

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**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**

FELIPE GUIMARÃES RAMOS

Dissertação para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**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**

FELIPE GUIMARÃES RAMOS
Engenheiro de Controle e Automação

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2015

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Vicente Mariano Canalli
PUCRS

Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias
FEEVALE

Prof. Dr. Eng. Vilson Gruber
UFSC

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado.”

Roberto Shinyashiki

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ing. Lírio Schaeffer pela confiança em mim depositada, me orientando nesta dissertação de mestrado.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela disponibilização da infra-estrutura durante a execução deste projeto.

Ao Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias, pelo auxílio nas dúvidas ao longo deste período, além do incentivo durante as pesquisas e pela grande amizade neste curto período de tempo.

Aos demais colegas do LdTM pelo auxílio quando necessário e pela amizade.

Ao GDER, pela dedicação em nossos projetos, pela parceria nos trabalhos desenvolvidos e pela grande amizade que criamos.

Aos meus familiares, por terem dado todo apoio necessário em qualquer situação e sem os quais não estaria na posição que me encontro hoje.

A FAPERGS pela bolsa de mestrado que me financiou neste período.

À FINEP pelo fornecimento de recursos financeiros que proporcionaram a execução deste Projeto de pesquisa.

A todos que colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. Introdução	18
2.2. Magnetização	18
2.2.1. Curvas de Histerese	18
2.2.2. Resistividade Elétrica	20
2.2.3 Materiais Magnéticos Macios e Duros	22
2.2.4 Estudos das Ligas	23
2.3. Máquinas Elétricas Síncronas	26
2.3.1. Máquina Síncrona com Ímã Permanente:.....	28
2.4. Aerogeradores	32
3. PROCEDIMENTOS E ANÁLISE EXPERIMENTAL	33
3.1. Introdução	33
3.2. Obtenção dos Corpos de Prova de Fe ₂ P.....	33
3.2.1. Matrizes dos Corpos de Prova para Ensaio	33
3.2.2. Ensaio de Magnetização e Histerese	36
3.3. Projeto da máquina Torus 1kW	40
3.3.1. Introdução.....	40
3.3.2. Núcleo do Estator	42
3.3.3. Especificações dos Ímãs	42
3.3.4. Projeto do Estator	42
3.4. Montagem da Máquina	47

3.4.1. Obtenção do Núcleo do Estator.....	47
3.4.2. Bobinamento.....	50
3.4.3. Montagem Final.....	51
3.5. Ensaio da Máquina	51
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	52
CONCLUSÕES	58
SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	59
BIBLIOGRAFIA.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motores projetados e construídos no laboratório GDER [1- [4]; 2 - [5]; 3- [6]; 4- [7]; 5- [8]; 6- [3]].....	17
Figura 2 - Ciclo de histerese para um material magnético [10].....	19
Figura 3 - Ciclo de histerese para material magnético duro e macio [13].....	20
Figura 4 - Perdas por histerese das ligas ensaiadas [10]	24
Figura 5 - Permeabilidade magnética das ligas ensaiadas [3]	25
Figura 6 - Indução de saturação das ligas ensaiadas [3].....	25
Figura 7 - Comparativo resistividade das ligas ensaiadas [3]	26
Figura 8 - Condutor movimentado campo magnético B [23].....	26
Figura 9 - Máquinas Elétricas - Motores CA – Topologias [27].....	28
Figura 10 - (a) Máquina de fluxo radial e (b) Máquina de fluxo axial [29]	29
Figura 11 - Topologias máquinas de fluxo axial (a) Tipo Norte - Norte e (b) Tipo Norte - Sul [28]	30
Figura 12 - Representação planificada da Torus [31].....	31
Figura 13 - Máquina Torus fluxo axial [30]	31
Figura 14 - Gerador eólico Enersud com turbina de eixo vertical.....	32
Figura 15 - Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro	33
Figura 16 - Geometria matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro (arquivos GDER).....	34
Figura 17 - Desenho de montagem da matriz de compactação na forma de cilindro.....	34
Figura 18 - Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel [(a) - punção superior; (b) - matriz interna; (c) – punção inferior; (d) – matriz externa]	35
Figura 19 - Geometria matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel (arquivo GDER)	35
Figura 20 - Desenho de montagem da matriz de compactação na forma de anel	35
Figura 21 - Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolando secundário e (d) enrolamento do primário.....	36
Figura 22 - Anel de Roland	36
Figura 23 - Equipamento Remagraph-Remacomp C-710	37
Figura 24 - Conectores de entrada do equipamento Remagraph-Remacomp C-710	38

