2009; BIM, 2014).

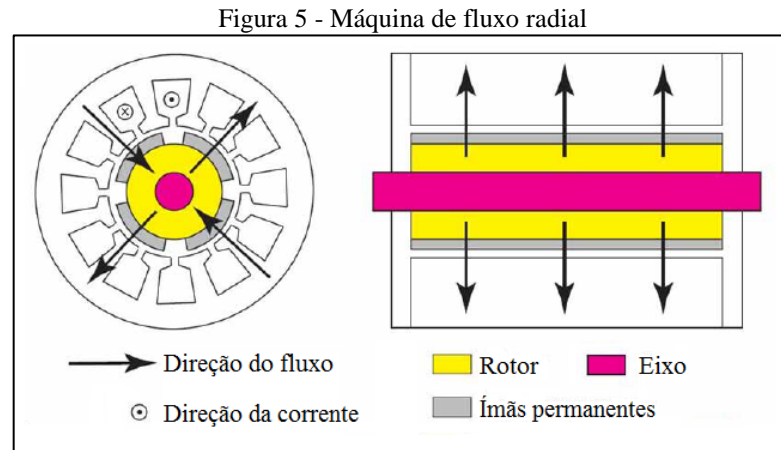
Figura 4 - Comparativo de volume entre motor de ímãs permanentes e de indução



Fonte: WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (2015)

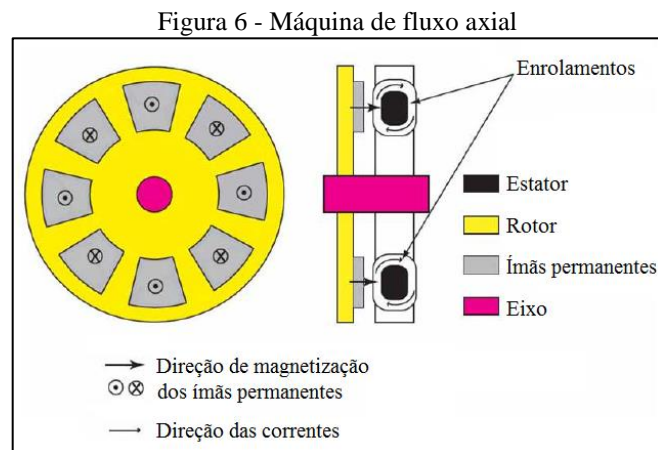
As máquinas síncronas com ímãs permanentes podem ser classificadas conforme a orientação da densidade de fluxo magnético de excitação no entreferro em dois principais tipos: radial e axial. A máquina de fluxo radial, mostrada na Figura 5, possui a direção da densidade do fluxo magnético perpendicular ao eixo do rotor. Os ímãs utilizados possuem magnetização com direção radial e estão localizados na superfície ou no interior do rotor. Estas máquinas apresentam rotores com diâmetros reduzidos e de baixa inércia, baixas perdas e tem o comprimento axial maior em relação ao seu diâmetro. São mais facilmente encontradas no

mercado atualmente devido a sua robustez e fácil construção mecânica. (NASAR; BOLDEA; UNNEWEHR, 1993; MONTEIRO, 2004; CONCERT, 2008; LOUREIRO, 2008; FERREIRA, Â. 2011; MAIA, 2011; OSÓRIO, 2011; AZEVEDO, 2012).



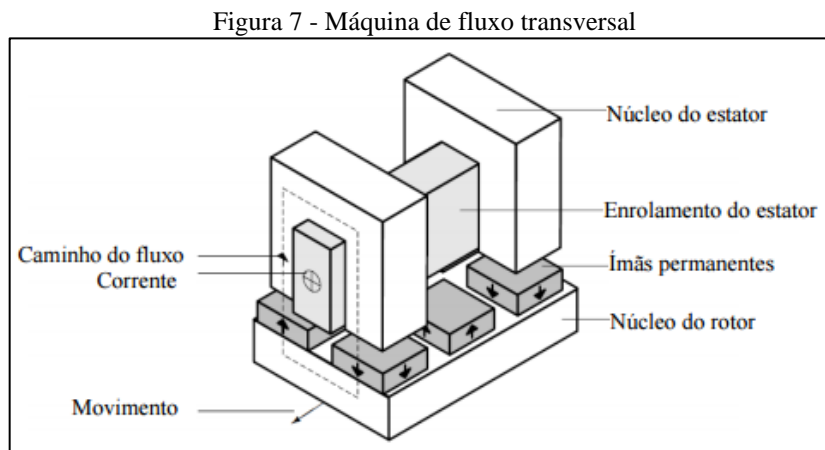
Fonte: MAIA (2011)

As máquinas de fluxo axial possuem a direção da densidade do fluxo de magnético de excitação no entreferro paralela ao eixo de rotação e o entreferro está localizado em um plano perpendicular ao do eixo. A Figura 6 mostra um desenho deste tipo de máquina. Os ímãs empregados nestas máquinas apresentam magnetização axial e são fixados em discos que, dependendo da configuração, podem ser girantes ou estacionários. Estas máquinas são caracterizadas por possuírem uma geometria semelhante a um disco, com diâmetro muito maior que se comprimento longitudinal. É uma excelente alternativa para aplicações que requerem alto torque em baixas velocidades. (NASAR; BOLDEA; UNNEWEHR, 1993; MAIA, 2011; OSÓRIO, 2011; BIM, 2014; RAMOS, F. 2015).



Fonte: MAIA (2011)

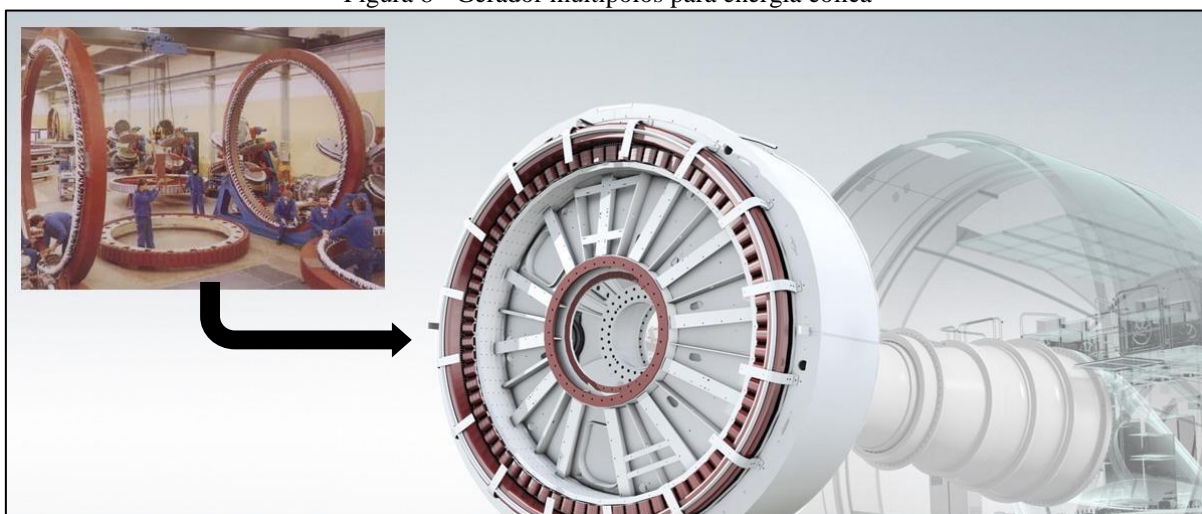
Existe um terceiro tipo de fluxo em máquinas com ímãs permanentes que é o fluxo transversal. Estas máquinas são menos conhecidas que as de fluxo radial e axial, mas vem ganhando considerável atenção nos últimos anos, principalmente devido a sua possibilidade de aplicação em dispositivos aeroespaciais tais como alternadores de velocidade variável e frequência constante. As máquinas de fluxo transversal têm como principais características o maior aproveitamento do fluxo magnético devido a forma como foi projetada, estrutura eletromagnética complexa, enrolamentos anelares, baixo fator de potência, pequenas perdas nos enrolamentos, alta densidade de torque, entre outras. A vantagem das máquinas de fluxo transversal em relação as de fluxo axial e radial está na possibilidade de aumentar o espaço destinado ao enrolamento sem reduzir o espaço para o fluxo principal, o que colabora para a redução das perdas no cobre. A Figura 7 apresenta um exemplo desta topologia. (CONCER, 2008; FERREIRA, Â. 2011; AZEVEDO, 2012; VERDUM, 2013).



Fonte: VERDUM (2013)

A aplicação das máquinas elétricas síncronas com ímãs permanentes é diversificada a cada novo desenvolvimento desta tecnologia. Um exemplo disto está no processo de geração de energia elétrica, onde o consumo cada vez maior de energia exige que a geração seja realizada sempre da forma mais efetiva. Partindo da premissa de obter energia elétrica com o mínimo de perdas possíveis durante a conversão de energia mecânica em elétrica, são realizadas inúmeras pesquisas que tem contribuído para a evolução e aprimoramento dos geradores elétricos. A energia eólica está entre as fontes geradoras que mais crescem, necessitando que seus equipamentos acompanhem este desenvolvimento. A Figura 8 apresenta um gerador para energia eólica utilizado pela empresa Wobben Windpower. (CUSTÓDIO, 2009; WOBLEN WINDPOWER, 2015).

Figura 8 - Gerador multipolos para energia eólica



Fonte: adaptado de DUTRA (2008) e WOBLEN WINDPOWER (2015)

2.4. AEROGERADORES

A utilização da força do vento é uma atividade explorada continuamente pelo homem século após século. Os primeiros registros históricos deste uso remetem às civilizações que habitaram as regiões das antigas Pérsia, Mesopotâmia, Egito e China. Moinhos de vento de eixo vertical foram desenvolvidos com a finalidade de substituir o uso da força humana ou animal no processo de moagem de grãos e elevação da água. A Figura 9 apresenta réplicas dos que são considerados os primeiros moinhos de vento. (CARVALHO, 2003; CUSTÓDIO, 2009; ASSOCIAÇÃO DE POUPANÇA DE ENERGIA DO IRÃ, 2015).

Figura 9 - Réplicas dos primeiros moinhos de vento orientais

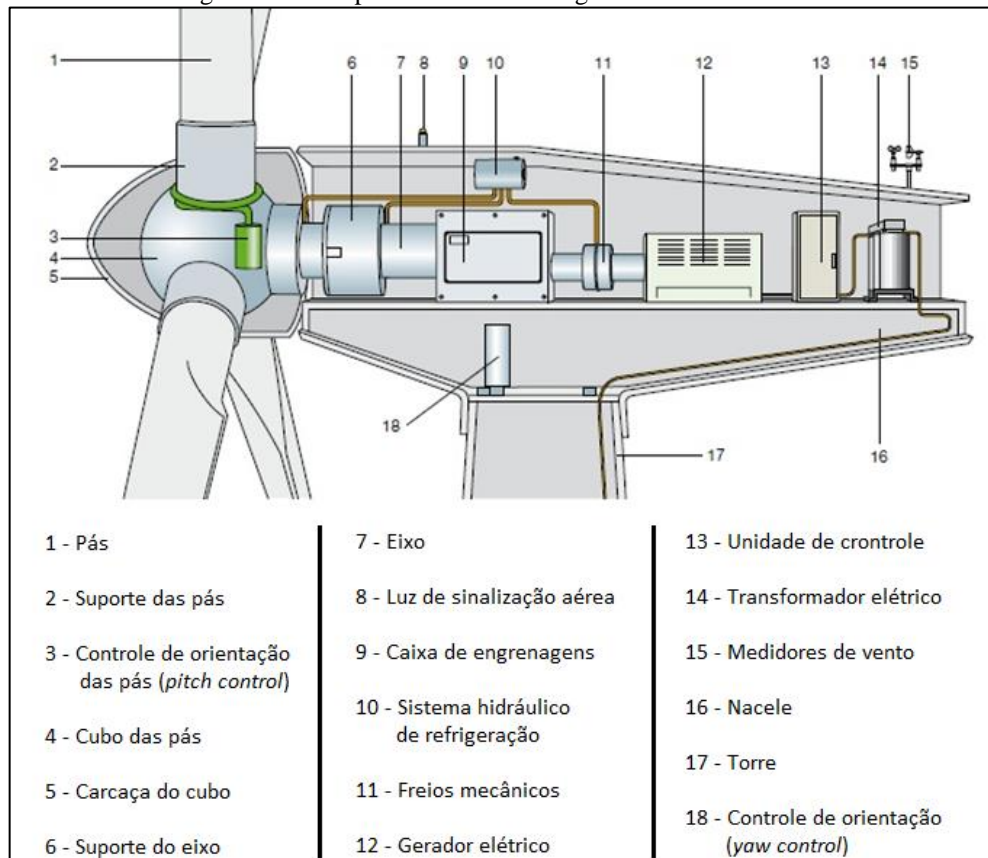


Fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO DE POUPANÇA DE ENERGIA DO IRÃ (2015)

Apesar de os moinhos de vento terem sido concebidos séculos antes, o seu uso chegou a Europa somente após as cruzadas ocorridas entre séculos XI e XIII, onde soldados que retornavam do oriente traziam informações sobre esta tecnologia. A Holanda foi o principal país europeu em que a utilização da energia do vento foi mais difundida, sendo amplamente utilizada para drenagem de terras alagadas, propiciando o desenvolvimento do econômico do país. Com a chegada da revolução industrial, o desenvolvimento da energia elétrica e a invenção dos motores a vapor e de combustão interna, o uso da energia eólica caiu drasticamente em desuso devido aos combustíveis fósseis assumirem o posto de principal fonte de energia primária. A crescente e contínua demanda por energia elétrica com o passar dos anos elevou o consumo de combustíveis fósseis, que estão se encaminhando para um futuro esgotamento. Com isso, as fontes de energias renováveis, principalmente a eólica, passaram a ser vistas como uma alternativa viável na produção de energia elétrica em substituição as atuais fontes não renováveis de combustíveis fósseis. (LE GOURIÉRÈS, 1982; SPERA, 1994; CARVALHO, 2003).

Com o passar do tempo e o aperfeiçoamento das tecnologias os moinhos de vento evoluíram para os modernos aerogeradores e apresentam uma grande diversidade de formas construtivas. Hoje em dia, os aerogeradores podem ser diferenciados de acordo com a força aerodinâmica que incide nas pás (arraste ou sustentação), orientação do eixo de rotação (horizontal ou vertical), caixa de engrenagens (com multiplicador ou acionamento direto), número de pás (uma, duas, três ou multipás), posição das pás em relação à torre (upwind ou downwind), potência (pequena, média ou grande), velocidade do rotor (constante ou variável), controle de potência e velocidade (estol, passo ou estol ativo), local de instalação (on-shore ou off-shore), tipo de gerador elétrico (síncrono ou assíncrono) e outros. Os aerogeradores são compostos por diversos componentes, dispositivos e sistemas tais como pás, cubo das pás, eixo do rotor, nacele, torre, fundações, sistema de mudança de direção, unidades de controle, circuitos eletrônicos, caixa de engrenagem, freio, gerador elétrico, transformador e outros. Algumas modificações podem ocorrer, dependendo dos fabricantes dos equipamentos e do tipo de tecnologia empregada nos dispositivos A Figura 10 mostra, de uma maneira geral, onde estes diversos elementos que integram um aerogerador de eixo horizontal estão dispostos. (CARVALHO, 2003; DUTRA, 2008; CUSTÓDIO, 2009; GAMMAENERGY, 2015).

Figura 10 - Componentes de um aerogerador de eixo vertical



Fonte: adaptado de GAMMAENERGY (2015)

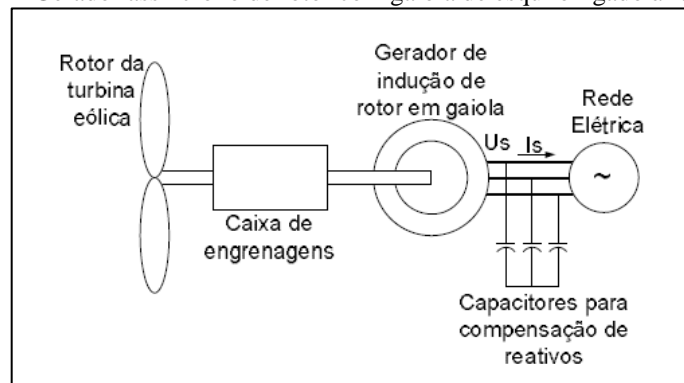
Atualmente os aerogeradores são utilizados em sua grande maioria para a produção de energia elétrica. Seu princípio de funcionamento está baseado na conversão eletromecânica de energia, decorrente do acionamento de um gerador elétrico conectado a turbina eólica. Com as evoluções ocorridas no campo das máquinas elétricas, os geradores passaram a ser uma peça chave no processo de geração de energia. A integração do gerador com o sistema eólico deve receber grande atenção pois o gerador tem de lidar com as variações na velocidade do vento e no torque de entrada, exigência de frequência e tensão constante na energia produzida e, principalmente, necessita ter alta confiabilidade pois muitas vezes o isolamento geográfico do aerogerador dificulta a instalação, operação e manutenções. Atendendo as diferentes configurações de modelo, potência requerida e condições de uso dos aerogeradores, os principais tipos de geradores utilizados são: assíncrono com gaiola de esquilo, assíncrono de dupla excitação, síncrono de rotor bobinado e síncrono de ímãs permanentes. (MARQUES, 2004; PEREIRA, 2004; DUTRA, 2008; CUSTÓDIO, 2009; JARDIM, 2014).

O gerador assíncrono é o modelo mais comumente encontrado em parques eólicos, podendo ser conectado à rede diretamente ou através de conversores de frequência. Possui vantagens como a simples montagem, baixo preço, pouca manutenção, fácil operação e elevada

robustez. O principal ponto negativo está no fato de apresentar altas correntes de partida. As primeiras instalações eólicas usavam geradores assíncronos com gaiola de esquilo conectados diretamente à rede. Neste tipo de ligação a velocidade do gerador é quase constante, sendo um inconveniente porque o aerogerador terá seu desempenho aerodinâmico prejudicado. Com a rotação quase constante será possível em somente uma determinada velocidade do vento ter o seu melhor desempenho. Esta configuração não permite que o aerogerador se adapte as diferentes velocidades de vento. (CARVALHO, 2003; PEREIRA, 2004; DUTRA, 2008; CUSTÓDIO, 2009; RAMOS, E. et al, 2014).