Figura 25 - Curva de histerese Fe2%P [relação entre indução magnética B e campo magnético H]	38
Figura 26 - Corpo de prova com corte conectado aos cabos para medição da resistividade	40
Figura 27 - Ohmímetro digital utilizado para a obtenção da resistência das amostras	40
Figura 28 - Estator Enersud	41
Figura 29 - Peças do rotor do gerador Enersud	41
Figura 30 - Estrutura gerador Enersud	41
Figura 31 - Núcleo do estator	42
Figura 32 - Medidas do núcleo toroidal	43
Figura 33 - Dimensões matriz de compactação das peças do núcleo do estator	45
Figura 34 - Medidas do punção inferior da matriz de compactação	45
Figura 35 - Matriz com punções.....	46
Figura 36 - Matriz fixada na prensa FKL.....	46
Figura 37 - Peça de Fe2%P que compõem o núcleo, após sinterização.....	47
Figura 38 - Peças montados com encaixes formando o núcleo.....	48
Figura 39 - Desenho da peça usinada sobreposta a peça sinterizada (medidas em mm)	48
Figura 40 - Desenho de peça já usinada (medidas em mm).....	49
Figura 41 - Peça sinterizada comparando com as peças usinadas com os encaixes.....	49
Figura 42 - Peças usinadas encaixadas formando núcleo do estator	50
Figura 43 - Comparativo entre núcleo comercial (laminado) e núcleo com peças sinterizadas	50
Figura 44 - Potência consumida acionamento do motor em vazio (Dados fornecidos pelo fabricante).....	52
Figura 45 - Gráfico de potência gerada por RPM máquina Fe2%P	53
Figura 46 - Comparativo de potência elétrica gerada núcleo Fe2%P e laminado.....	54
Figura 47 - Potência elétrica e mecânica dos geradores com núcleo sinterizado e laminado	55
Figura 48 - Comparativo eficiência de conversão dos geradores.....	55
Figura 49 - Curva tendência potência mecânica gerador em vazio.....	56
Figura 50 - Comparativo entre a diferença potência mecânica e a potência em vazio.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	Área da superfície para compressão	[mm ²]
<i>B</i>	Indução magnética	[G] ou [T]
<i>B_m</i>	Indução de Saturação	[T]
<i>B_r</i>	Retentividade magnética ou magnetização remanente	[T]
<i>C_t</i>	Contração da amostra	[%]
<i>Desp</i>	Densidade de espiras	N/C
<i>d_{ext}</i>	Diâmetro externo	[mm]
<i>D_f</i>	Diâmetro final	[mm]
<i>D_i</i>	Diâmetro inicial	[mm]
<i>d_{int}</i>	Diâmetro interno	[mm]
<i>D_m</i>	Densidade do material	[kg/m ³]
<i>F</i>	Força	[N]
<i>f</i>	Frequência	[Hz]
<i>F_i</i>	Força perpendicular ao campo magnético	[N]
<i>H</i>	Campo magnético	[Oe] ou [A/m]
<i>H_c</i>	Coercitividade máxima ou força coercitiva	[A/m]
<i>H_f</i>	Altura final	[mm]
<i>H_i</i>	Altura inicial	[mm]
<i>I</i>	Corrente elétrica	[A]
<i>J</i>	Densidade de corrente	[A/m ²]
<i>K</i>	Constante relacional	N/C
<i>L</i>	Comprimento do condutor	[m]
<i>l</i>	Comprimento	[mm]
<i>N_p</i>	Número de espiras no enrolamento primário	N/C
<i>n_s</i>	Velocidade síncrona	RPM
<i>P</i>	Pressão	[Pa]
<i>p</i>	Número de polos da máquina.	N/C
<i>Ph</i>	Perdas por histerese	[W/kg]

R	Resistência elétrica	[Ω]
ω_r	Rotação do motor	rpm
T	Temperatura	[$^{\circ}\text{C}$]
V	Tensão elétrica	[V]
v	Velocidade	[m/s]
P	Potência	[W]

Símbolos Gregos:

ρ	Resistividade elétrica da barra	[$\Omega\cdot\text{m}$]
μ	Permeabilidade magnética	N/C
μ_{max}	Permeabilidade magnética máxima	[H/m]
μ_r	Permeabilidade magnética relativa	N/C
\emptyset	Diâmetro	[mm]

LISTA DE ABREVIATURAS

Am	Amostra
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
f.e.m.	Força eletro motriz
GDER	Grupo de Energias Renováveis
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
MP	Metalurgia do Pó
N_e	Nº de espiras de uma bobina
PE	Potência Elétrica
PM	Potência Mecânica
rpm	Rotações por minuto
St	Amostra sinterizada
TCH	Traçador de Curva de Histerese
Vcc	Fonte de tensão de corrente continua
NN	Posicionamento de ímãs de mesmo polo magnético norte - norte
NS	Posicionamento de ímãs de polos magnéticos diferentes norte - sul

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo a utilização do núcleo de estator de uma máquina elétrica construído a partir do processo da Metalurgia do Pó utilizando a liga ferro com 2% fósforo (Fe2%P). O núcleo obtido substitui o núcleo comercial (laminado) do gerador síncrono de ímãs permanentes com potência de 1kW. O gerador elétrico utilizado no trabalho é encontrado em geradores eólicos de pequeno porte. Esta máquina elétrica é um gerador com fluxo axial excitado através de ímãs permanentes, sendo nomeada de Torus por utilizar um núcleo em formato toroidal. Foram realizados ensaios de rendimento do gerador em bancada com ambos os núcleos, comercial e o concebido a partir de metalurgia do pó. Com estes ensaios foi possível a comparação do desempenho da máquina com os dois núcleos. O núcleo do estator obtido pelo processo de metalurgia do pó obteve rendimentos elétricos equivalentes ao da máquina utilizando núcleo comercial, porém durante o teste em vazio o gerador com núcleo de Fe2%P apresentou uma potência mecânica de acionamento superior a máquina utilizando núcleo comercial. A máquina com núcleo comercial possui uma eficiência geral de no mínimo oito por cento superior a máquina que utiliza núcleo do estator com Fe2%P.

Palavras-chave: Máquina Elétrica, Máquina Torus, Metalurgia do Pó, Núcleo do Estator Sinterizado.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to use the stator core of an electrical machine built from the Powder Metallurgy process using iron alloy with 2% (Fe 2% P). The core obtained replaces the commercial core (laminated) of the synchronous generator with permanent magnet power of 1kW. The electric generator used at work is found in small wind generators. This electric machine is a generator with an axial flow excited by permanent magnets that have been named Torus for using a core in the toroidal format. Bench Generator performance tests were conducted with both the commercial and the powder metallurgy designed cores. With these tests, a comparison between the machine's performance and both cores was possible. The stator core obtained by the powder metallurgy process achieved an electrical performance equivalent to that of the machine using the commercial core, however, during the no load test, the generator with the Fe2% P core presented a higher mechanical power drive to that of the machine using the commercial core. The machine with a commercial core has an overall efficiency of at least eight per cent higher than that of the machine that uses the stator core with Fe2%P.

Keywords: Electrical Machine, Torus Machine, Powder Metallurgy, Sintered Stator Core.

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica é uma opção de energia limpa e renovável sendo utilizada para suprir regiões remotas ou como complemento da matriz energética de um país. Obtida através da força dos ventos, a energia eólica é a fonte de energia elétrica que mais tem apresentado crescimento no Brasil dentre os atuais sistemas: hidroelétrica, energia solar, termoelétrica e energia nuclear. Ademais o Brasil é um dos países que apresenta maior potencial de energia eólica, representando cerca de 4% do total de energia para o sistema e deve crescer fortemente nos próximos anos, podendo chegar a 10% em 2018[1].

Recentemente houve uma grande mudança no Brasil no setor de energia. A criação da resolução normativa 482/2012 que trata de micro geração e geração distribuída, aumentando a vantagem de retorno financeiro para comércios e residências que se interessam em gerar energia em suas próprias propriedades. Esta resolução veio impulsionar o setor de geradores eólicos de pequeno porte e painéis fotovoltaicos.

O principal componente do sistema eólico é o gerador elétrico. A utilização de um gerador elétrico bem dimensionado e projetado é de suma importância para manter um alto nível de eficiência de conversão e dar uma longa vida útil para o equipamento.

Ademais, a geração distribuída se torna mais interessante quando observado a situação dos veículos de transporte. Os veículos que utilizam combustíveis com derivados de petróleo são responsáveis por grande parte das emissões de poluente[2]. O atual aumento de circulação de veículos elétricos cria um maior atrativo à energia distribuída, sendo possível gerar a energia na própria propriedade consumindo-a posteriormente no próprio transporte privado. Uma vez que durante a noite há uma maior velocidade dos ventos, é o mesmo período que o veículo pode ser carregado, diminuindo a demanda necessária da concessionária, e a necessidade de adequação da rede distribuidora.

O Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM da UFRGS, em parceria com outras instituições como a FEEVALE-RS, a ULBRA-RS, o CEFET-RS e a UCS-RS vêm de longa data, realizando constantes pesquisas para o desenvolvimento de novos materiais e processos que demonstram maior eficiência, rendimento e menores custos na construção de máquinas elétricas, estas com aplicações em geradores eólicos.

A Metalurgia do Pó (MP) é uma técnica de conformação mecânica, utilizada na fabricação de componentes de diferentes aplicações, onde no final do processo a peça possui sua geometria e o tamanho acabados, sem a necessidade de realizar processos de usinagem. Além disto, o processo possui perda de matéria prima praticamente nula, não havendo desperdício de material, fazendo com que este processo seja economicamente viável comparado a outros processos como laminação, estampagem, usinagem e fundição.

O Grupo de Energias Renováveis (GDER) do LdTM já realizou estudos de misturas de pó de ferro com diferentes percentuais de fósforo, silício e níquel com a finalidade de analisar suas propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas. As ligas sinterizadas, previamente estudadas no GDER, foram: Ferro Puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50%Ni.

Tendo em vista os trabalhos anteriores, das ligas magnéticas estudadas pelos pesquisadores do GDER, a que obteve maior rendimento magnético para aplicação em núcleos de máquinas elétricas foi mistura de ferro com dois por cento fósforo [3].

Com o intento de dar continuidade aos trabalhos realizados no GDER sobre ligas e aplicações em protótipos de máquinas elétricas rotativas (Figura 1), este trabalho tem como objetivo a aplicação de um núcleo de estator utilizando a liga Fe2%P obtido por metalurgia do pó em uma máquina síncrona de ímãs permanentes. O objetivo específico é o estudo do desempenho da máquina utilizando núcleo do estator de Fe2%P em comparação ao núcleo comercial feito de chapas de aço laminadas.

Para garantir a fidelidade da liga Fe2%P, que provém de pós de Fe e de Fe3P de lote diferentes aos utilizados pelos pesquisadores anteriores do laboratório, são realizados novamente alguns dos ensaios magnéticos no capítulo dois, onde serão comparados aos já estudados.

A máquina elétrica utilizada para a substituição do núcleo magnético do estator é uma máquina síncrona com ímãs permanentes de fluxo axial com núcleo toroidal, conhecida como máquina Torus. Esta topologia de máquina é utilizada, em sua maioria, em geradores eólicos, no caso deste trabalho é utilizada em aerogeradores de 1kW.