Buscando resolver este problema foram desenvolvidas novas técnicas que permitissem ao aerogerador trabalhar no sistema de velocidade variável, maximizando o aproveitamento da energia do vento. A realização desta tarefa pode ser feita com o uso de um conversor de frequência eletrônico, composto por um conjunto retificador/inversor. O gerador assíncrono com gaiola de esquilo pode ser usado na configuração de velocidade variável a partir do uso do conversor de frequência e da instalação de capacitores antes do retificador. Na Figura 11 é possível ver como é realizada a conexão com a rede deste modelo de gerador. (CARVALHO, 2003; MARQUES, 2004; PEREIRA, 2004; DUTRA, 2008; FERREIRA, J. 2009; SILVA, 2009; ROSA; BOLSON; MORAES, 2013; JARDIM, 2014; RAMOS, E. et al, 2014).

Figura 11 - Gerador assíncrono de rotor com gaiola de esquilo ligado à rede elétrica

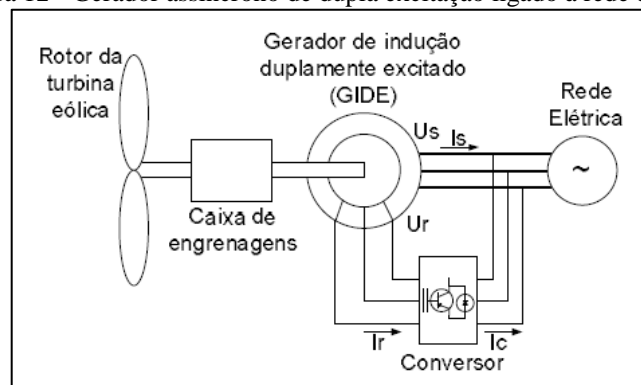


Fonte: PEREIRA (2004)

Uma outra configuração do gerador assíncrono que ganhou espaço nas novas instalações eólicas de velocidade variável é o modelo de dupla excitação. Nesta topologia o estator é conectado diretamente à rede e o rotor é conectado à rede através de um conversor de frequência responsável pelo controle da velocidade da máquina. A Figura 12 apresenta como é realizada a conexão entre o gerador síncrono de dupla excitação e a rede elétrica. A potência elétrica pode ser obtida tanto pelo estator quanto pelo rotor, dependendo da velocidade do vento. O gerador duplamente excitado tem como pontos fortes o desacoplamento da frequência de geração da

frequência da rede, alta eficiência do sistema devido à diminuição das perdas no conversor, utilização de conversores de potência reduzida (em torno de 25% da potência total do sistema) e baixo custo dos equipamentos de eletrônica de potência e filtros. Por outro lado, apresenta como pontos fracos a necessidade do uso de escovas coletoras para a conexão dos enrolamentos do rotor com o conversor, o que exige manutenções periódicas e diminui a confiabilidade deste gerador, necessidade de caixas de engrenagens e a dependência de operação do sistema de acordo com as características da rede. (CARVALHO, 2003; MARQUES, 2004; PEREIRA, 2004; DUTRA, 2008; FERREIRA, J. 2009; SILVA, 2009; ROSA; BOLSON; MORAES, 2013; JARDIM, 2014; RAMOS, E. et al, 2014).

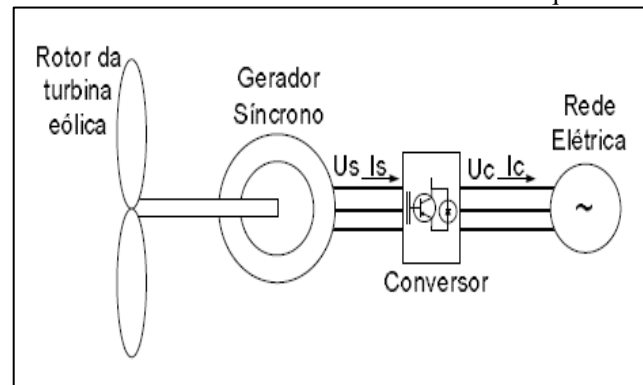
Figura 12 - Gerador assíncrono de dupla excitação ligado à rede elétrica



Fonte: PEREIRA (2004)

O terceiro tipo de gerador mais empregado em parques eólicos é o modelo síncrono de rotor bobinado. Ele possui uma grande semelhança com o gerador assíncrono, pois pode ser utilizado tanto em aerogeradores com velocidade constante quanto variável e sua ligação com a rede elétrica pode ser realizada de forma direta ou através de conversor de frequência. Para a conexão direta com a rede, a turbina eólica deverá ser de velocidade constante em razão de que a frequência gerada será ajustada conforme a da rede. Este fato é um inconveniente porque em somente uma única velocidade de vento a potência extraída será máxima. A solução para este problema é a instalação de conversores de frequência, a fim de que o gerador possa trabalhar com velocidade variável, como pode ser visto na Figura 13, onde o esquema de ligação do gerador à rede elétrica é mostrado. (CARVALHO, 2003; MARQUES, 2004; PEREIRA, 2004; DUTRA, 2008).

Figura 13 - Gerador síncrono de rotor bobinado com conversor de frequência ligado à rede elétrica



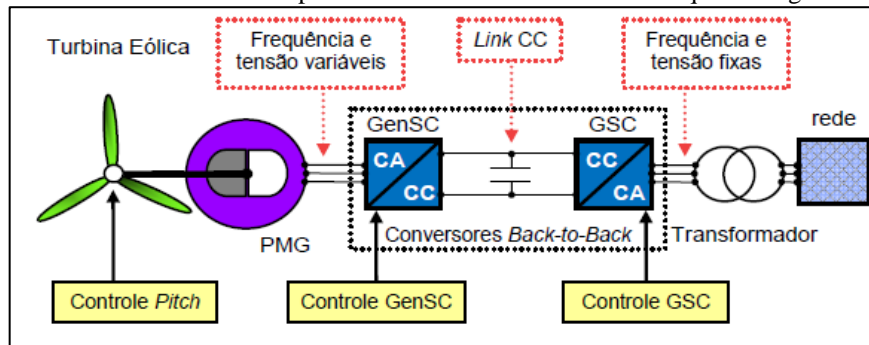
Fonte: PEREIRA (2004)

A ligação com a rede através de conversores de frequência produzirá uma energia elétrica constante e sincronizada com o sistema elétrico. Os pontos positivos deste gerador são a elevada potência nominal, possibilidade de ser construído com um número grande de polos resultando em uma máquina de baixa rotação que dispensa o uso da caixa de engrenagens e com isso a diminuição de manutenções, custos e perdas no torque mecânico, conexão com a rede elétrica realizada de maneira mais suave devido ao uso de conversores de frequência, produção de energia elétrica de melhor qualidade, entre outros. Em contrapartida, o gerador síncrono de rotor bobinado possui desvantagens como geração de harmônicas associadas à conversão de frequência, necessidade de ser sincronizado com a rede antes de ser ligado à mesma, um número grande de polos necessita de um grande diâmetro que resulta em aumento significativo no peso do gerador e conseqüentemente aumenta a dificuldade de instalação do gerador no topo da torre, necessidade de um conversor adicional para a excitação do gerador, entre outras. (CARVALHO, 2003; PEREIRA, 2004; DUTRA, 2008; CUSTÓDIO, 2009).

Uma modificação ocorrida com o gerador síncrono de rotor bobinado e que tem evoluído com o tempo é a substituição dos enrolamentos do rotor por ímãs permanentes. Este fato representou um grande avanço, melhorando o desempenho do gerador através da diminuição de perdas e eliminação de alguns componentes que comprometiam o seu rendimento. Os progressos obtidos na área de materiais magnéticos, nos quais se destacam os materiais terras-raras, incentivam o desenvolvimento de geradores síncronos com ímãs permanentes, permitindo o projeto de máquinas com grande quantidade de polos magnéticos, menor momento de inércia e alta relação potência por unidade de volume. Vantagens ímpares estão relacionadas a utilização dos ímãs permanentes, entre elas: eliminação do circuito externo de excitação, anéis coletores e escovas, eliminação das perdas no enrolamento do núcleo do rotor, redução no tamanho da máquina, diversificação da topologia dos ímãs permanentes

etc. A Figura 14 apresenta um exemplo de como é realizada a ligação de um gerador síncrono de ímãs permanentes com a rede elétrica. (PINHEIRO, 2004; SALLES, 2009; JARDIM, 2014).

Figura 14 - Gerador síncrono de ímãs permanentes e com conversor de frequência ligado à rede elétrica



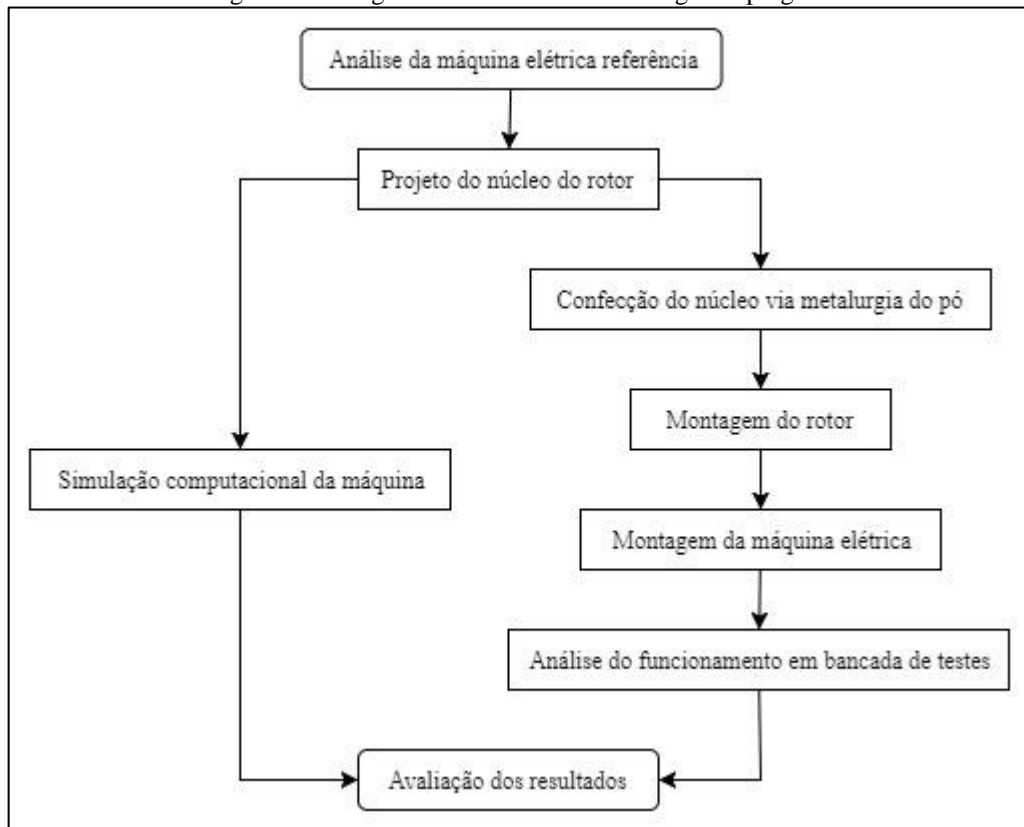
Fonte: SALLES (2009)

Não existe um consenso sobre qual gerador elétrico é melhor para equipar os modernos aerogeradores, afinal são muitas as vantagens e desvantagens de cada modelo. A escolha do tipo de gerador não é algo simples pois envolve diversos aspectos que devem ser levados em consideração como custos, peso, qualidade da energia, manutenção, potência, confiabilidade, local da instalação e outros. O que atualmente é consenso e tem predominado nos novos projetos de instalações eólicas é o uso de aerogeradores com velocidade variável. (CARVALHO, 2003; MARQUES, 2004; PEREIRA, 2004; DUTRA, 2008; CUSTÓDIO, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Ao desenvolver este estudo, foi formulada uma pergunta sobre a possibilidade da utilização da metalurgia do pó para fabricação do núcleo de máquinas elétricas. Na literatura científica não foram encontradas respostas satisfatórias e então foi elaborada uma hipótese e realizada uma pesquisa para testá-la. Os materiais e métodos utilizados são descritos de maneira que facilitem a compreensão dos resultados encontrados no final. A Figura 15 apresenta o planejamento de execução do trabalho.

Figura 15 - Diagrama de bloco da metodologia empregada



3.1. MÁQUINA ELÉTRICA USADA COMO REFERÊNCIA

O ponto de partida para o desenvolvimento da máquina elétrica síncrona idealizada nesta pesquisa foi um motor de indução modelo VTOP, fabricado pela empresa Grupo Voges. As máquinas elétricas VTOP foram projetadas para atender a lei de eficiência energética nº 10.925/2001 (portaria 533 de 08 de dezembro de 2005) que dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia. O projeto destas máquinas contou com diversos aperfeiçoamentos tecnológicos tais como a otimização do projeto eletromagnético visando

obter melhor desempenho e eficiência através da utilização de materiais de baixa perda magnética, alta condutividade elétrica e sistema de isolamento com excelente rigidez dielétrica, aprimoramento do sistema de ventilação através de uma melhor distribuição do fluxo de ar sobre a máquina mantendo a melhor relação entre fluxo de ar e ruído, carcaça reprojeta de acordo com os mais elevados padrões de tecnologia em processos de fundição, mancais superdimensionados e lubrificados com graxa de alta performance, entre outras. O somatório destas significativas melhorias implementadas neste modelo de máquina elétrica resultou em um equipamento com baixo consumo de energia, alta eficiência energética e alto rendimento. As principais informações da máquina são listadas na Tabela 1, enquanto informações técnicas mais específicas podem ser encontradas nos ANEXOS B, C e D. (RECH, 2009; VOGES MOTORES, 2010).

Tabela 1 - Características gerais da máquina elétrica empregada neste trabalho

Especificações	Parâmetros
Fabricante	Grupo Voges
Modelo	VTOP
Carcaça	132S
Forma construtiva	B34D
Frequência [Hz]	60
Número de polos	4
Tensão [V]	220
Potência [kW]	7,5
Rotação nominal [rpm]	1760
Escorregamento [%]	2,2

Fonte: Voges motores (2015)

As características construtivas dos núcleos do estator e do rotor da máquina VTOP merecem destaque, em virtude de serem alvos de modificações propostas nesta pesquisa. 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. Os materiais isolantes e os fios utilizados nos enrolamentos enquadram-se nas classes de isolamento estabelecidas pela norma ABNT NBR 17094-1: B (130 °C), F (155 °C) ou H (180 °C). Os estatores bobinados

são duplamente impregnados com verniz isolante classe H, sendo polimerizados em equipamento adequado, conferindo aos enrolamentos elevada resistência mecânica, alta rigidez dielétrica, proteção à abrasão, melhor transmissão de calor, bem como resistência a vibrações e ciclos térmicos. O núcleo do estator possui diâmetro interno de 138mm, diâmetro externo de 210mm e comprimento de 148mm. O rotor da máquina é do tipo gaiola de esquilo, sendo composto por lâminas, gaiola e eixo. As lâminas que formam o núcleo têm como matéria prima chapas de aço baixo carbono ou aço silício e são produzidas a partir de um processo de estampagem com ferramentas progressivas de alta precisão. O rotor possui 137,20mm de diâmetro e 192mm de comprimento. O eixo é fabricado em aço SAE 1045 através dos processos de usinagem e retificação. Após a união das três partes que compõem o rotor, o conjunto é balanceado dinamicamente dando origem a uma peça rígida e compacta. (VOGES MOTORES, 2010).

3.2. PÓ DE FERRO PURO

A matéria prima que será utilizada para fabricação do núcleo do rotor é o pó de ferro puro modelo ASC100.29, produzido pela empresa Höganäs Brasil. Conforme o fabricante, a principal característica deste pó é a alta compressibilidade, permitindo a obtenção de compactados com densidade até 7,2 g/cm³ com uma única compactação. Possui uma relação de compressão de aproximadamente 2:1, ou seja, a peça após a compactação terá metade da altura que foi preenchida com pó. Sua utilização é recomendada para peças estruturais de alta densidade e também como material base para aplicações magnéticas. A Tabela 2 apresenta algumas características do pó. (HÖGANÄS AB, 2013)

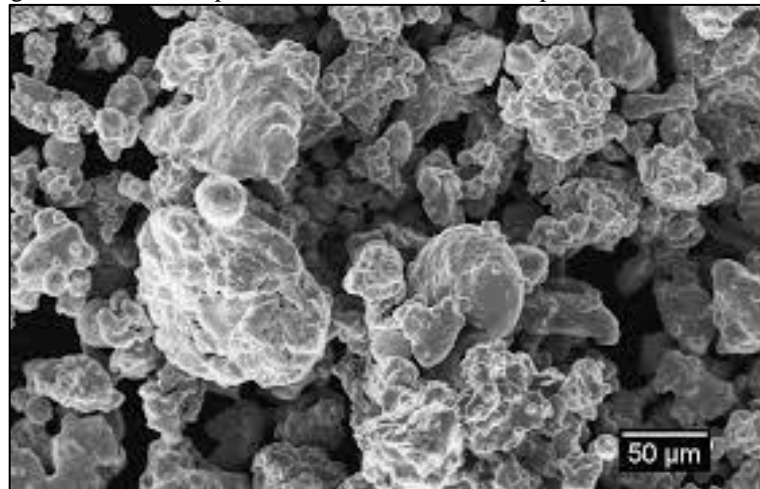
Tabela 2 - Propriedades pó de ferro ASC100.29

Propriedades	Valores
Granulometria [μm]	20 - 180
Densidade aparente [g/cm^3]	2,95
Escoamento [s/50g]	24
Densidade a verde (compactado a 600 MPa em matriz lubrificada) [g/cm^3]	7,2
Resistência a verde (compactado a 600 MPa em matriz lubrificada) [MPa]	41

Fonte: Höganäs AB (2013)

As propriedades metalúrgicas, geométricas e mecânicas do pó são decorrentes e específicas do processo empregado na sua produção e estão inter-relacionadas umas com as outras. O pó de ferro ASC100.29 produzido pela Höganäs é obtido através do processo de atomização por água. O formato das partículas dos pós atomizados a água é, muitas vezes, relacionado com as taxas relativas de resfriamento e da esferoidização das gotículas do metal líquido. A Figura 16 mostra a imagem da microestrutura do pó obtida através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

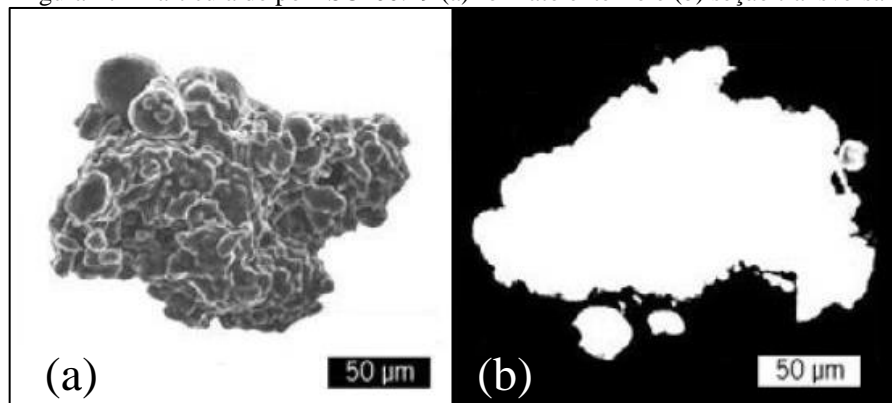
Figura 16 - Microscopia eletrônica de varredura do pó de ferro ASC100.29



Fonte: BUREŠ et al (2011)

As características mais relevantes que diferem um pó atomizado de um pó obtido por outro método são o formato das partículas e a densidade. O processo de atomização por água possui um custo moderado e gera partículas com estrutura externa irregular e uma estrutura interna compacta. Figura 17 mostra o formato externo de uma única partícula analisada por MEV e a sua seção transversal analisada por ensaio metalográfico.