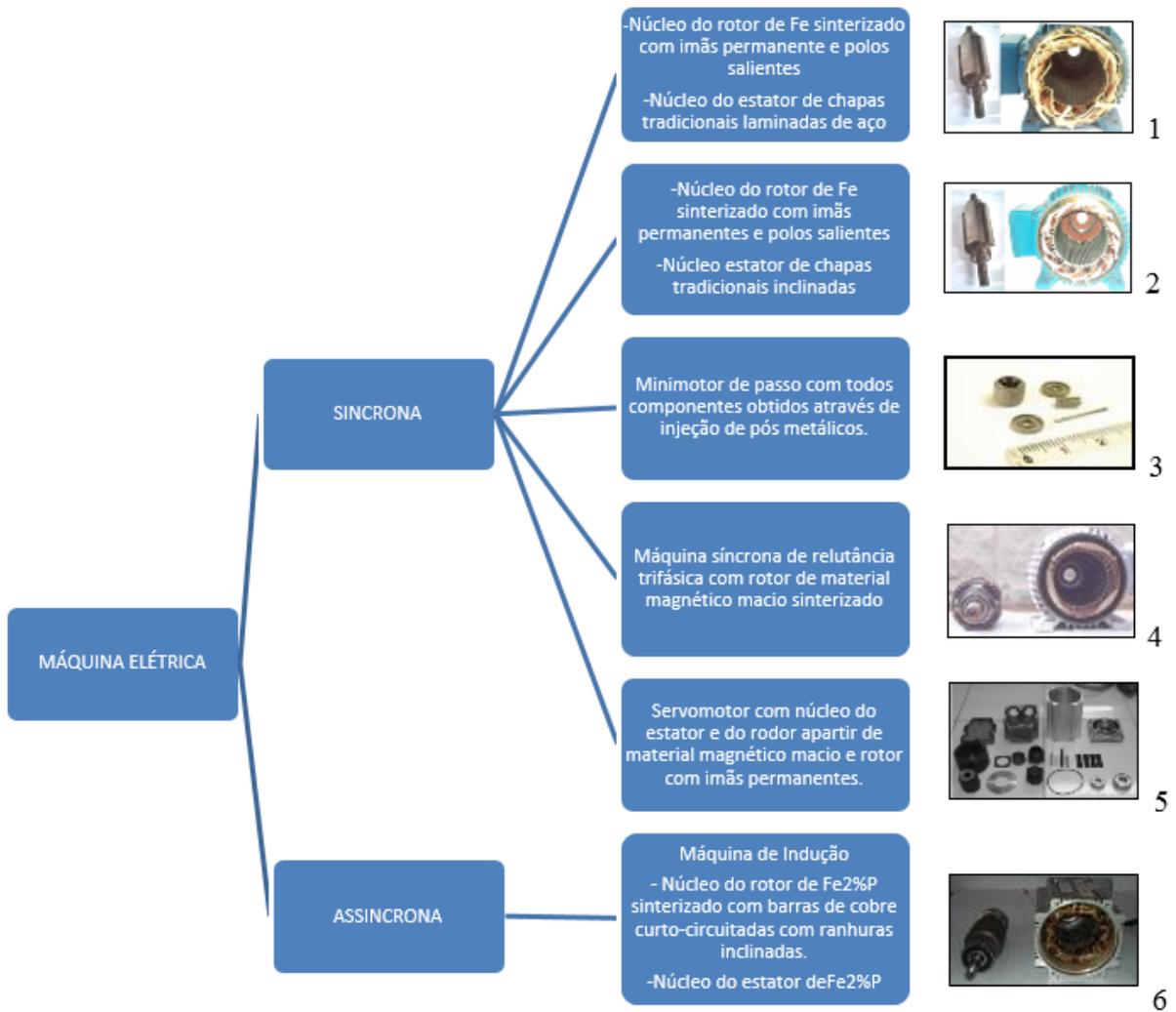


Figura 1 - Motores projetados e construídos no laboratório GDER [1- [4]; 2 - [5]; 3- [6]; 4- [7]; 5-[8]; 6-[3]]

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, sobre assuntos importantes dentro da literatura, que são necessários para o entendimento e compreensão deste trabalho. Os assuntos aqui abordados abrangem principalmente a área de máquinas elétricas com ênfase na Máquina Síncrona com Ímã Permanente e Materiais Magnéticos obtidos por Metalurgia do Pó.

2.2. Magnetização

O estudo das máquinas elétricas inicia pela compreensão das principais grandezas físicas que estão relacionadas com o eletromagnetismo. Faz-se necessário um estudo sobre os materiais magnéticos utilizados nos núcleos das máquinas elétricas, estes núcleos têm como objetivo direcionar o fluxo magnético de forma a aumentar a intensidade magnética nos enrolamentos e conseqüentemente, o rendimento da máquina. Com esta revisão será demonstrado como é submetido a curva de histerese e a resistividade elétrica de um material. Como isto influencia na escolha do material, como também a diferença entre um material magnético macio e um material magnético duro.

Todo material ferromagnético desmagnetizado após ser submetido à magnetização, quando não mais sob influência de um campo externo, não retorna ao seu estado original, desmagnetizado. As máquinas elétricas são constituídas por circuitos elétricos e magnéticos acoplados entre si. O circuito magnético oferece um caminho para o fluxo magnético, da mesma forma que um circuito elétrico oferece um caminho para a corrente elétrica. Nas máquinas elétricas os condutores percorridos por correntes interagem com os campos magnéticos resultando na conversão eletromecânica de energia [8].

2.2.1. Curvas de Histerese

Quando uma bobina é excitada por uma corrente elétrica I , um campo magnético H é gerado no seu interior. Colocando-se um material no interior da bobina o mesmo sofre uma indução magnética B . Se o material for diamagnético ou paramagnético poucas linhas de fluxo magnético serão induzidas e a relação $B \times H$ será aproximadamente linear. No caso do

material ser ferromagnético muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno da magnetização) e a relação $B \times H$ apresenta as características de uma curva similar a Figura 2. Este efeito é denominado curva da histerese ou ciclo de histerese [9].

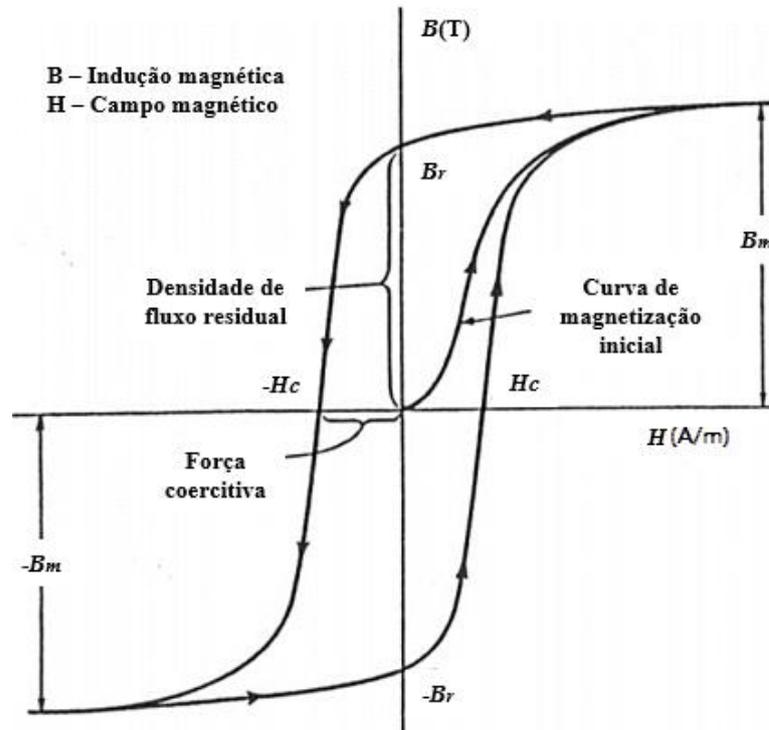


Figura 2 - Ciclo de histerese para um material magnético [10]

O ponto em que a curva corta o eixo de B no quadrante superior esquerdo é denominado de indução remanente e representa a indução magnética residual que permanece no material mesmo com a retirada do campo gerado pela bobina, ou seja, $H = 0$ [7].

O ponto em que a curva corta o eixo de H no mesmo quadrante é denominado de força coercitiva ou coercitividade (quando o material foi saturado) e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ($B = 0$). Outro fator importante na identificação dos materiais magnéticos é o produto energético $BH_{máx}$ que está associado com a densidade de energia armazenada no material[11].

A Figura 3 mostra dois ciclos de histerese, um largo que representa um material magnético duro também conhecido como ímã permanente, e um estreito que representa um material magnético macio. Os materiais magnéticos duros também são conhecidos por ímãs permanentes e devem apresentar elevada retentividade e coercitividade. Os materiais magnéticos macios são os aços magnéticos em geral (com exceção de algumas ligas de aço

inox que são paramagnéticas) utilizados na construção de núcleos magnéticos, e as ferritas macias utilizadas na construção de indutores [12].

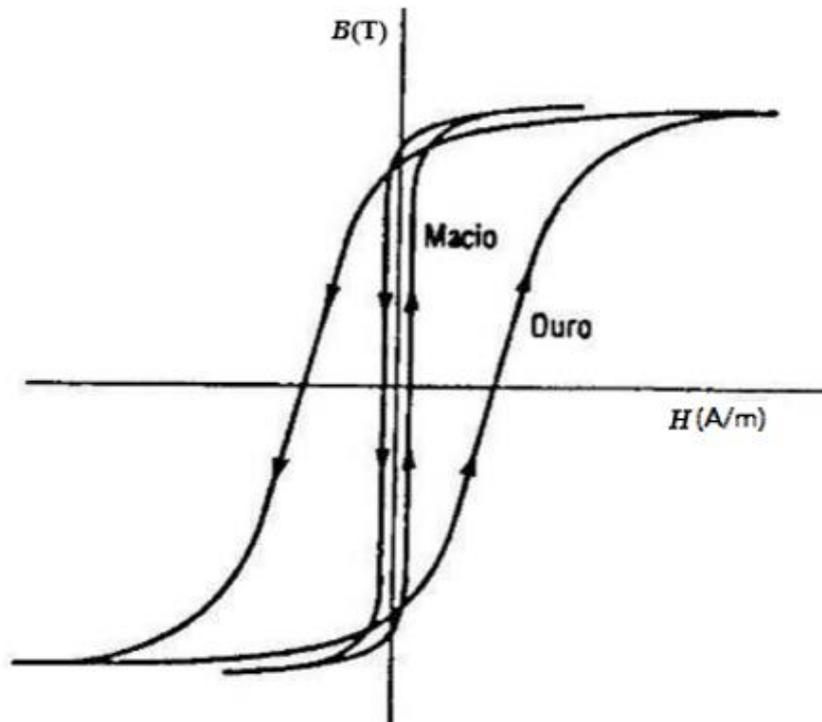


Figura 3 - Ciclo de histerese para material magnético duro e macio [13]

Para determinação das curvas de histerese é seguido a norma ASTM A773 (*Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresigraphs*). Este método fornece o procedimento de obtenção de curvas de histerese através de um Traçador de Curvas de Histerese Magnética, modelo *TLMP-TCH-14*, para determinação de propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide).