Figura 17 - Partícula de pó ASC100.29 (a) formato externo e (b) seção transversal



Fonte: adaptado de HÖGANÄS AB (2013)

3.3. METALURGIA DO PÓ

As peças que formarão o novo núcleo do rotor serão obtidas através do processo de metalurgia do pó convencional. Este processo é composto por três etapas principais: mistura, compactação e sinterização. A operação de mistura consiste em obter uma homogeneização dos pós que irão compor o sinterizado. Nesta pesquisa será realizada a mistura de um componente metálico (ferro puro) e um lubrificante. A adição de um lubrificante sólido ao pó de ferro puro tem como objetivo reduzir o atrito entre as próprias partículas do pó de ferro e entre os componentes da matriz e a mistura durante a compactação. O lubrificante escolhido para ser usado é o estearato de zinco. Ele não altera a composição química do pó de ferro e possui baixo ponto de fusão (120°C), o que facilita sua remoção na etapa de sinterização. A quantidade de lubrificante adicionada será referente ao valor de 1% em peso do pó de ferro. Com o auxílio de um misturador tipo “V” os componentes serão misturados por um tempo de 30 minutos, visando a maior homogeneização possível entre os pós para um melhor resultado durante a compactação das peças.

Com a matéria prima devidamente misturada, será realizada a etapa de compactação. Este é o primeiro processo de consolidação da metalurgia do pó, que será concluído com a sinterização das peças. O principal objetivo da compactação é conformar o pó na forma que foi projetada. Para esta finalidade, o Laboratório de Transformação Mecânica dispõe de diversas prensas, entre elas uma prensa hidráulica de ação simples modelo PH 600, fabricada pela empresa FKL Máquinas Hidráulicas. Esta prensa consegue atingir uma força de compactação máxima de 5.884kN. Recentemente esta máquina passou por um processo de modernização, onde foram incorporadas melhorias como novas tecnologias nas instalações elétricas, instalação de uma interface homem-máquina com tela sensível ao toque e modernização dos sistemas de segurança, entre outras. A Tabela 3 apresenta outras especificações da prensa.

Tabela 3 - Especificações da prensa hidráulica

Especificações	Parâmetros
Ano de fabricação	1987
Número de série	435
Tensão [V]	380
Máxima força de compactação [kN]	5.884
Curso [mm]	600

Fonte: FKL Máquinas Hidráulicas (2015)

A última etapa no processo de obtenção de peças via metalurgia do pó é a sinterização. Esta operação completa o ciclo de consolidação dos pós metálicos, conferindo as peças a devida resistência mecânica. Ela ocorre a partir do aquecimento das peças compactadas a elevadas temperaturas (porém abaixo do ponto de fusão do metal base) sob condições controladas de temperatura, tempo e atmosfera. Em virtude das grandes proporções das peças, este processo será realizado em uma empresa especializada em sinterização de peças especiais. Será usado um forno do tipo esteira contínua dotado de zonas distintas de aquecimento com diferentes temperaturas, que variam entre 450 e 1.150°C, além de atmosfera controlada.

3.4. ESTATOR

O estator que será utilizado nesta pesquisa foi montado com alterações na sua forma construtiva. Ele foi reprojeto para que apresente um melhor desempenho quando utilizado em conjunto com um rotor de ímãs permanentes. O tradicional pacote de chapas usado para a montagem do núcleo foi mantido o mesmo, porém, houve uma alteração na forma como estas chapas são normalmente dispostas no interior da carcaça.

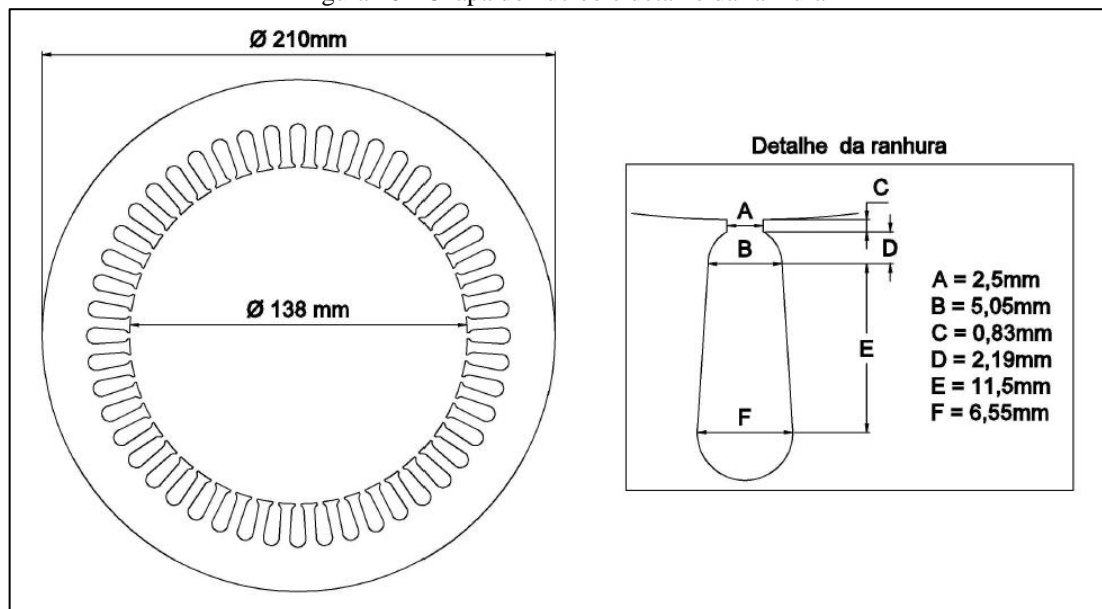
A montagem do pacote de chapas foi realizada em uma carcaça modelo 132S, usada nas máquinas VTOP da empresa Grupo Voges. A principal diferença deste estator em relação ao estator da máquina usada como referência está na forma como foi realizada a montagem do seu núcleo. A forma tradicional como o pacote de chapas é montado na carcaça faz com que as ranhuras sejam alinhadas paralelas entre si. No entanto, para este novo estator o núcleo foi montado de maneira que as ranhuras apresentem um ângulo de inclinação de 10°. Esta inclinação é necessária para reduzir variações bruscas de relutância magnética. A Tabela 4 apresenta os parâmetros do pacote de chapas utilizado.

Tabela 4 - Especificações do pacote de chapas

Especificações	Valor
Número de chapas	320
Diâmetro interno do disco [mm]	138
Diâmetro externo do disco [mm]	210
Comprimento [mm]	148
Número de ranhuras	48
Inclinação das ranhuras	10°

A Figura 18 - Figura 18 mostra o desenho de um dos discos que compõem o pacote de chapas do núcleo e um detalhe com as dimensões de uma das ranhuras do disco.

Figura 18 - Chapa do núcleo e detalhe da ranhura



Os trabalhos de montagem, inclinação, soldagem do pacote de chapas e bobinamento foram realizados por uma empresa especializada. A Tabela 5 apresenta as especificações utilizadas para o bobinamento, fornecidas pela empresa após a realização do serviço.

Tabela 5 - Especificações do bobinamento

Especificações	Valor
Tensão [V]	127/220
Passo	1:10:12
Ligação	2Y
Número de espiras/bobina	16
Bobinas/grupo	2
Grupos/fase	4
Número de bobinas	12
Número de fios paralelos	3
Fio nu [AWG]	2x20 + 1x19
Peso de cobre [kg]	4,20
Classe de isolamento	H

O estator bobinado e os detalhes das ranhuras montadas inclinadas podem ser vistos na Figura 19.

Figura 19 - Estator finalizado



4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

A máquina elétrica desenvolvida nesta pesquisa apresenta alterações na forma construtiva do rotor e do estator. O novo rotor proposto possui duas modificações: a primeira ocorreu no núcleo, que atualmente é confeccionado com um pacote de chapas laminadas de aço e foi substituído por um outro núcleo projetado e produzido com o uso da metalurgia do pó. A segunda modificação foi proposta de maneira a complementar a primeira. Foi realizada a substituição da gaiola por ímãs permanentes de alto produto energético.

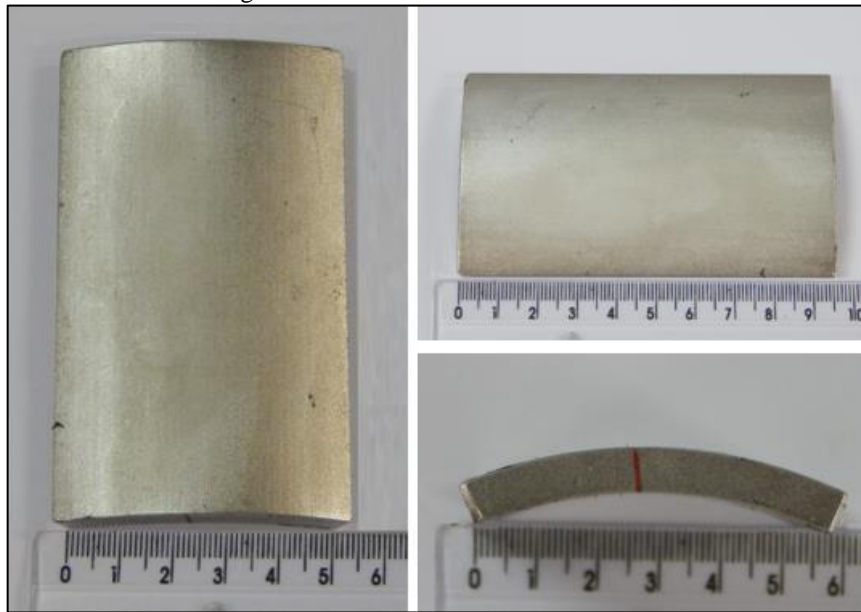
4.1. ROTOR

O novo rotor com núcleo produzido a partir da metalurgia do pó e ímãs de NdFeB foi desenvolvido baseado no modelo de rotor existente da máquina VTOP fabricada pela empresa Grupo Voges. As medidas do diâmetro e do comprimento do núcleo foram definidas com valores praticamente iguais às do rotor de referência. Para a fabricação do núcleo foi realizado um projeto onde foi definida a sua geometria. As demais peças utilizadas, como o eixo e os rolamentos, são dos mesmos modelos que os usados na fabricação do rotor original da máquina elétrica utilizada como referência e foram adquiridos diretamente do Grupo Voges.

4.1.1. Ímãs de Neodímio-Ferro-Boro

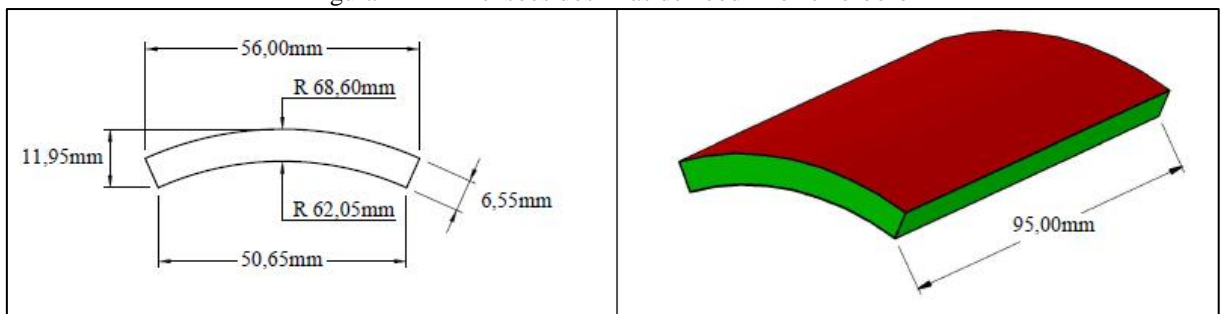
Os ímãs utilizados no desenvolvimento do novo rotor são ímãs compostos por uma liga metálica de Neodímio (Nd), Ferro (Fe) e Boro (B). Esta famosa liga de materiais terras-raras vem ganhando espaço cada vez maior na produção dos chamados “super ímãs”. A estrutura $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ confere aos ímãs inúmeras vantagens como elevada dificuldade de ser desmagnetizado, alto potencial de armazenar grandes quantidades de energia magnética, excelente relação volume x produto energético (onde peças com pequenas dimensões apresentam elevados valores de produto energético), entre outras. A Figura 20 apresenta um dos ímãs de NdFeB utilizado para compor o rotor.

Figura 20 - Ímã de Neodímio-Ferro-Boro



As principais características dos ímãs de NdFeB, tais como comprimento, espessura, curvatura e magnetização, foram definidas em uma pesquisa anterior por Cerva (2014) e comprados sob encomenda de um fabricante chinês. Isto foi necessário em virtude da liga de NdFeB ser muito dura e frágil, o que dificulta a sua usinagem e requer um ferramental especial. Além disto existem restrições durante o processo de usinagem quanto ao calor gerado que pode influenciar na desmagnetização do ímã e o pó produzido que possui característica pirofórico. Estes ímãs possuem magnetização bipolar axial e um revestimento externo de níquel para evitar oxidação. O desenho com as dimensões dos ímãs é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Dimensões dos ímãs de neodímio-ferro-boro

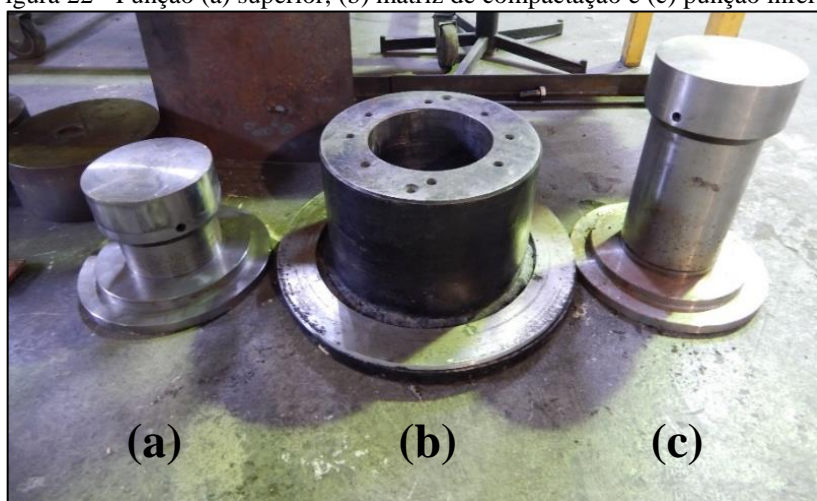


4.1.2. Projeto do núcleo

A confecção do núcleo utilizando o processo de metalurgia do pó levou em consideração a análise da viabilidade de obtenção da peça. Partindo de uma definição preliminar das

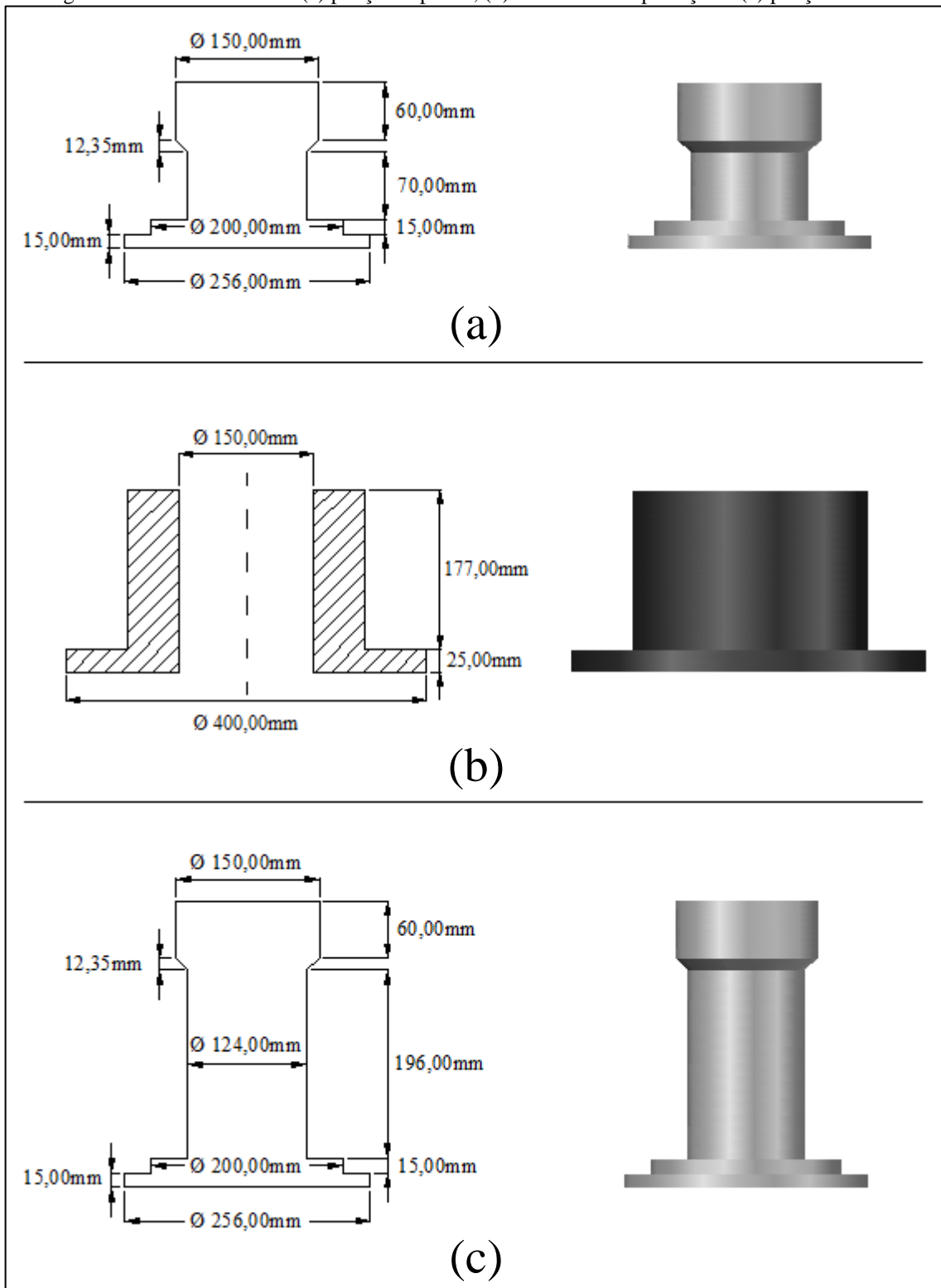
dimensões do núcleo foi avaliado o ferramental que seria necessário para compactar a peça. O objetivo inicial era obter o núcleo a partir da compactação de uma peça única e com o formato final mais próximo do desejado. Entretanto, o processo de compactação para peças grandes e/ou com geometria complexa envolve a necessidade da utilização de uma matriz projetada exclusivamente para esta finalidade e também o uso de uma prensa de compactação com capacidade elevada. Foi localizada na oficina do Laboratório de Transformação Mecânica uma matriz de grande porte, que permitia a compactação de peças cilíndricas maciças com diâmetro superior ao desejado, mostrada na Figura 22.

Figura 22 - Punção (a) superior, (b) matriz de compactação e (c) punção inferior



Por se tratar da produção de peças em escala laboratorial, optou-se por realizar o processo de compactação com esta matriz. A peculiaridade de cada peça é um fator relevante que deve ser considerado na hora do projeto. Embora a metalurgia do pó permita a obtenção de peças com o formato e dimensões muito próximos as definitivas, algumas vezes é necessário recorrer ao uso de operações complementares visando a melhora de propriedades mecânicas, tolerâncias dimensionais e acabamento superficial. As peças compactadas com esta matriz necessitam passar por uma etapa de usinagem para ajuste de diâmetro, furação para o eixo do rotor, fresagem dos rebaixos para os ímãs de NdFeB e, por fim, realizar o acabamento superficial das peças. A Figura 23 mostra um desenho técnico com as dimensões da matriz e dos punções.

Figura 23 - Desenho técnico (a) punção superior, (b) matriz de compactação e (c) punção inferior

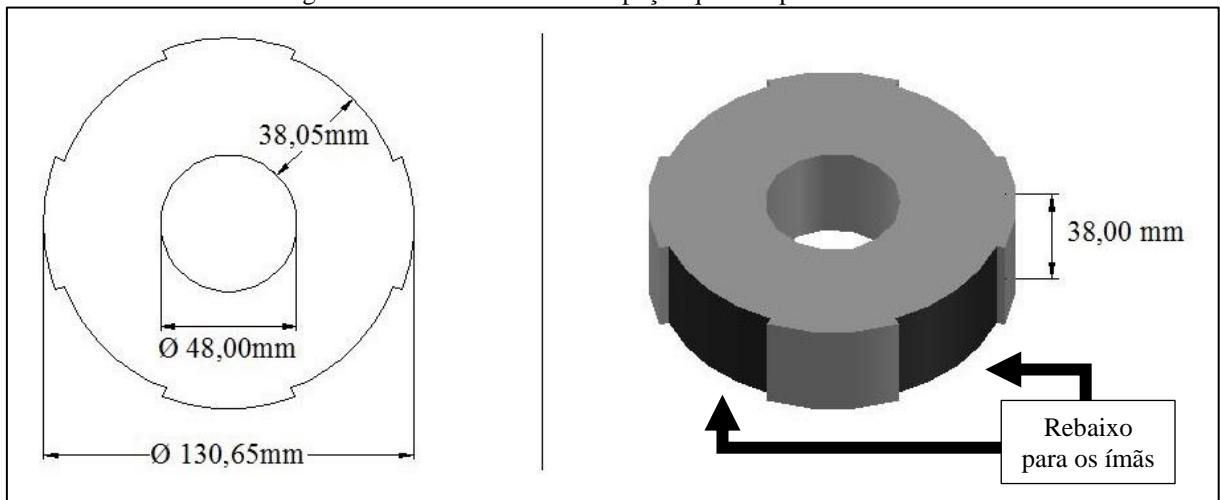


A ideia inicial de compactação do núcleo em bloco único foi inviabilizada devido a dois fatores: profundidade da cavidade da matriz escolhida e força de extração necessária para retirar a peça de dentro da matriz. A altura de uma peça produzida por metalurgia do pó deve levar em consideração a relação de compressão do pó metálico. O pó de ferro puro possui uma relação

de compressão de aproximadamente 2:1, ou seja, a profundidade de enchimento com pó solto no interior da cavidade da matriz deve possuir, no mínimo, o dobro da altura final desejada para a peça. Para evitar problemas de desalinhamento dos punções durante a aplicação da pressão de compactação, estes devem estar parcialmente inseridos na cavidade da matriz. O comprimento final desejado para a peça do núcleo possui valor muito próximo a profundidade da cavidade da matriz escolhida. Desta maneira o posicionamento dos punções no interior da matriz fica prejudicado e a compactação nesta situação, por questões de segurança, não é recomendada. O segundo motivo que inviabilizou a compactação de uma peça única foi a força necessária para extração da peça após a compactação. O atrito criado entre uma peça grande e a parede da matriz durante a extração necessitaria que a prensa exercesse uma força muito elevada. Diante destes empecilhos, a solução adotada foi a compactação de peças com menor altura para que juntas componham o núcleo.

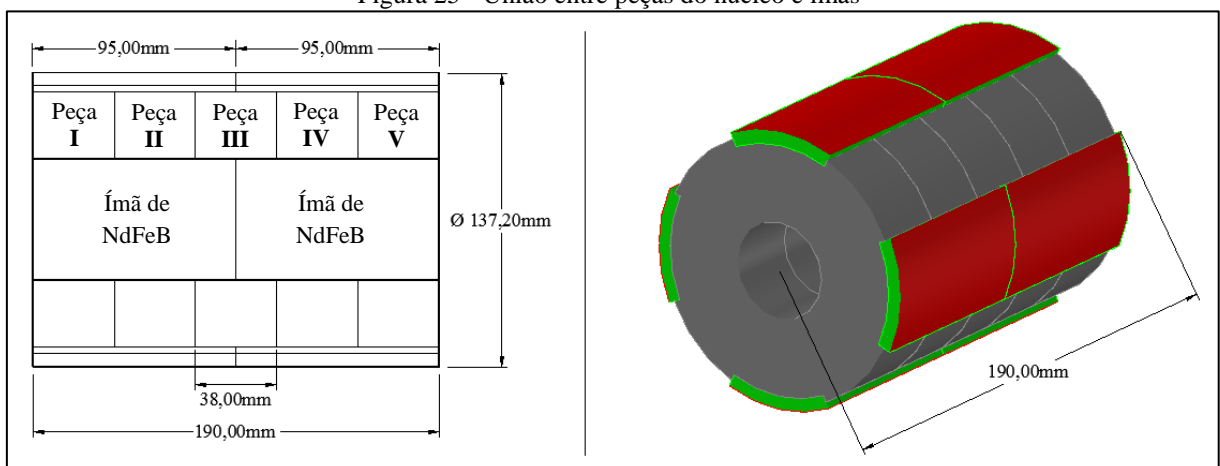
O projeto do núcleo foi modificado conforme as restrições citadas anteriormente e tomando como ponto de partida as dimensões dos ímãs de NdFeB. Como a usinagem dos ímãs não é um processo simples, estes não tiveram suas dimensões alteradas. Partindo do valor final desejado para as dimensões do rotor e utilizando a estratégia de engenharia reversa, chegou-se nas medidas das peças do núcleo. Para formar os polos magnéticos no rotor foram utilizados quatro pares de ímãs. Sendo assim, o comprimento do núcleo ficou limitado em 190,00mm, equivalente ao somatório do comprimento de dois ímãs. Uma vez que o núcleo não poderá ser composto por uma peça única, ele foi dividido em cinco partes iguais, cada uma com 38,00mm de espessura, para facilitar a usinagem. O furo central das peças possui ajuste com interferência de 1,00mm e foi estabelecido a partir do diâmetro do eixo utilizado. Desta maneira, o eixo foi introduzido nas peças compactadas sob pressão, o que garantiu uma significativa fixação entre as partes. O diâmetro externo definido para novo rotor foi de 137,20mm, mesmo valor do diâmetro do rotor de chapas. Determinada esta dimensão, empregou-se novamente o método de engenharia reversa para calcular o diâmetro externo das peças do núcleo. Descontando a espessura dos ímãs utilizados do diâmetro externo final desejado, chegou-se a um valor de 130,65mm para as peças. O desenho da geometria projetada das peças do núcleo é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Geometria final das peças que compõem o núcleo



Os rebaixos para os ímãs foram definidos com profundidade igual a metade da altura dos ímãs e possuem uma grande importância na topologia do rotor por dois motivos. Primeiro, facilitam o encaixe e a colagem entre as peças do núcleo e os ímãs, garantindo assim um correto espaçamento equidistante entre os ímãs na superfície do rotor. Segundo, ao se introduzir os ímãs até a metade da sua altura, todo o fluxo magnético produzido pelo polo do ímã é direcionado para o núcleo e não fica disperso pelo próprio ímã. A Figura 25 apresenta um desenho do projeto final da união entre todas as peças do núcleo e os ímãs.

Figura 25 - União entre peças do núcleo e ímãs



4.1.3. Produção do núcleo do rotor através da metalurgia do pó

O primeiro passo para a compactação foi a definição da força de compactação (F) que seria utilizada na prensa. Esta força de compactação (F) é calculada através da equação (1), a qual relaciona a área da peça que será compactada (A_c) com a pressão de compactação (P)

desejada. Analisando a curva de compressibilidade do pó de ferro puro é possível notar que o pó atinge o seu limite de compressão a partir de 600MPa. Pressões superiores a este valor não ocasionam variações significativas na densidade a verde, sendo esta então o valor de pressão de compactação (P) escolhida. A peça projetada para o núcleo do rotor possui uma superfície cilíndrica, resultando em uma área (A_c) de 17.671mm².

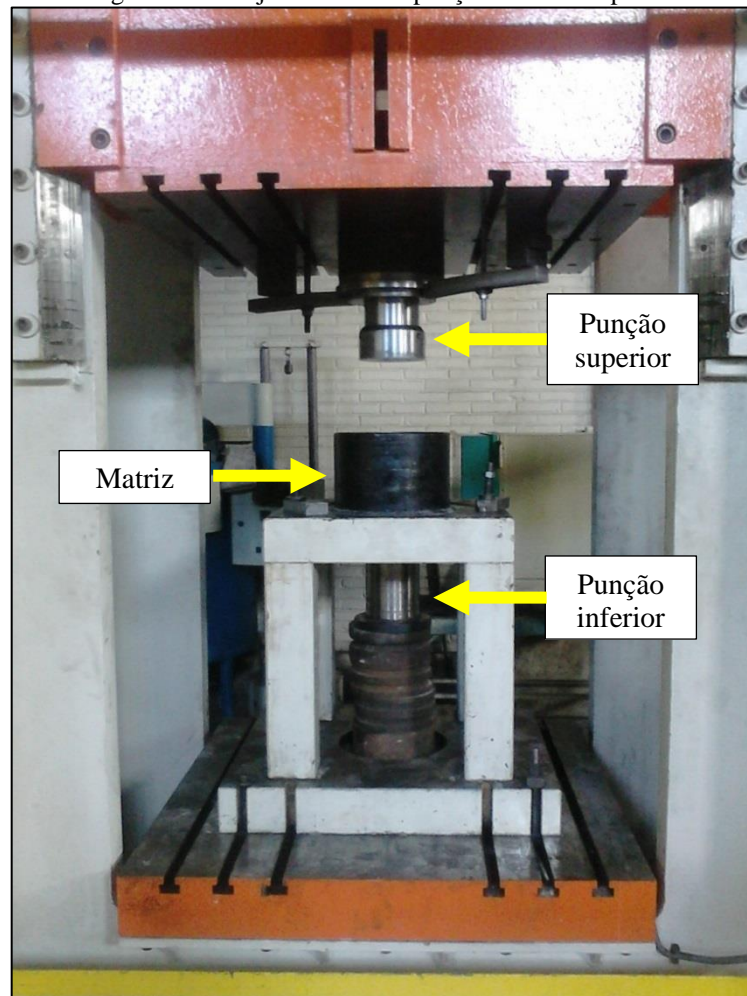
$$P = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

Utilizando a pressão de compactação (P) de 600MPa, a força de compactação (F) necessária para compactar as peças tem como resultado um valor de 10.600kN. Este valor é muito superior a capacidade da prensa FKL. Para que a utilização da prensa fosse possível, decidiu-se então utilizar a força máxima da prensa para a compactação das peças. Refazendo o cálculo para a aplicação de uma força de compactação (F) de 5.884kN, chegou-se a uma pressão de compactação (P) de aproximadamente 333MPa. Este valor está abaixo do valor recomendado de pressão pelo fabricante, porém é possível compensar parcialmente esta diferença no processo de sinterização. De acordo com Dias¹ (2015) o efeito da diferença entre as pressões de compactação recomendada e utilizada pode ser amenizado ao realizar mais de uma vez o processo de sinterização das peças.

A próxima etapa no processo de compactação foi a preparação da prensa com a fixação e alinhamento da matriz e dos punções. A fixação dos equipamentos requer uma atenção especial pois durante a compactação os componentes da matriz serão submetidos a uma pressão muito grande. Foram utilizados blocos maciços retificados como calços para que os punções fossem apoiados e ficassem na altura correta. A matriz foi fixada em um suporte metálico no interior da prensa. Como medida de precaução contra possíveis desalinhamentos durante a aplicação da pressão colocou-se um anel de alumínio entre a matriz e o suporte metálico. A Figura 26 mostra a montagem final da matriz e dos punções na prensa. Após o término de todos os ajustes necessários da matriz e da prensa, foi iniciado o clique de compactação das peças.

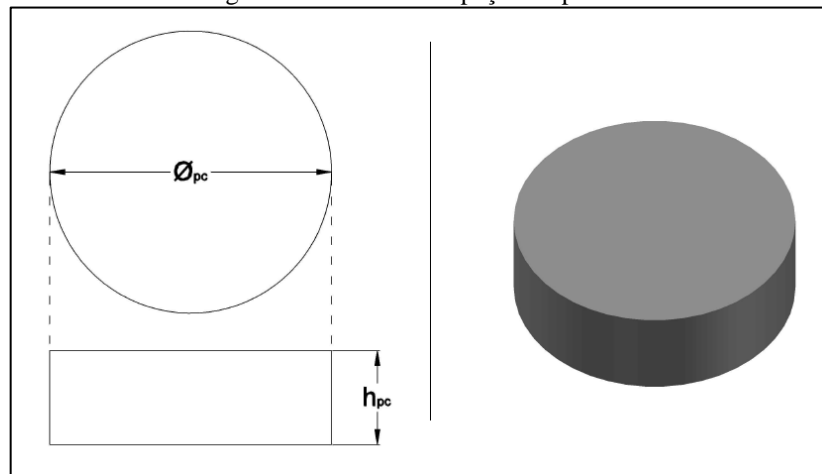
¹ (DIAS, M. M. **Compactação e sinterização das peças do núcleo** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <monir.borba@ufrgs.br> em 26 ago. 2015.)

Figura 26 - Conjunto matriz e punções fixados à prensa



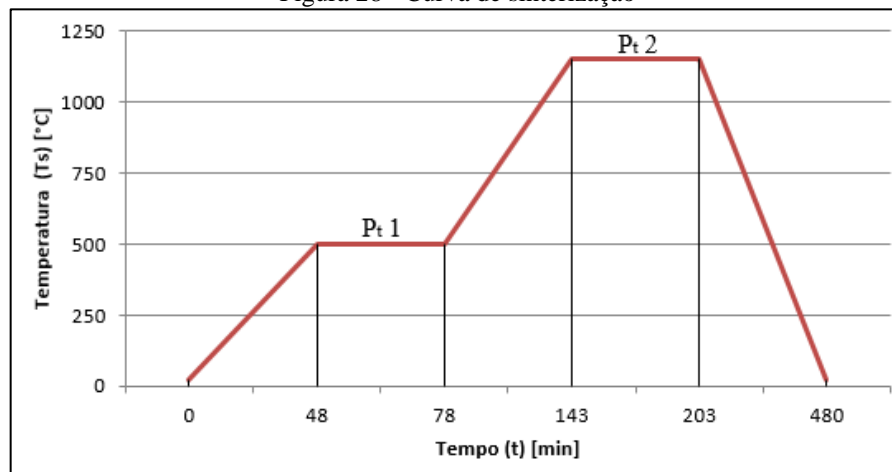
As peças foram obtidas segundo o princípio da compactação unidirecional em matriz rígida, onde a matriz conforma o formato externo da peça, o punção superior aplica a pressão pelo topo e o punção inferior conforma pela parte de baixo e também realiza a extração da peça no final do processo. O pó de ferro foi despejado na matriz até preencher toda a cavidade. Com o auxílio de uma régua metálica o excesso de pó foi retirado e recolhido em um recipiente para ser utilizado na próxima compactação. Após isto, foi aplicada a pressão de compactação para conformação do pó. Por fim ocorreu a ejeção da peça com o movimento para cima do punção inferior. Ao todo foram compactadas seis peças, sendo cinco para compor o núcleo e uma sobressalente caso houvesse algum imprevisto durante a usinagem. A Figura 27 apresenta o desenho com a geometria da peça compactada.