2.2.2. Resistividade Elétrica

Todo dispositivo eletromagnético alimentado por corrente alternada apresenta tensões induzidas no núcleo de ferro do dispositivo. Sendo assim, haverá correntes induzidas neste núcleo. Tanto o estator como o rotor são geralmente construídos com chapas laminadas e isoladas eletricamente, com este isolamento restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação [7].

O material para aplicação em núcleos magnéticos devem possuir uma alta resistência elétrica, ou seja, dificultar a passagem de corrente elétrica. Por estes motivos não se utiliza

materiais maciços, apesar destes possuírem alta permeabilidade magnética e alta indução de saturação, possuem baixa resistividade elétrica[14].

Uma alternativa de se aumentar a resistência elétrica do material sem perder muito com a indução de saturação e permeabilidade magnética é a utilização do processo de Metalurgia do Pó para fabricação de núcleos[15].

Na Metalurgia do Pó, quando adicionados silício, fósforo ou níquel ao ferro sinterizado ocorre aumento da resistência elétrica do material. A adição de silício ao ferro eleva a resistividade e aumenta a permeabilidade magnética relativa máxima diminuindo a coercividade e a indução de saturação[16].

A determinação da resistividade elétrica de materiais pode ser realizada a partir da resistência elétrica de corpos com geometria perfeitamente conhecidas. Aplica-se uma tensão na amostra e mede-se a corrente elétrica. O inverso é mais prático, ou seja, aplica-se uma corrente e mede-se a tensão. Portanto, a amostra para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. A Lei de Ohm estabelece que:

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{eq(1)}$$

Onde, R , resistência [Ω], V , tensão [V] e I , corrente [A]. A resistividade elétrica da barra, ρ , é calculada por:

$$\rho = R \frac{A}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l} \quad \text{eq(2)}$$

Considerando:

ρ - Resistividade Elétrica ($\Omega \cdot m$)

R - Resistência (Ω)

l - Comprimento do Anel (m)

A - Área da Seção Transversal (m^2)

V - Tensão (V)

I - Corrente (A)

2.2.3 Materiais Magnéticos Macios e Duros

Entre os materiais magnéticos duros é possível distinguir dois tipos “ímãs clássicos” e “modernos”. O primeiro grupo consiste em ligas com baixa densidade de energia, causadas pelos efeitos da anisotropia magnética dos precipitados. O segundo grupo é caracterizado por ímãs com uma densidade de energia consideravelmente mais elevada e estes são baseados nos compostos inter-metálicos de metal de transição/terra-rara, que fornecem uma elevada anisotropia magneto-cristalina [17].

Durante as últimas décadas diferentes tipos de materiais magnéticos duros foram desenvolvidos, incluindo algumas ligas como Fe-Ni, Fe-Ni-P, Fe-Nd-B e Fe-Si. Diferentes aspectos de processamento, propriedades, efeito de aditivos nas propriedades magnéticas e aplicações dessas ligas são discutidas por muitos pesquisadores. Novos materiais incluindo materiais amorfos, materiais nanocristalinos e hoje compósitos magnéticos macios estão na história do desenvolvimento em materiais magnéticos[18].

Os ímãs de neodímio foram introduzidos primeiramente em 1982, simultaneamente por Sumitomo Specialty Metals (Japão) e por General Motors (EUA) e finalmente comercializado a partir de 1986. Estes ímãs são usados extensivamente na indústria de energias renováveis (aerogeradores), automobilística (motores, sistemas de freio, alto-falantes estereofônicos), eletrônica (sensores, unidades de disco rígido de computadores)[19].

Os ímãs permanentes mais comercializados atualmente são os cerâmicos (ferritas), as ligas de AlNiCo e os chamados de terras raras, como samário-cobalto e neodímio-ferro-boro. Com exceção do AlNiCo fundido, todos são obtidos através dos processos da MP. Desta forma, os ímãs comercializados no presente, compreendem quatro grandes grupos, sendo que os ímãs sinterizados de ferritas o maior deles. Os ímãs de AlNiCo compõem 9,23% da produção mundial de ímãs e podem ser obtidos por sinterização ou fundição. O terceiro grupo é composto por ímãs laminados como o FeCoCr, entre outros. O grupo mais recente pertence a ímãs de terras raras como o samário-cobalto (Sm-Co) e o neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B), também sinterizados, que correspondem a 23,76%, e são os mais poderosos ímãs produzidos atualmente. Nesses quatro grupos, os materiais mais importantes são aqueles obtidos por sinterização[20].