Figura 27 - Desenho da peça compactada



A etapa de sinterização das peças foi efetuada por uma empresa especializada em sinterização de peças metálicas de grandes dimensões. Foi utilizado um forno contínuo do tipo esteira, com uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, atmosfera de sinterização de gás verde (95% nitrogênio e 5% hidrogênio) e dois patamares de temperatura. A Figura 28 mostra a curva de sinterização utilizada no forno.

Figura 28 - Curva de sinterização

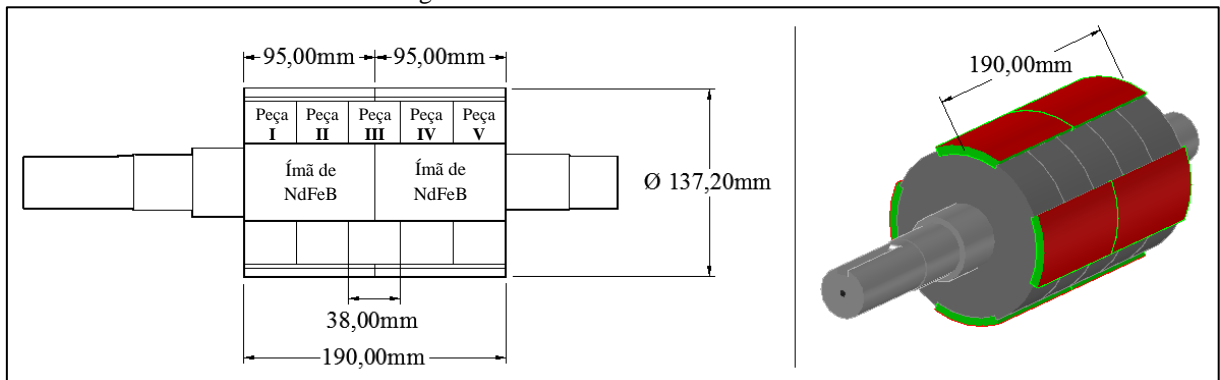


No primeiro patamar (Pt 1) as peças permaneceram em uma temperatura de 500°C por 30 minutos para a remoção do estearato de zinco utilizado como lubrificante. No segundo patamar (Pt 2) as peças foram mantidas por 60 minutos a uma temperatura de 1.150°C em razão de ser neste estágio que ocorre a ligação das partículas do pó. Após finalizar o segundo patamar, as peças foram resfriadas dentro do forno até a temperatura ambiente. Completada a primeira sinterização, foi realizada a segunda sinterização, repetindo os mesmos valores de tempo e temperatura descritos na curva de sinterização utilizada.

4.1.4. Montagem do rotor

A montagem final do rotor foi realizada com a inserção do eixo nas peças do núcleo, colagem dos ímãs e fixação dos rolamentos. Foram utilizados cinco núcleos compactados, quatro ímãs com polaridade norte na face superior, quatro ímãs com polaridade sul na face superior, um eixo e dois rolamentos. A Figura 29 apresenta em detalhes o desenho com a junção das partes utilizadas na composição do rotor.

Figura 29 - Desenho do rotor finalizado



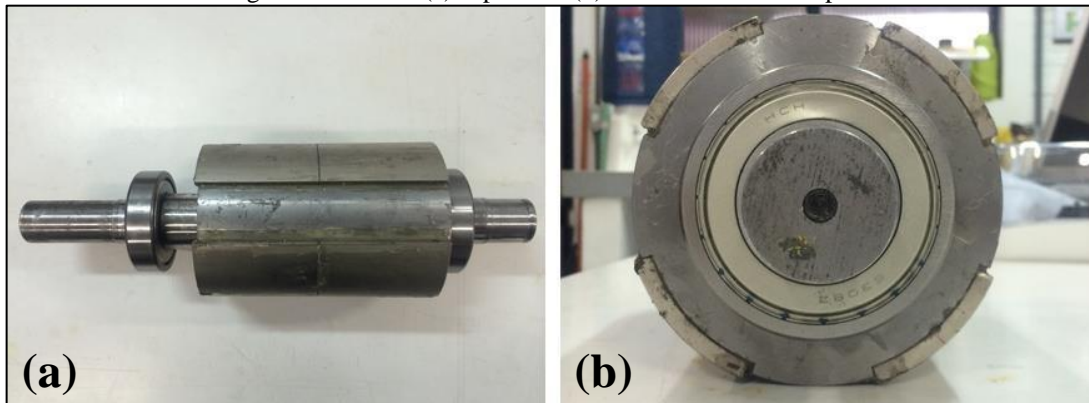
A introdução do eixo nas peças do núcleo foi realizada conforme o ajuste com interferência projetado e necessitou o uso de uma prensa para que as partes ficassem firmemente unidas. Com as peças do núcleo devidamente unidas ao eixo, foram colados os ímãs de NdFeB no rotor aos pares com a mesma orientação magnética e intercalada a orientação magnética a cada rebaixo. A colagem foi feita com cola epóxi e com o auxílio de um grampo sargento. A Figura 30 mostra o processo de colagem dos ímãs.

Figura 30 - Colagem dos ímãs de NdFeB



Completada a fase de incorporação dos ímãs ao rotor, finalizou-se a montagem com a inserção do eixo nos rolamentos. Foi necessária a utilização de uma prensa para que fossem fixados ao eixo de maneira uniforme, evitando desalinhados e danos aos rolamentos. O rotor completo é mostrado na Figura 31 em duas perspectivas diferentes.

Figura 31 - Vistas (a) superior e (b) frontal do rotor completo



4.2. MONTAGEM FINAL DA MÁQUINA ELÉTRICA

A montagem final da máquina elétrica foi realizada a partir do encaixe do rotor no estator. Ao inserir uma pequena parte do rotor no estator, este foi puxado para dentro em razão da atração exercida pelos ímãs de NdFeB. Neste momento o rotor permanecia desalinhado em relação ao núcleo do estator. Ao finalizar a montagem da máquina com a fixação da tampa frontal, o rotor se alinhou. A Figura 32 mostra o rotor inserido no estator. Encerrada a montagem da máquina, ela foi posicionada na banca de testes para a realização dos ensaios de desempenho.

Figura 32 - Vista frontal da montagem do rotor e do estator



4.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional é um importante aliado durante a realização do projeto de uma máquina elétrica. Ela permite que sejam testados uma infinidade de geometrias e materiais em questão de minutos, prevendo de forma muito precisa o comportamento da máquina elétrica. As principais ferramentas utilizadas para a simulação de máquinas elétricas são os programas de desenho assistido por computador e de análise por elementos finitos.

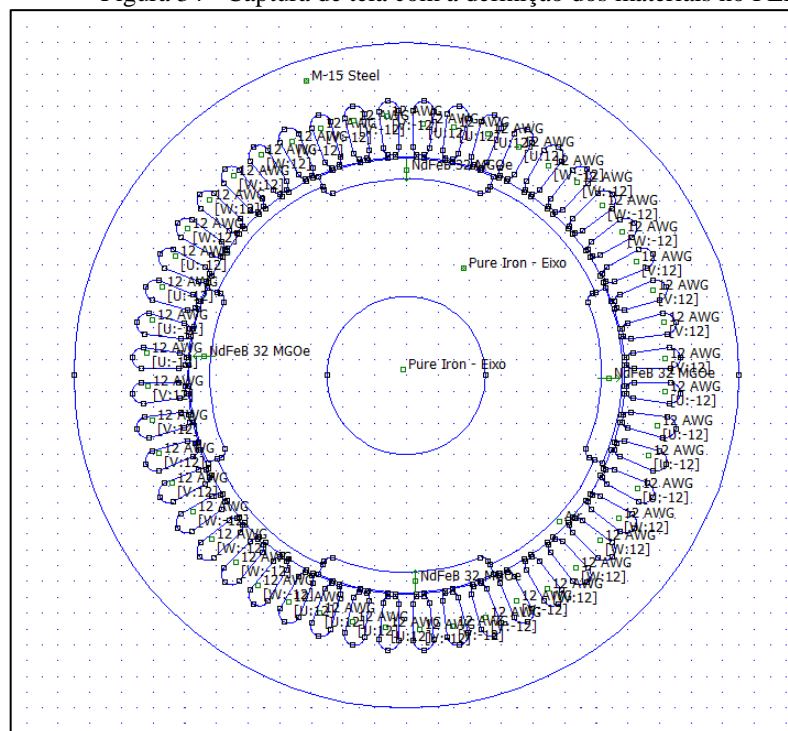
O programa de desenho assistido por computador permite que seja realizado em 2D e/ou 3D o projeto e desenho técnico da máquina elétrica idealizada com maior facilidade e riqueza de detalhes. O programa de análise por elementos finitos atua na resolução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas, mostrando como resultado as interações eletromagnéticas da máquina elétrica rotativa. A interação entre os dois programas se dá com importação para o programa de análise de elementos finitos um arquivo de intercâmbio para modelos CAD (.dxf) gerado no programa de desenho.

A simulação computacional da máquina elétrica projetada foi realizada utilizando os programas AutoCAD (versão 2012) desenvolvido pela empresa Autodesk e o FEMM (versão 4.2) desenvolvido por David Meeker. No AutoCAD foram desenhados em 2D as peças da máquina: ímãs de NdFeB, eixo do rotor e núcleos do estator e do rotor. A Figura 33 mostra a captura de tela do programa de desenho, onde estão indicadas as partes da máquina elétrica.



Para a simulação de uma máquina elétrica, o programa permite que sejam inseridos dados referentes a topologia da máquina, características do bobinamento, curva de magnetização do material do núcleo do rotor, entre outros. Foram realizadas três simulações, variando-se apenas o material do núcleo do rotor entre aço M-15, Fe puro e Fe2%P. A escolha destes materiais se deve em razão do aço M-15 ser amplamente utilizado nas atuais chapas laminadas dos rotores e a liga Fe2%P ser a composição que apresentou melhor características elétricas dos materiais já estudados pelo GDER da UFRGS. Após a importação do arquivo .dxf com o desenho da máquina, o material de cada peça foi indicado. A Figura 34 apresenta a imagem do desenho da máquina com os materiais indicados para a simulação com Fe puro no núcleo do rotor. Encerrada esta tarefa, o programa executou a criação da malha de elementos finitos, análise do modelo e apresentação dos resultados.

Figura 34 - Captura de tela com a definição dos materiais no FEMM

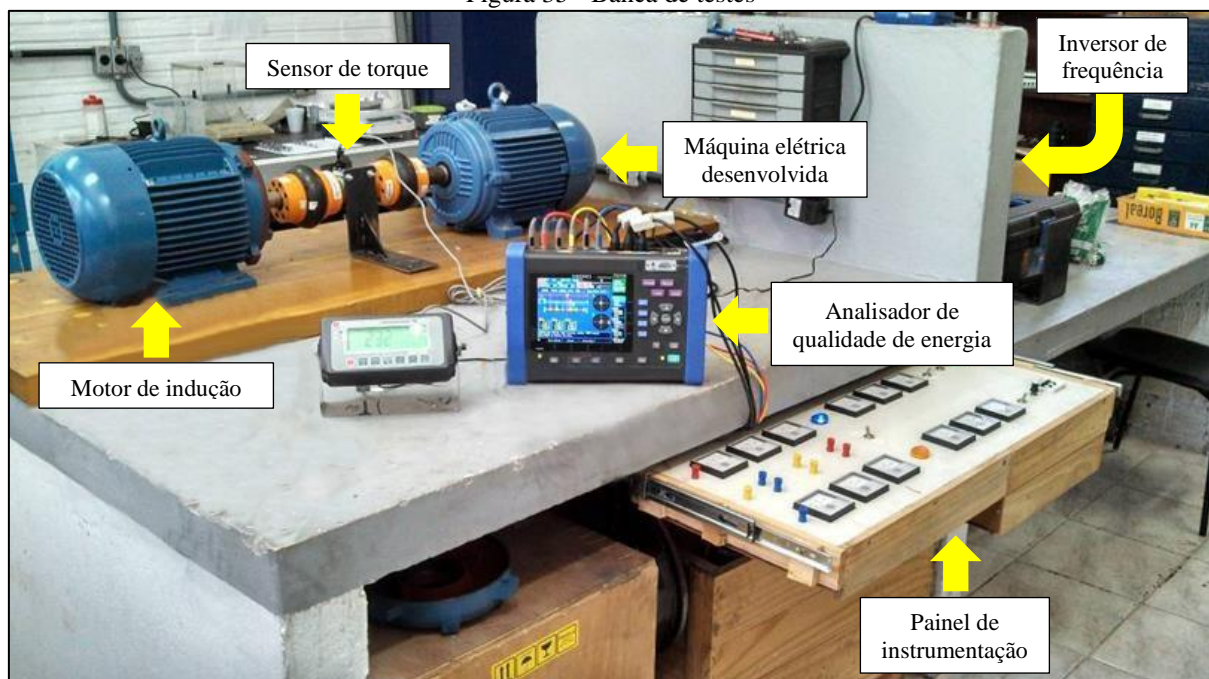


4.4. BANCADA DE TESTES

A análise da performance da máquina elétrica será realizada em uma bancada desenvolvida especialmente para este propósito no laboratório do GDER. Decidiu-se por avaliar o comportamento da máquina na bancada de testes em vez de realizá-lo em campo pois a bancada é composta de equipamentos que possibilitam a simulação das variações de rotação que o gerador estará sujeito e por tornar facilitada a aquisição de dados. A banca de testes é

composta por sensor de torque fabricado por MK Controle e Instrumentação Ltda. modelo MMK-5030, inversor de frequência WEG modelo CFW08, motor de indução WEG de 7,5 kW, analisador de qualidade de energia da empresa HIOKI modelo PW3198, painel de instrumentação e acoplamentos modelo pneu para conexão entre o sensor de torque, o motor e o gerador. A Figura 35 mostra a bancada de testes desenvolvida.

Figura 35 - Banca de testes



A bancada foi projetada para permitir a simulação do funcionamento da máquina elétrica desenvolvida atuando como um gerador eólico. Com este propósito, o motor de 7,5 kW é o responsável por emular o torque que a força do vento produzirá no eixo do gerador. O controle da rotação deste motor é realizado pelo inversor de frequência. Para a aquisição de dados foram utilizados o sensor de torque, que tem como função mostrar o valor do torque que está sendo empregado na ponta do eixo do gerador e o analisador de qualidade de energia, que mostra em tempo real as formas de onda e os valores de corrente e tensão que estão sendo produzidos no gerador. A simulação de cargas elétricas ligadas ao gerador foi realizada com a utilização de seis lâmpadas incandescentes de 60W cada.

A máquina elétrica desenvolvida foi analisada através da realização de dois experimentos. Primeiro, um teste de funcionamento avaliou a necessidade de ajustes decorrentes do funcionamento. Depois, foram realizados ensaios de desempenho com o objetivo de verificar o comportamento do gerador operando nas frequências (F_{inv}) de 10, 13, 15, 18 e 60Hz.

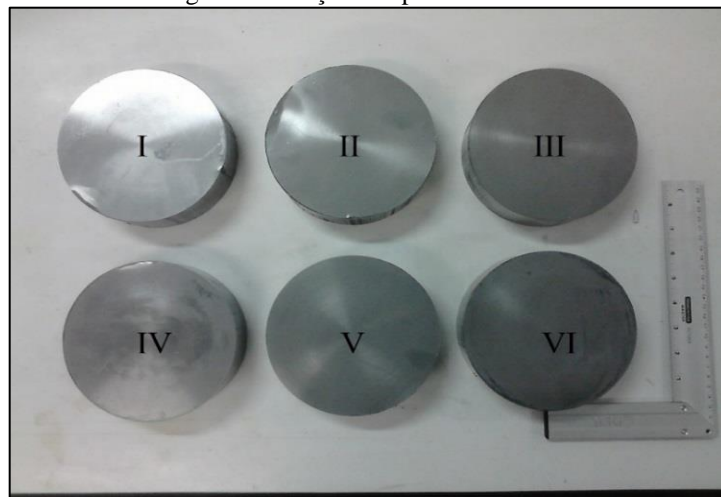
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A confecção do núcleo do rotor de uma máquina elétrica a partir do processo de metalurgia do pó bem como o desempenho teórico e prático desta máquina foram avaliados no decorrer deste trabalho. As informações coletadas durante a pesquisa permitiram a análise e interpretação dos resultados tomando como base o referencial teórico elaborado, além de suas implicações.

5.1. PEÇAS DO NÚCLEO OBTIDAS POR METALURGIA DO PÓ

O processo de compactação das peças foi realizado conforme o projetado. O Lubrificante misturado com o pó de ferro se mostrou efetivo, atuando na redução do atrito durante a compactação e facilitando a extração das peças no final de cada ciclo. Após a extração, todas as peças passaram por um controle de qualidade. Esta inspeção foi realizada para avaliar características do compactado, como a presença ou não de trincas e a qualidade do acabamento superficial. O resultado das avaliações indicou que não houve trincas superficiais, todas as peças apresentaram uma coloração uniforme e uma densidade a verde adequada para o manuseio. As seis peças obtidas estão mostradas na Figura 36.

Figura 36 - Peças compactadas a verde



Todas as peças obtidas tiveram as suas principais dimensões tais como massa (m_{pc}), altura (h_{pc}) e diâmetro (ϕ_{pc}) medidas antes serem encaminhadas para a etapa de sinterização. A partir destas dimensões, a densidade (ρ) foi calculada. A Tabela 6 apresenta as propriedades das peças compactadas a verde.

Tabela 6 - Peças compactadas a verde

Peça	m_{pc} [kg]	h_{pc} [mm]	\varnothing_{pc} [mm]	ρ [g/cm ³]
I	5,90	51,55	150,02	6,47
II	5,87	52,12	150,00	6,37
III	5,94	51,45	150,01	6,53
IV	5,91	50,76	150,01	6,59
V	5,95	52,28	150,03	6,44
VI	5,89	52,25	150,02	6,38

As variações ocorridas na massa (m_{pc}) e altura (h_{pc}) das peças tem como causas o preenchimento manual da cavidade da matriz e o posicionamento do punção inferior na cavidade da matriz. A divergência percebida entre os valores do diâmetro das peças e o da cavidade da matriz se deve o “efeito mola” que ocorre nos compactados. Este efeito é decorrente da expansão elástica de uma peça compactada em relação à dimensão da ferramenta de compactação. A densidade (ρ) apresentou um valor médio de 6,46g/cm³. De acordo com a literatura, este valor está condizente com o comportamento da curva de compressibilidade do pó de ferro puro. (GRUPO SETORIAL DA METALURGIA DO PÓ, 2009)

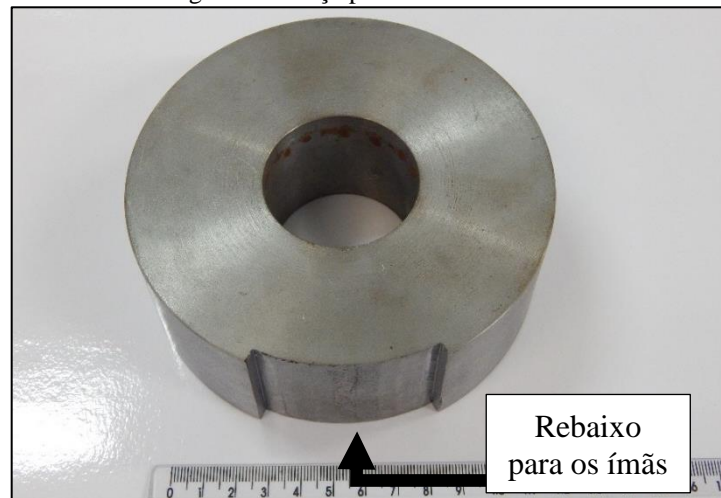
O processo de sinterização forneceu às peças a devida resistência mecânica para que a operação complementar de usinagem pudesse ser realizada posteriormente. A Figura 37 mostra o estado final de uma peça tipicamente sinterizada, onde é possível notar um escurecimento devido a oxidação que geralmente ocorre na câmara de resfriamento do forno. Este efeito é geralmente superficial e tem diversas origens como causa.

Figura 37 - Peça sinterizada típica



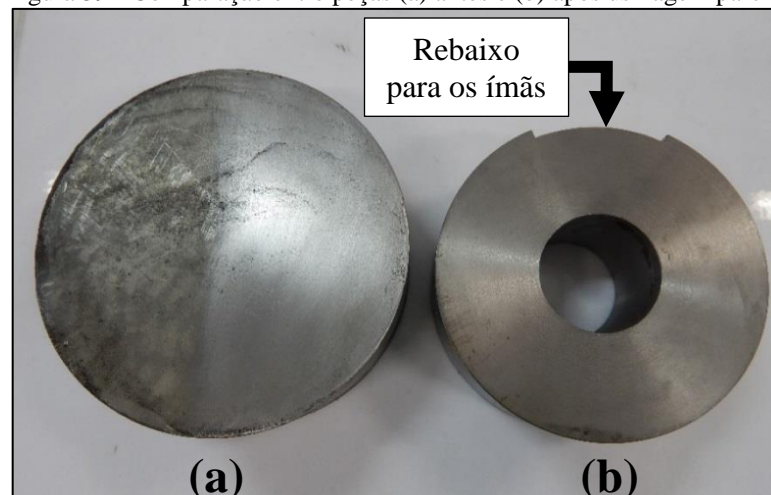
Embora a metalurgia do pó seja uma técnica que permita a obtenção de peças com a forma definitiva, muitas vezes devido à complexidade da geometria são necessários processos posteriores de acabamento. Seguindo o que foi definido no projeto do rotor, as peças foram encaminhadas para uma empresa de usinagem que realizou as operações necessárias para ajuste do diâmetro, melhorar o acabamento superficial, furação para o eixo e fresagem dos rebaiços para os ímãs. O resultado parcial da usinagem das peças que compõem o núcleo do rotor é mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Peça parcialmente usinada



Um comparativo entre uma peça (a) antes e outra (b) parcialmente finalizada durante a usinagem é apresentado na Figura 39. Na peça (b) parcialmente finalizada já foram realizados o ajuste para o diâmetro final, furação para o eixo, faceamento e abertura do primeiro rebaixo para fixação dos ímãs de NdFeB.

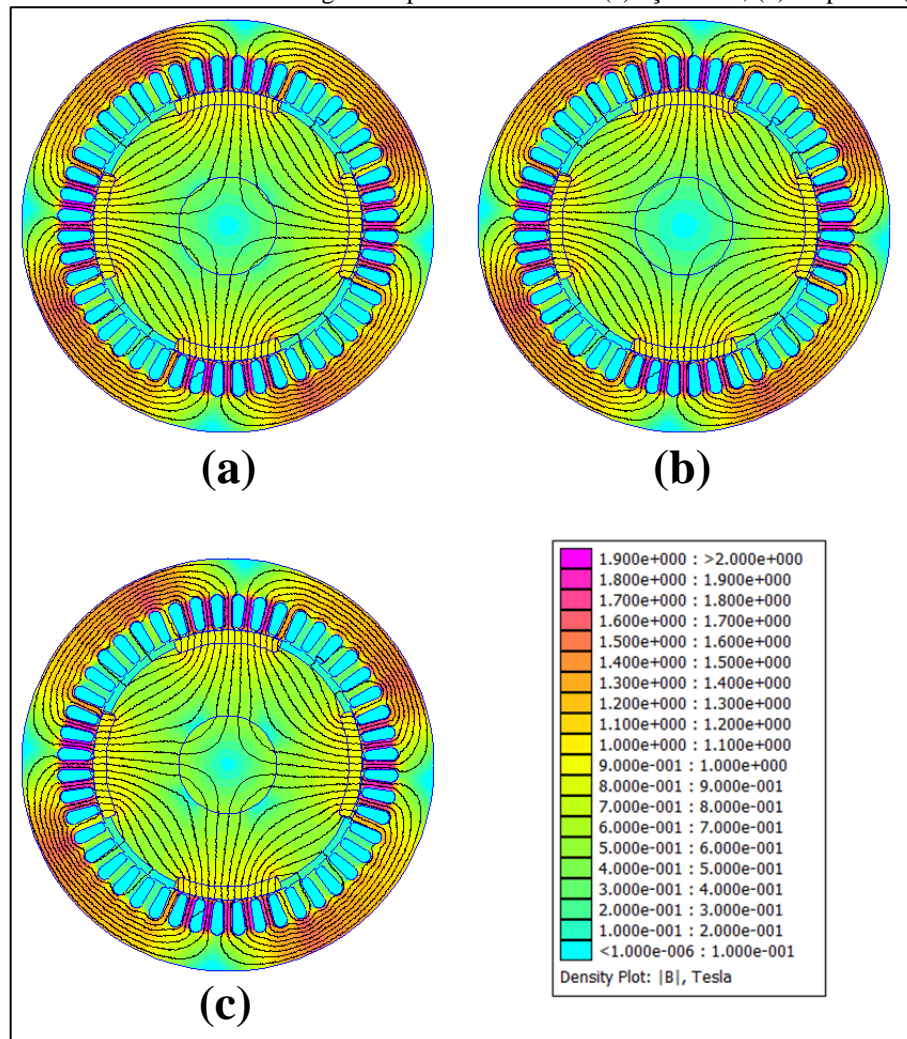
Figura 39 - Comparação entre peças (a) antes e (b) após usinagem parcial



5.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional da máquina elétrica forneceu uma ideia do resultado teórica da máquina elétrica. As três simulações possibilitaram observar o comportamento do fluxo magnético, onde a Figura 40 mostra a densidade e a distribuição das linhas de fluxo geradas no plano longitudinal da máquina para os rotores com núcleo de (a) aço M-15, (b) Fe puro e (c) Fe2%P.

Figura 40 - Densidade e linhas de fluxo magnético para os rotores de (a) aço M-15, (b) Fe puro e (c) Fe2%P



A interação entre os materiais usados na construção do rotor e o fluxo magnético produzido no estator resulta em um torque no eixo da máquina. A Tabela 7 apresenta os valores de torque (T) e a densidade de fluxo magnético (B) (em módulo) para os três núcleos simulados.

Tabela 7 - Comparativo entre torque e densidade de fluxo máximo

Material do núcleo	Torque [N·m]	Densidade de fluxo magnético [T]
Chapas M-15	31,29	1,24
Fe puro	31,29	1,24
Fe2%P	31,25	1,24

Os três tipos de materiais simulados nos rotores apresentaram valores de torque e densidade de fluxo magnético (B) muito próximos havendo variações centesimais. Esta característica está de acordo com a literatura, que indica para máquinas elétricas rotativas, densidade de entreferro prevista nesta faixa de valores. (DIAS, 1999; BITTENCOURT, 2012; CERVA, 2014).

Com os resultados obtidos a partir da simulação computacional é possível estimar teoricamente o comportamento da máquina elétrica. Os valores da indução no entreferro e torque são semelhantes para os três tipos de rotores, indicando que a máquina elétrica projetada com rotor de ferro puro sinterizado possui características de desempenho similares as de uma máquina com rotor de núcleo de chapas tradicional.

5.3. TESTES DE FUNCIONAMENTO E DESEMPENHO

O teste de funcionamento avaliou o comportamento da máquina ao ser energizada sem carga. Durante a realização do teste ocorreu um barulho anormal que ocasionou a sua imediata suspensão. Ao abrir a máquina verificou-se que alguns dos ímãs haviam se desprendido do rotor. Buscando solucionar este problema, todos os ímãs foram descolados do rotor, o revestimento de níquel que recobria a parte inferior dos ímãs foi removido e realizou-se a uma nova colagem utilizando uma cola a base de poliuretano em substituição a resina epóxi usada anteriormente. Refazendo o teste de funcionamento e variando a rotação do gerador, a máquina não apresentou o problema inicial e passou-se para a análise do desempenho da máquina em frequências variadas.

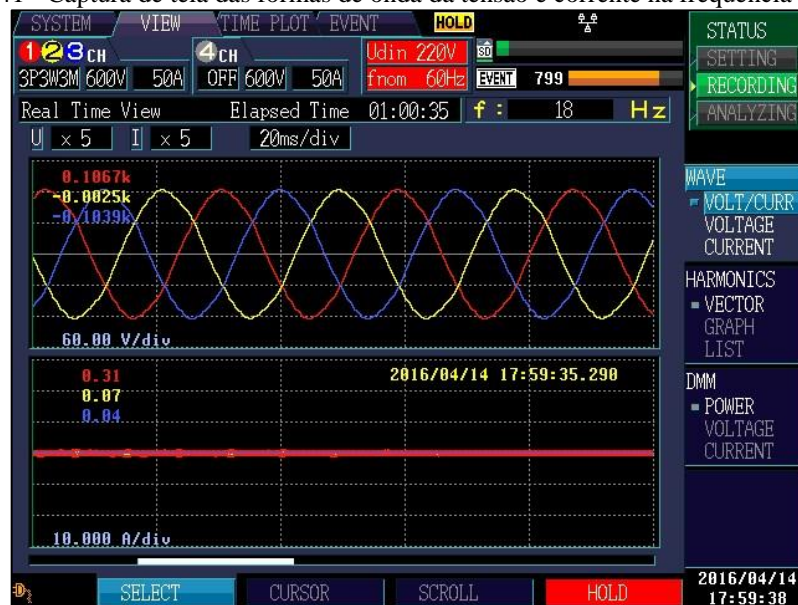
Os testes de desempenho foram realizados visando o levantamento de informações quantitativas através das quais o desempenho da máquina fosse julgado. Os valores de tensão, corrente e torque (T) obtidos na saída do gerador em função da frequência selecionada no inversor são mostrados na Tabela 8 para o ensaio com carga.

Tabela 8 - Ensaio com carga

Frequência (F_{inv}) [Hz]	Rotação (n) [rpm]	Torque (T) [N·m]	Tensão [V]	Corrente [A]
10	300	7,09	47,08	0,81
13	400	8,24	61,89	0,78
15	450	7,21	72,64	0,76
18	540	5,82	86,36	0,71

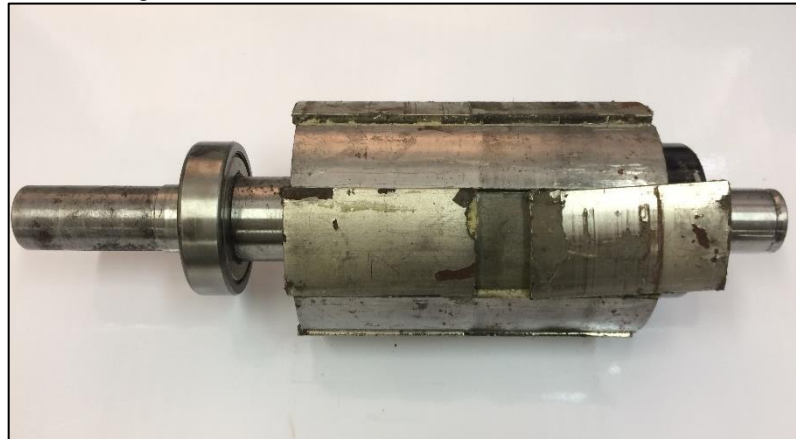
A qualidade da energia gerada na saída do gerador é um fator muito importante pois influencia diretamente a eficiência energética das cargas. Não foi percebido a presença de harmônicas nas formas de onda da tensão, o que para um sistema gerador significa que as perdas na transmissão e distribuição serão reduzidas. A Figura 41 mostra a captura de tela realizada no analisador de qualidade de energia para as formas de onda da tensão e corrente na frequência (F_{inv}) de 18 Hz.

Figura 41 - Captura de tela das formas de onda da tensão e corrente na frequência de 18 Hz



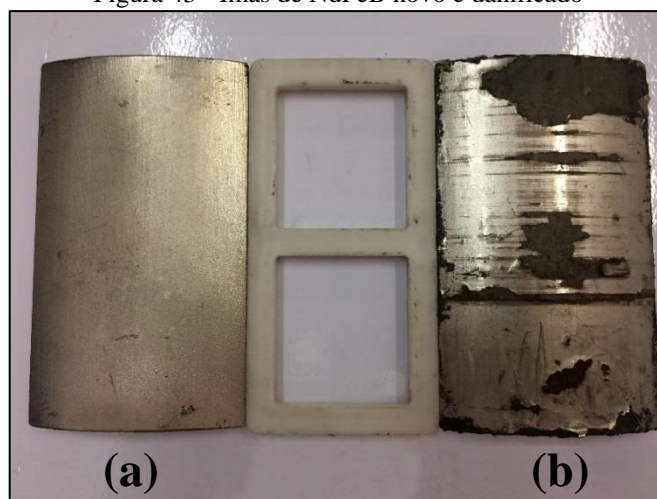
Durante o funcionamento na frequência de 18Hz, a máquina elétrica emitiu um som anormal, motivando a imediata suspensão do teste. Para entender o que aconteceu de errado, o rotor foi retirado do estator e descobriu-se que um dos ímãs havia descolado novamente. A Figura 42 mostra o rotor removido após o incidente.

Figura 42 - Rotor com ímã descolado durante o ensaio



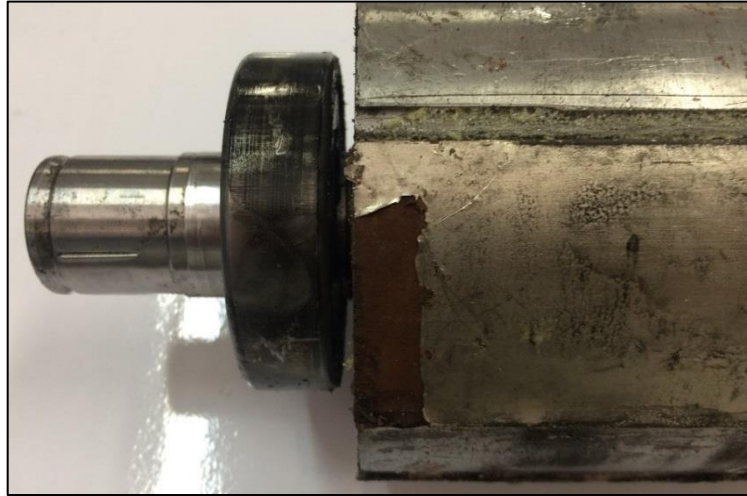
A cola a base de poliuretano utilizada não se mostrou efetiva. Por questões de segurança foi decidido encerrar os ensaios de desempenho para coleta dados em frequências maiores. A Figura 43 mostra uma comparação entre dois ímãs de NdFeB: um novo (a) que não foi utilizado e o que foi danificado (b) ao se desprender do rotor, separados por um espaçador de polímero.

Figura 43 - Ímãs de NdFeB novo e danificado



Outro problema percebido durante a análise da falha da máquina elétrica foi referente ao revestimento protetor dos ímãs de NdFeB. Em alguns pontos o revestimento se soltou, deixando o ímã exposto. Isto permitiu que ocorresse uma oxidação na parte desprotegida, como pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 - Rotor com ímã parcialmente oxidado



6. CONCLUSÃO

A busca por tecnologias que permitam o desenvolvimento sustentável causando baixo impacto ambiental, tem impulsionado o avanço da utilização da metalurgia do pó na fabricação de máquinas elétricas. Exigindo um menor consumo de energia elétrica e oportunizando um alto aproveitamento da matéria prima, a metalurgia do pó busca produzir máquinas elétricas com características superiores as construídas de forma tradicional.