Os valores do produto energético e da coercividade dos ímãs de NdFeB são mais elevados em comparação aos outros e a indução remanescente apresenta um valor

relativamente alto, O porém deste material reside nas características térmicas, a temperatura normal de funcionamento é menor que as temperaturas de funcionamento é em torno de 150°C, assim como a temperatura de Curi é igualmente baixa, entre 300 a 320°C[21].

Os projetos de algumas máquinas consideram em temperaturas de trabalho maiores que 150°C, porém em máquinas de fluxo axial, quando dada a devida importância a refrigeração, é possível o trabalho em temperaturas menores, não prejudicando assim as características magnéticas do ímã de Nb-Fe-B [19].

Um material magnético macio para aplicação como núcleos magnéticos, deve apresentar algumas propriedades físicas de interesse[4].

Permeabilidade magnética relativa (μ_r): Quanto maior a permeabilidade magnética relativa das ligas, menor o campo magnético no núcleo e maior o campo no entreferro. Em uma máquina elétrica rotativa (motor ou gerador), o entreferro (espaço compreendido entre o núcleo do rotor e estator), deve apresentar um elevado campo magnético (mais precisamente a maior indução magnética possível). No caso de um motor elétrico, o conjugado eletromagnético (torque) desenvolvido na ponta de eixo pela máquina é proporcional ao fluxo magnético de entreferro (fluxo, indução e campo magnético são grandezas relacionadas e proporcionais). No caso de um gerador, a tensão induzida nos enrolamentos de armadura também é proporcional ao fluxo de entreferro. Ligas ferrosas proporcionam alta permeabilidade magnética e baixas perdas totais, resultando em dispositivos com alta eficiência.

Indução de Saturação (B_m): Quanto maior a indução de saturação, maior será o fluxo de entreferro. A saturação magnética limita a indução, ou seja, aquela região da curva de histerese do material onde, mesmo com o aumento do campo magnético, a indução magnética pouco se altera.

Coercitividade (H_c) e Retentividade (B_r): O ideal é a curva de histerese se aproxime de uma reta, ou seja, baixas coercitividade e retentividade. A área no centro da curva de histerese representa as perdas por ciclo de histerese em um dispositivo eletromagnético.

2.2.4 Estudos das Ligas

Os materiais testados em estudos anteriores no LdTM-GDER foram as seguintes ligas: Fe; Fe1%P; Fe2%P; Fe3%P; Fe1%Si; Fe3%Si; Fe5%Si e Fe50%Ni. Estes materiais foram

submetidos a ensaios de histerese, magnetização normal e resistividade. Na Figura 4 é possível verificar as perdas por histerese dos diferentes materiais testados.

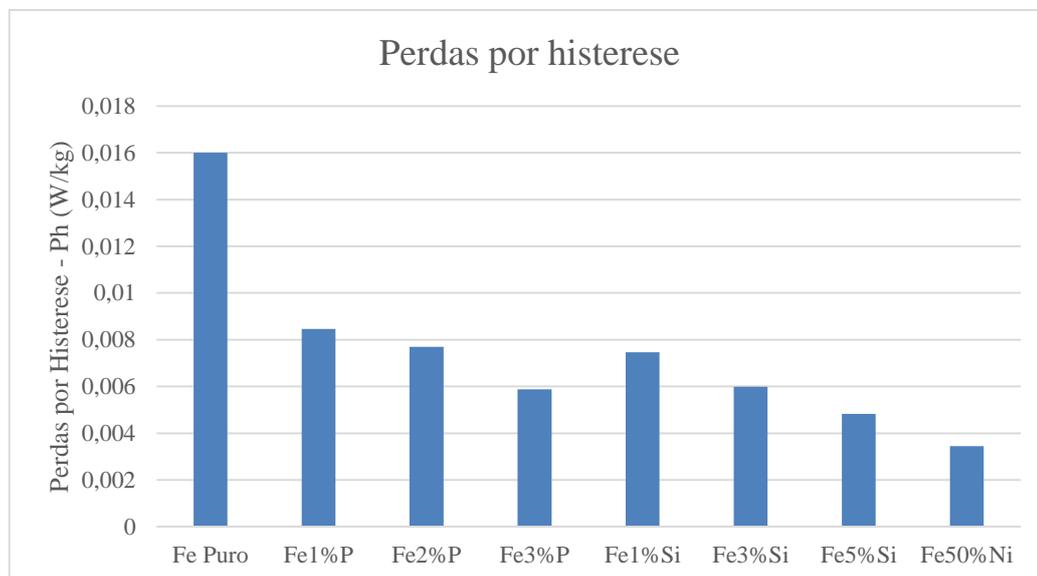


Figura 4 - Perdas por histerese das ligas ensaiadas [10]

É possível observar que a liga Fe50%Ni foi a liga que obteve menor perda 0,00345 W/kg, em contra partida o pó sinterizado de Fe puro obteve a maior perda por histerese das ligas comparadas. A Figura 5 apresenta o comparativo da permeabilidade magnética relativa entre as ligas estudadas. A Figura 6 ilustra a indução de saturação de cada material.

Considerando os ensaios realizados, perdas por histerese, permeabilidade, indução de saturação do material, curva de magnetização, a formulação com 2% de fósforo mostrou-se mais promissora para aplicação em núcleos magnéticos, indicando que o acréscimo deste elemento até este percentual é benéfico ao material. Este resultado é observado através da permeabilidade magnética e indução de saturação de cada material. Quanto maior a permeabilidade magnética mais facilidade em realizar o alinhamento dos domínios magnéticos [3].