Aliando os conhecimentos da metalurgia do pó com a filosofia proposta pelas energias renováveis, foi realizada esta pesquisa propondo o desenvolvimento e análise 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. Diante dos resultados obtidos e discutidos no decorrer do trabalho pode-se concluir que a obtenção do núcleo do rotor a partir do processo de metalurgia do pó mostrou-se uma alternativa perfeitamente viável. A metalurgia do pó elimina uma série de etapas onerosas que são necessárias no tradicional processo de produção de núcleos com chapas laminadas.

A utilização de pó de ferro puro como matéria prima para a construção do núcleo foi satisfatória. Trabalhos anteriores sobre caracterização de ligas metálicas para utilização em máquinas elétricas realizados no GDER indicam que apesar de não ser a liga com as melhores propriedades físicas, o ferro puro se sobressai no quesito propriedades mecânicas, onde as demais ligas apresentam restrições que podem inviabilizar a sua utilização. Ainda que o ferro puro sinterizado apresente a menor resistividade elétrica (o que ajuda a induzir correntes parasitas) do que outros pós metálicos, o seu uso não comprometeu a eficiência do rotor. Isto se deve graças aos ímãs permanentes utilizados que tendem a produzir um fluxo magnético constante ou com poucas variações. Não havendo variação ou redução de fluxo, as perdas por correntes parasitas foram mínimas. O ferro puro possui propriedades físicas bastante similares ao aço baixo carbono utilizado na maioria dos núcleos das máquinas elétricas rotativas. O processo de usinagem necessário para confecção do núcleo foi realizado de maneira fácil em virtude das propriedades mecânicas do ferro puro. Para a utilização em uma produção de núcleos em escala industrial o pó de ferro puro é uma boa possibilidade em virtude da sua facilidade de manuseio, baixo custo, ausência de toxicidade etc.

A simulação computacional é uma poderosa ferramenta de auxílio ao projeto de máquinas elétricas. A realização das simulações forneceu informações teóricas de grande importância sobre o desempenho das duas máquinas elétricas. Os resultados da simulação permitiram a comparação entre os três modelos de máquina. As imagens e dados resultantes

indicaram que a máquina com rotor construído a partir de ferro puro sinterizado teria um desempenho muito similar ao da máquina com núcleos de chapas laminadas. A confirmação dos resultados da simulação veio com a realização dos ensaios de desempenho executados posteriormente, comprovando assim a grande importância deste recurso computacional.

O teste de funcionamento mostrou que o atual projeto do rotor deve ser modificado no que diz respeito a forma como os ímãs são fixados. O desprendimento ocorrido entre os ímãs e o núcleo do rotor durante o funcionamento da máquina pode ocasionar graves acidentes dependendo da velocidade em que se está operando. Uma alteração na forma de como o ímã é unido ao rotor, seja utilizando outro tipo de cola ou substituindo a utilização de cola por um sistema de fixação mecânica são alternativas para a solução do problema enfrentado.

O ensaio de desempenho da máquina corroborou com o que o teste de desempenho já avisa sinalizado: a necessidade de alterações no projeto de fixação dos ímãs. Os resultados iniciais dos ensaios apontaram que a máquina possui um funcionamento promissor, tendo como respaldo os resultados da simulação computacional. Apesar de não ter sido possível a medição do rendimento na máquina, acredita-se que este alcance um valor semelhante ao das máquinas elétricas síncronas trifásicas com ímãs permanentes comercializadas atualmente.

Os resultados obtidos ao final desta pesquisa comprovam que a metalurgia do pó pode ser utilizada na fabricação de núcleos de máquinas elétricas, contribuindo para que os aerogeradores evoluam a passos largos e tornem-se cada vez mais eficientes na conversão de energia. A fabricação de núcleos de máquinas elétricas a partir da metalurgia do pó possui uma vasta linha de pesquisas a serem exploradas.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O homem é um ser inquieto em busca do conhecimento. Esta inquietação perante novos desafios e possibilidades faz com que a cada dia desponham inovações e descobertas. O campo das energias renováveis, aliada com o processo da metalurgia do pó, apresentam uma infinidade de possibilidades de desenvolvimentos. Como sugestões para trabalhos futuros nesta área pode-se citar:

- Estudo do uso de pós metálicos micro encapsulados que apresentam uma isolamento elétrica a base de polímero ou óxidos entre as partículas de pós de ferro, provocando efeito similar a isolamento entre chapas de núcleos convencionais e ajudando assim a diminuir as correntes parasitas;
- Teste de novas configurações de rotor e disposição dos ímãs permanentes que possibilite uma maior densidade de fluxo de entreferro na superfície do rotor, resultando em uma máquina com redução de dimensões e peso;
- Análise do desempenho de peças obtidas por técnicas como a injeção de pós metálicos, sinterforjamento e tixoforjamento de pós metálicos;
- Estudo da influência do ângulo de inclinação das ranhuras do núcleo do estator; modificação no sistema de fixação dos ímãs, testando diferentes colas e/ou reformulando o projeto do núcleo do rotor;
- Adição de mais polos no rotor para que a máquina opere com uma menor rotação, contribuindo para um menor desgaste das peças móveis, e mantenha a frequência de geração em 60Hz na sua saída;

8. REFERÊNCIAS

ASIF, Muhammad Ahsan; MUNEER, Tariq. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 11, n. 7, p. 1388 - 1413, set 2007.

ASSOCIAÇÃO DE POUPANÇA DE ENERGIA DO IRÃ. **Energia eólica**. 2015. Disponível em: <http://www.iranecs.com/articles_det.php?id=5>. Acesso em: 23 abr. 2015.

AZEVEDO, Thiago Paula Silva de. **Bancada experimental para ensaios em geradores elétricos utilizados em aerogeradores de pequeno porte**. 2012. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/3036>>. Acesso em: 29 jun. 2015.

BARBOZA, Juliano Soares. **Caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da metalurgia do pó aplicados a núcleos de máquinas elétricas**. 2009. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/16209>>. Acesso em: 12 maio 2015.

BIM, Edson. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

BITTENCOURT, Sérgio Deitos. **Caracterização de ligas magnéticas sinterizadas para aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas**. 2012. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/60674>>. Acesso em: 26 maio 2015.

BORED PANDA. **15+ Before-And-After Pics Showing How Famous Cities Changed Over Time**. Disponível em: <<https://www.boredpanda.com/how-famous-city-changed-timelapse-evolution-before-after/>>. Acesso em 23 abr. 2016.

BUREŠ, Radovan et al. Microstructure and properties of Fe/phenol-formaldehyde resin composites. **Powder Metallurgy Progress**, Košice, v. 11, n. 3-4, p. 306-312. 2011. Disponível em: <http://www.imr.saske.sk/pmp/issue/3-4-2011/PMP_Vol11_No3-4_p_306-312.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2016.

CALLISTER JUNIOR., William D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARVALHO, Paulo. **Geração eólica**. Fortaleza: Editora da Universidade/UFCE, 2003.

CERVA, Luciano Lohmann. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona com ímãs permanentes e núcleo sinterizado utilizada em aerogerador**. 2014. 100 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/103726>>. Acesso em: 19 dez. 2014.

CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do pó**. 4 ed. São Paulo: ABM, 2001.

CONCER, Germano Esmeraldino. **Projeto de motor de ímã permanente utilizando ferrite na configuração de ímãs enterrados**. 2008. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91174>>. Acesso em: 22 jun. 2015.

CULLITY, Bernard Dennis; GRAHAM, Charles Danne. **Introduction to magnetic materials**. 2nd ed. Piscataway: IEEE, 2009.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia eólica: para produção de energia elétrica**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 2009.

DIAS, Moisés de Mattos. **Construção de uma máquina síncrona de relutância trifásica com rotor de material magnético macio sinterizado**. 1999. 107 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

DIAS, Moisés de Mattos et al. Motores síncronos trifásicos com ímãs permanentes. **Technologia**, Canoas, v. 6, n. 2, p. 107-127, jul./dez. 2005. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ldtm/publicacoes/05%2004.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2015.

DUTRA, Ricardo. **Energia eólica**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2015.

ESSWEIN JUNIOR., Jorge Alberto Lewis. **Desenvolvimento de compósitos magnéticos macios utilizados em núcleos de máquinas elétricas**. 2009. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/16918>>. Acesso em: 30 mar. 2015.

FERREIRA, Ângela Paula Barbosa da Silva. **Projecto de uma máquina de ímanes permanentes de fluxo axial orientado para os sistemas de conversão de energia eólica**. 2011. 318 p. Tese (Doutorado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10216/63310>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

FERREIRA, Jorge Filipe da Silva Barros. **Controlo de geradores de indução duplamente alimentados em turbinas eólicas**. 2009. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10362/2030>>. Acesso em: 9 abr. 2015.

FIORILLO, Fausto. Measurement of magnetic materials. **Metrologia**, Londres, v. 47, n. 2, p. 114-142, mar. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/47/2/S11>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

FITZGERALD, Arthur Eugene; KINGSLEY JUNIOR, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GAMMAENERGY. **I principal componenti**. Disponível em: <<http://www.gammaenergy.it/eolico/i-principali-componenti.html>>. Acesso em: 23 abr. 2015.

GOLTZ, Evandro Claiton. **Estudo de máquina elétrica de fluxo axial aplicada a sistema de tração automotiva com acoplamento direto e frenagem regenerativa**. 2012. 218 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/76114>>. Acesso em: 25 abr. 2015.

GRUPO SETORIAL DA METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum, 2009.

GUTFLEISCH, Oliver et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. **Advanced Materials**. Weinheim, v. 23, n. 7, p. 821 - 842, fev. 2011. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201002180/full>>. Acesso em: 28 fev. 2015.

HÖGANÄS AB. Handbook for sintered components. Höganäs: 2013

JARDIM, Andrei Silva. **Utilização de máquina de indução duplamente alimentada sem escovas (BDFM) como gerador eólico**. 2014. 62 p. Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012471.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2015.

LANDGRAF, Fernando José Gomes. Lâminas de aço para motores elétricos. **Metalurgia e Materiais**, v. 55, n. 483, p. 626-627, abr. 1999.

_____. Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos. In BOTT, Ivani; RIOS, Paulo; PARANHOS, Ronaldo (Org.). **Aços: perspectivas para os próximos 10 anos**. Rio de Janeiro, s. n., 2002. p. 109-128. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/academic/landgraf/nossos%20artigos%20em%20pdf/02Lan%20%20recope%20.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

LE GOURIÈRES, Desire. **Wind power plants: theory and design**. Oxford: Pergamon, 1982.

LOUREIRO, Luiz Tiarajú dos Reis. **Um estudo sobre a máquina torus**. 2008. 106 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/21841>>. Acesso em: 23 jun. 2015.

LUNA, Wilberth Harold Deza. **Desenvolvimento de ímãs de Ne-Fe-B pelo processo MPI aplicados em máquinas elétricas (motores)**. 2012. 83 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/109162>>. Acesso em: 28 fev. 2015.

LUZ, Antônio Máximo Ribeira da; ALVARENGA, Beatriz Gonçalves de. **Física: ensino médio**. v. 3. São Paulo: Scipione, 2008.

MAIA, Thales Alexandre Carvalho. **Projeto e construção de um gerador a ímãs permanentes de fluxo axial para turbina eólica de pequena potência**. 2011. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/187M.PDF>>. Acesso em: 25 jun. 2015

MARQUES, Jeferson. **Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. 2004. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004. Disponível em: http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1607. Acesso em: 6 abr. 2015.

MEURER, Evandro Jacob. **Estudo das perdas magnéticas interlaminares em máquinas elétricas**. 2005. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/103072>>. Acesso em: 30 maio 2015.

MONTEIRO, José Roberto Boffino de Almeida. **Transformação dq não senoidal para máquinas síncronas com imã permanente no rotor**. 2002. 108 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde24092015-135013/>>. Acesso em: 22 jun. 2015.

NASAR, Sayed Abu; BOLDEA, Ion; UNNEWEHR, Lewis Emory. **Permanent magnet, reluctance, and self-synchronous motors**. Boca Raton: CRC, 1993.

OLIVEIRA, João Gabriel Souza Martins de. **Materiais usados na construção de motores elétricos**. Seminário Técnico apresentado como requisito parcial para aprovação na Disciplina Materiais Elétricos, Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <http://www.motoreletrico.net/upload/materiais_motores.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2015.

OSÓRIO, Jonas Obert Martins. **Análise da máquina torus sob frenagem eletrodinâmica**. 2011. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/38777>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

PELEGRINI, Leandro. **Influência do tempo de moagem por mecânico-síntese nas propriedades da liga magnética Fe-3%Si-0,75%P aplicada em núcleos de máquinas elétricas**. 2012. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/72911>>. Acesso em: 16 jan. 2015.

PEREIRA, Marcello Monticelli. **Estratégia de controle para fornecimento de potência elétrica constante utilizando turbinas eólicas e geradores de indução duplamente excitados**. 2004. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ppee/files/2008/12/211037.pdf>>. Acesso em: 6 abr. 2015.

PINHEIRO, Eduardo Luiz Reis. **Análise do comportamento dinâmico de usinas eólicas a velocidade variável utilizando ATPDraw**. 2004. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/489M.PDF>>. Acesso em: 5 jun. 2015.

RAMOS, Emanuel Philipe Pereira Soares et al. Comportamento do gerador eólico duplamente alimentado submetido distúrbios na rede elétrica e à variação da velocidade do vento. **Revista Brasileira de Energia**, Rio de Janeiro, vol. 20, n. 01, p. 129-157, jan./jun. 2014. Disponível em: <<http://new.sbpe.org.br/artigo/328/>>. Acesso em: 1 jun. 2015.

RAMOS, Felipe Guimarães. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona trifásica com ímãs de Nd-Fe-B e núcleo do estator a partir de Fe₂P sinterizado aplicado em aerogerador de 1kW**. 2015. 63 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/118863>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

RECH, Renato. **Nova linha VTOP Voges Motores** - motor de alto rendimento. Disponível em: <<http://www.voges.com.br/?section=areatecnica&id=5>>. Acesso em: 2 ago. 2015.

RODRIGUES, Daniel. **Materiais Magnéticos Produzidos por Metalurgia do Pó**. São Paulo: IPT, 2008. 4 p.

ROSA, Diogo Martins; BOLSON, Marco Antônio; MORAES, Luiz André Motta de. **Comportamento dos geradores de indução duplamente alimentados em turbinas eólicas de 1,5MW**. 2013. 99 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica - Ênfase em Eletrotécnica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Curitiba, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1930>>. Acesso em: 20 abr. 2015.

SALLES, Maurício Barbosa de Camargo. **Modelagem e análise de geradores eólicos de velocidade variável conectados em sistemas de energia elétrica**. 2009. 124 p. Tese

(Doutorado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-29092010165439/>>. Acesso em: 11 jun. 2015.

SANTOS, Hamilta de Oliveira. **Estudo de orientações cristalográficas de aços ao silício utilizando técnicas de difração de raios x, difração de elétrons e método ETCH PIT**. 1999. 111 p. Dissertação (Mestrado em Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.ipen.br/biblioteca/teses/21929.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

SANTOS, Júlio Penin. **Influência do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas dos aços elétricos - o efeito textura**. 2005. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/123456789/320>>. Acesso em: 16 abr. 2015.

SCHLICKMANN, Marcelo Niehues. **Avaliação da influência dos parâmetros do processo de soldagem TIG sobre a qualidade de uma peça fabricada em aço elétrico silicioso**. 2010. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2010. Disponível em: <www.tede.udesc.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2079>. Acesso em: 12 abr. 2015.

SILVA, João Lucas da. **Estratégia de controle e supervisão de um gerador de indução duplamente excitado para turbinas eólicas**. 2009. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8CZGPA>>. Acesso em: 16 abr. 2015.

SPERA, David A. **Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering**. New York: ASME, 1994.

THORSEN, Knud Aage; PERSSON, Mats. Soft magnetic materials - an introduction. **International SinterNews**, Ferritslev, 3rd. ed., p. 4-5, 2004. Disponível em: <<https://issuu.com/sinternews/docs/sinternews3en-gb/1>>. Acesso em: 10 maio 2015.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Annual Energy Outlook 2015**. Washington: U.S. Department of Energy, 2015. 154 p.

VERDUM, Valdirene. **Projeto de aerogerador com segurança inerente para aplicação urbana**. 2013. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/86478>>. Acesso em: 30 jun. 2015.

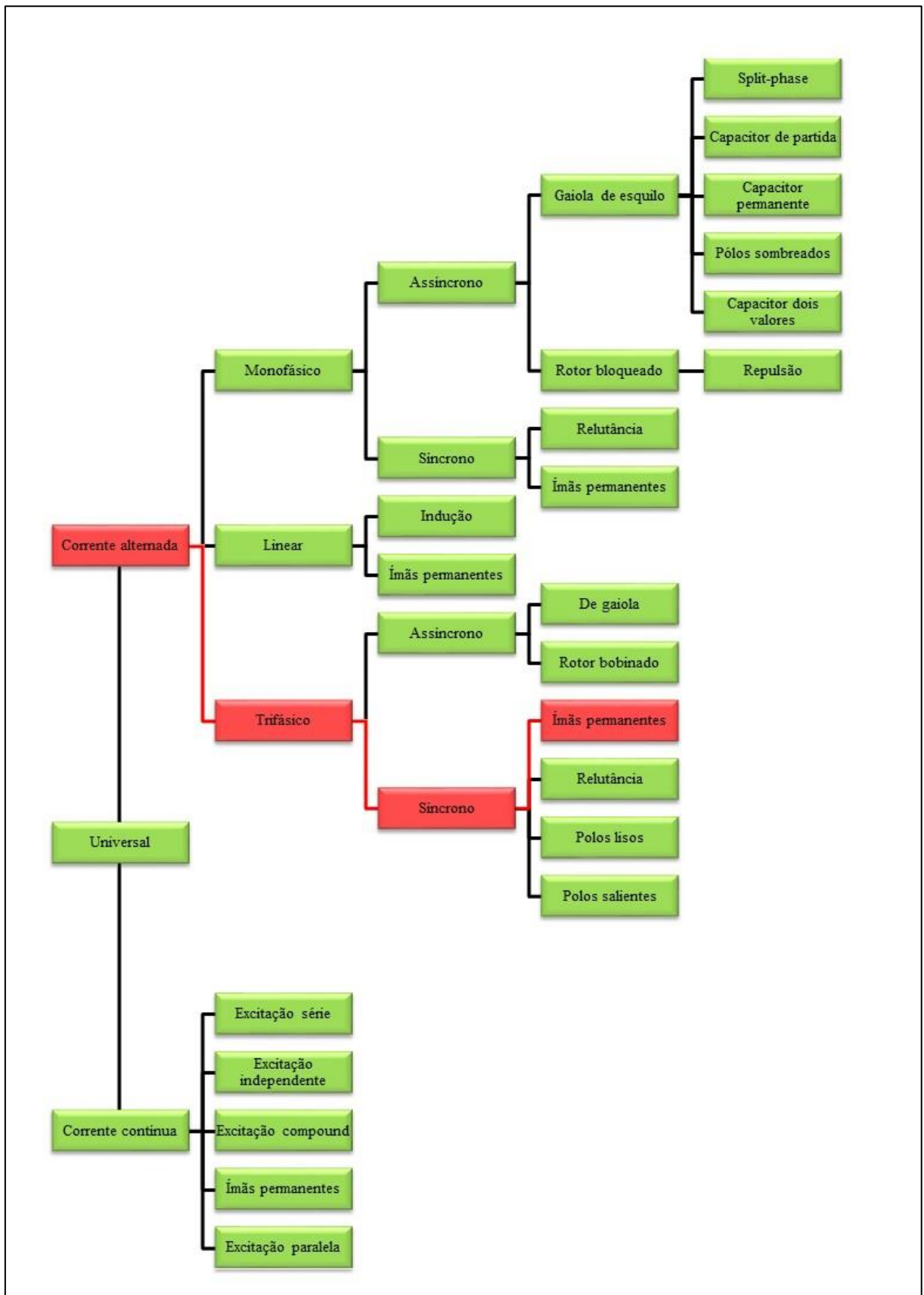
VOGES MOTORES. **SCEP - Sistema de catalogação eletrônica de produtos**. 2015. Disponível em: <<http://www.voges.com.br/catalogo/>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

VOGES MOTORES. **Produtos**. 2010. Disponível em: <http://www.voges.com.br/_arquivos/motores/motor_trifasico_linha_vtop.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2015.


WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS. **Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motor-de-imaspermanentes-e-inversor-de-frequencia-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2015.

WOBLEN WINDPOWER. **Gerador em anel**. 2015. Disponível em: <<http://www.wobben.com.br/tecnologia/gerador-em-anel/>>. Acesso em: 13 jun. 2015.

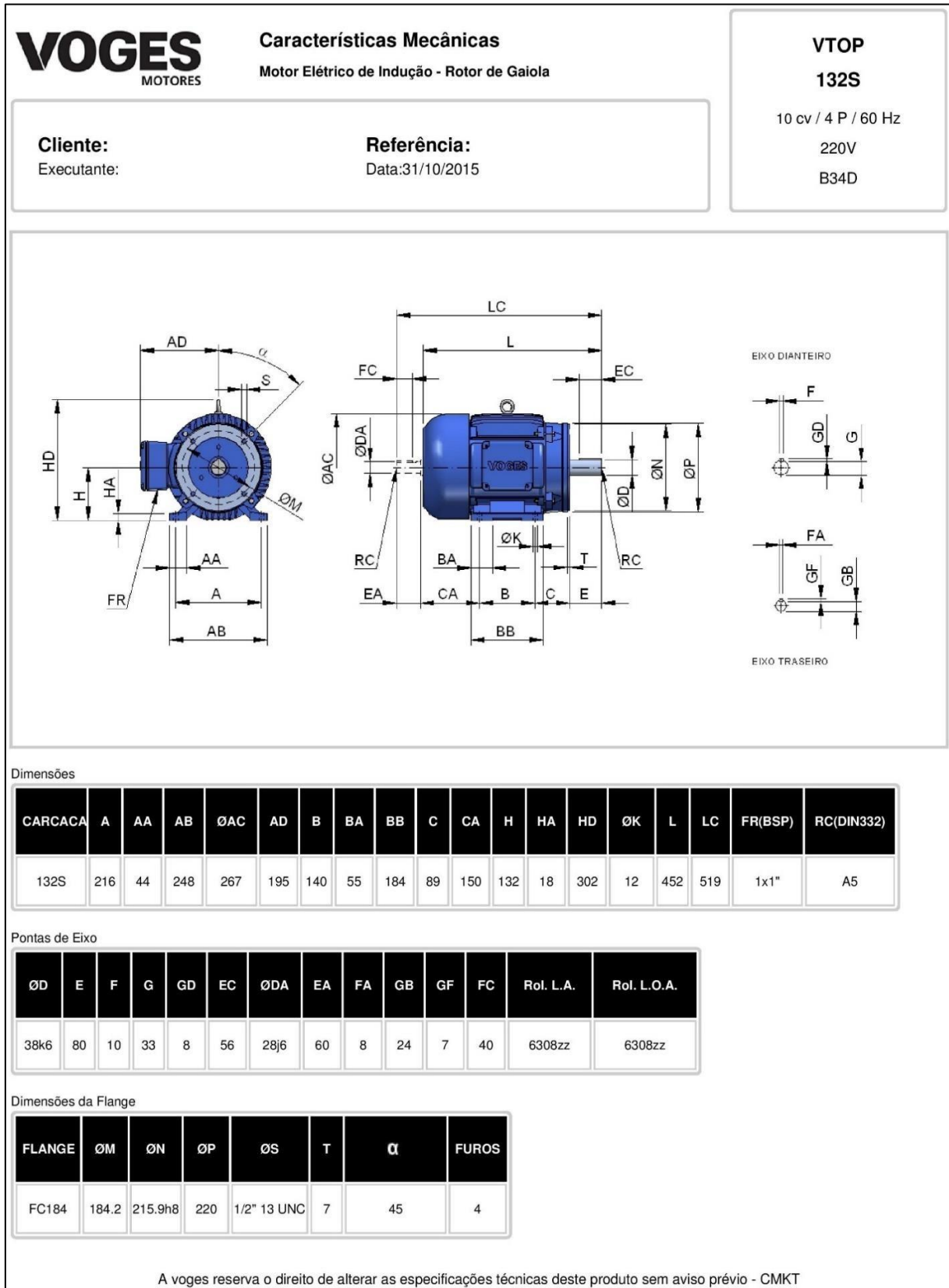
ANEXO A - CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS



ANEXO B - MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO VTOP - FOLHA DE DADOS

	Folha de Dados Motor Elétrico de Indução - Rotor de Gaiola		VTOP 132S 10 cv / 4 P / 60 Hz 220V B34D																																																																		
	Cliente: Executante:		Referência: Data:31/10/2015																																																																		
Características Gerais			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Carga</th> <th>100%</th> <th>75%</th> <th>50%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>29 Rendimento</td> <td>91.0%</td> <td>90.8%</td> <td>90.0%</td> </tr> <tr> <td>30 Fator Potência</td> <td>0.84</td> <td>0.80</td> <td>0.71</td> </tr> </tbody> </table>		Carga	100%	75%	50%	29 Rendimento	91.0%	90.8%	90.0%	30 Fator Potência	0.84	0.80	0.71																																																					
Carga	100%	75%	50%																																																																		
29 Rendimento	91.0%	90.8%	90.0%																																																																		
30 Fator Potência	0.84	0.80	0.71																																																																		
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>1 Fabricante</td> <td>Voges</td> </tr> <tr> <td>2 Potência</td> <td>10(7.5) cv(kW)</td> </tr> <tr> <td>3 Carcaça:</td> <td>132S</td> </tr> <tr> <td>4 Forma Construtiva:</td> <td>B34D</td> </tr> <tr> <td>5 Tensão do Motor</td> <td>220 V</td> </tr> <tr> <td>6 Frequência</td> <td>60 Hz</td> </tr> <tr> <td>7 Rotação Nominal</td> <td>1760 rpm</td> </tr> <tr> <td>8 Blindagem</td> <td>TFVE</td> </tr> <tr> <td>9 Grau de Proteção</td> <td>IP55</td> </tr> <tr> <td>10 Regime Tipo</td> <td>S1</td> </tr> <tr> <td>11 Fator Serviço</td> <td>1.15</td> </tr> <tr> <td>12 Tipo Rotor</td> <td>Gaiola de esquilo</td> </tr> <tr> <td>13 Método de Partida</td> <td>Direto</td> </tr> <tr> <td>14 Temperatura Ambiente</td> <td>40° C</td> </tr> <tr> <td>15 Altitude</td> <td>1000m</td> </tr> <tr> <td>16 Elevação de temperatura</td> <td>80° C</td> </tr> <tr> <td>17 Classe de Isolamento</td> <td>F</td> </tr> <tr> <td>18 IP/IN</td> <td>8.62</td> </tr> <tr> <td>19 Categoria</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td>20 Corrente a vazio</td> <td>9.01 A</td> </tr> <tr> <td>21 Corrente nominal</td> <td>25.11 A</td> </tr> <tr> <td>22 Corrente de partida</td> <td>216.51 A</td> </tr> <tr> <td>23 Conjugado nominal</td> <td>4.07 kgfm</td> </tr> <tr> <td>24 CP/CN</td> <td>300%</td> </tr> <tr> <td>25 CM/CN</td> <td>310%</td> </tr> <tr> <td>26 GD² do rotor</td> <td>0.1473 kgfm²</td> </tr> <tr> <td>27 TMRT</td> <td>10 s</td> </tr> <tr> <td>28 Ruído</td> <td>72 dB</td> </tr> </tbody> </table>			1 Fabricante	Voges	2 Potência	10(7.5) cv(kW)	3 Carcaça:	132S	4 Forma Construtiva:	B34D	5 Tensão do Motor	220 V	6 Frequência	60 Hz	7 Rotação Nominal	1760 rpm	8 Blindagem	TFVE	9 Grau de Proteção	IP55	10 Regime Tipo	S1	11 Fator Serviço	1.15	12 Tipo Rotor	Gaiola de esquilo	13 Método de Partida	Direto	14 Temperatura Ambiente	40° C	15 Altitude	1000m	16 Elevação de temperatura	80° C	17 Classe de Isolamento	F	18 IP/IN	8.62	19 Categoria	N	20 Corrente a vazio	9.01 A	21 Corrente nominal	25.11 A	22 Corrente de partida	216.51 A	23 Conjugado nominal	4.07 kgfm	24 CP/CN	300%	25 CM/CN	310%	26 GD ² do rotor	0.1473 kgfm ²	27 TMRT	10 s	28 Ruído	72 dB	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rolamentos</th> <th>Tipo</th> <th>Lubrificação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>31 L.A.</td> <td>6308zz</td> <td>Permanente</td> </tr> <tr> <td>32 L.O.A.</td> <td>6308zz</td> <td>Permanente</td> </tr> </tbody> </table>		Rolamentos	Tipo	Lubrificação	31 L.A.	6308zz	Permanente	32 L.O.A.	6308zz	Permanente
1 Fabricante	Voges																																																																				
2 Potência	10(7.5) cv(kW)																																																																				
3 Carcaça:	132S																																																																				
4 Forma Construtiva:	B34D																																																																				
5 Tensão do Motor	220 V																																																																				
6 Frequência	60 Hz																																																																				
7 Rotação Nominal	1760 rpm																																																																				
8 Blindagem	TFVE																																																																				
9 Grau de Proteção	IP55																																																																				
10 Regime Tipo	S1																																																																				
11 Fator Serviço	1.15																																																																				
12 Tipo Rotor	Gaiola de esquilo																																																																				
13 Método de Partida	Direto																																																																				
14 Temperatura Ambiente	40° C																																																																				
15 Altitude	1000m																																																																				
16 Elevação de temperatura	80° C																																																																				
17 Classe de Isolamento	F																																																																				
18 IP/IN	8.62																																																																				
19 Categoria	N																																																																				
20 Corrente a vazio	9.01 A																																																																				
21 Corrente nominal	25.11 A																																																																				
22 Corrente de partida	216.51 A																																																																				
23 Conjugado nominal	4.07 kgfm																																																																				
24 CP/CN	300%																																																																				
25 CM/CN	310%																																																																				
26 GD ² do rotor	0.1473 kgfm ²																																																																				
27 TMRT	10 s																																																																				
28 Ruído	72 dB																																																																				
Rolamentos	Tipo	Lubrificação																																																																			
31 L.A.	6308zz	Permanente																																																																			
32 L.O.A.	6308zz	Permanente																																																																			
Informações Complementares			<table border="1"> <tbody> <tr> <td>33 Desenho</td> <td>Padrao</td> </tr> <tr> <td>34 Peso total</td> <td>67Kg</td> </tr> </tbody> </table>		33 Desenho	Padrao	34 Peso total	67Kg																																																													
33 Desenho	Padrao																																																																				
34 Peso total	67Kg																																																																				
Materiais			<table border="1"> <tbody> <tr> <td>35 Tampas</td> <td>FOFO</td> </tr> <tr> <td>36 Caixa de Terminais</td> <td>FOFO</td> </tr> <tr> <td>37 Eixos</td> <td>AÇO SAE 1045</td> </tr> <tr> <td>38 Carcas</td> <td>FOFO</td> </tr> <tr> <td>39 Ventiladores</td> <td>NYLON</td> </tr> <tr> <td>40 Calotas</td> <td>AÇO SAE 1010</td> </tr> </tbody> </table>		35 Tampas	FOFO	36 Caixa de Terminais	FOFO	37 Eixos	AÇO SAE 1045	38 Carcas	FOFO	39 Ventiladores	NYLON	40 Calotas	AÇO SAE 1010																																																					
35 Tampas	FOFO																																																																				
36 Caixa de Terminais	FOFO																																																																				
37 Eixos	AÇO SAE 1045																																																																				
38 Carcas	FOFO																																																																				
39 Ventiladores	NYLON																																																																				
40 Calotas	AÇO SAE 1010																																																																				
Normalização			ABNT																																																																		
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>41 Padronização</td> <td>NBR-15623-1</td> </tr> <tr> <td>42 Especificação</td> <td>NBR-17094-1</td> </tr> <tr> <td>43 Grau de Proteção</td> <td>NBR-IEC 60529</td> </tr> <tr> <td>44 Formas Construtivas</td> <td>NBR-5031</td> </tr> <tr> <td>45 Potência Nominal</td> <td>NBR-8441</td> </tr> </tbody> </table>			41 Padronização	NBR-15623-1	42 Especificação	NBR-17094-1	43 Grau de Proteção	NBR-IEC 60529	44 Formas Construtivas	NBR-5031	45 Potência Nominal	NBR-8441																																																									
41 Padronização	NBR-15623-1																																																																				
42 Especificação	NBR-17094-1																																																																				
43 Grau de Proteção	NBR-IEC 60529																																																																				
44 Formas Construtivas	NBR-5031																																																																				
45 Potência Nominal	NBR-8441																																																																				
Observações																																																																					
A voges reserva o direito de alterar as especificações técnicas deste produto sem aviso prévio - CMKT																																																																					

ANEXO C - MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO VTOP - CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS



ANEXO D - MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO VTOP - CARACTERÍSTICA DE DESEMPENHO

Potência		Carcaça (ABNT)	Rotação (rpm)	Corrente		
cv	kW			In(A)	Ip(A)	Io(A)
10	7.5	132S	1760	25.11	216.51	9.01

Conjugado				Rendimento			Fator Potencia		
Cn(kgfm)	Cp/Cn(%)	Cm/Cn(%)	Frenagem(kgfm)	50%	75%	100%	50%	75%	100%
4.07	300	310	6.80	90.0%	90.8%	91.0%	0.71	0.80	0.84

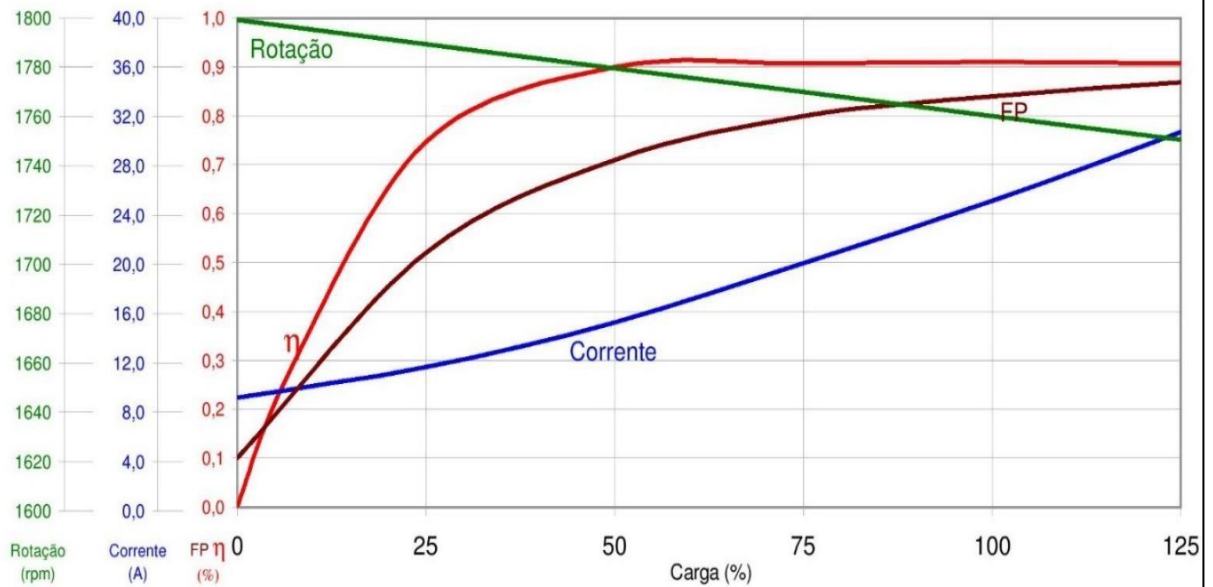
Fator Serviço	Escorregamento %	Ip/In	Isolação	GD ² (kgfm ²)	Massa(kg)	TMRT(s)	Ruído(dB)
1.15	2.22	8.62	F	0.1473	67	10	72



A voges reserva o direito de alterar as especificações técnicas deste produto sem aviso prévio - CMKT

Cliente: **Motor:** **Vtop** **132S** **10,0 cv** **220 V** **60 Hz** **4 POLOS**
 Referência Cliente:

Característica de Desempenho



Característica Torque/Corrente x Velocidade