Com os testes de curvas de histerese, magnetização e resistividade realizados nas ligas constata-se que a liga Fe2%P apresenta melhores resultados em relação as demais. A perda por ciclo de histerese ficou em $7,69 \times 10^{-3}$ W/kg, a indução de saturação próxima a 1,36 T. A permeabilidade relativa μ_r ficou em 4198,7, superando a do ferro puro em mais de 220%. Já se tratando da força coerciva foram bastante semelhantes entre as ligas [3].

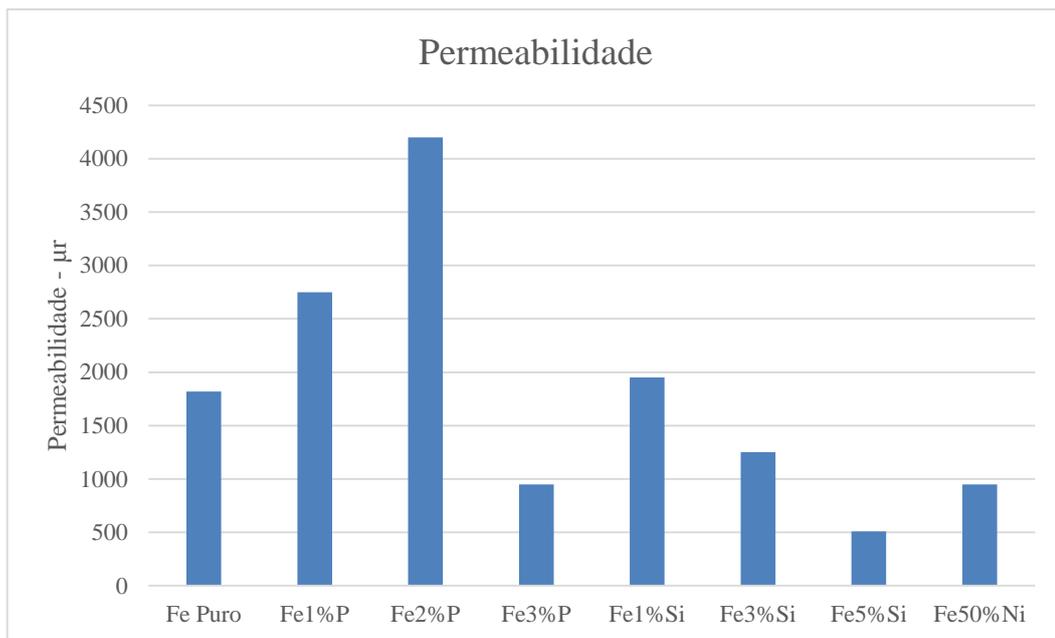


Figura 5 - Permeabilidade magnética das ligas ensaiadas [3]

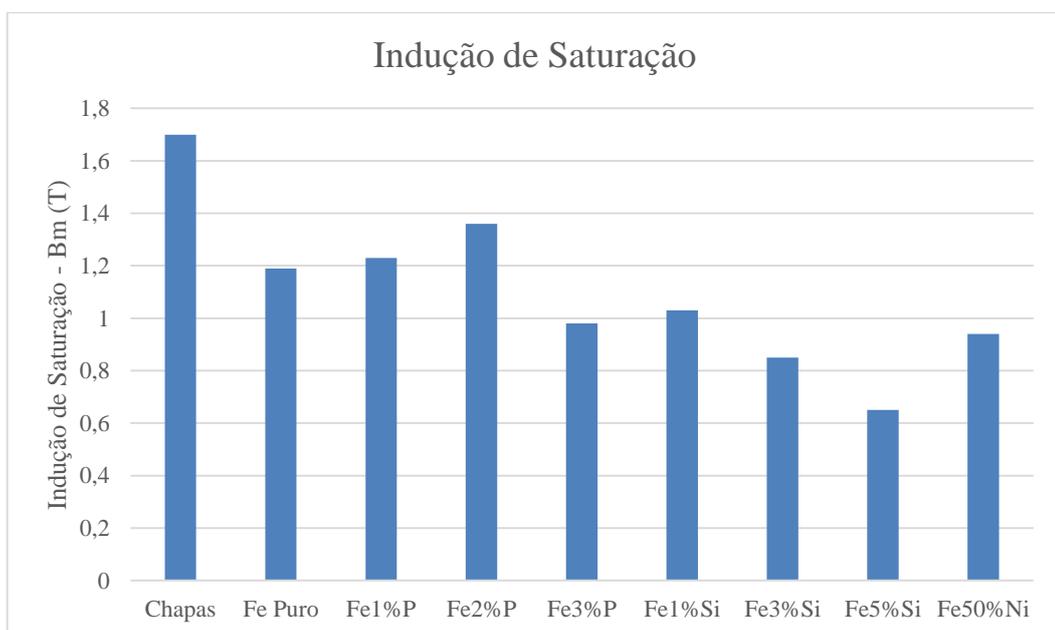


Figura 6 - Indução de saturação das ligas ensaiadas[3]

A resistividade da liga Fe2%P ficou na ordem de $4,21 \times 10^{-7} \Omega.m$, contra $1,56 \times 10^{-7} \Omega.m$ utilizando apenas Fe Puro (Figura 7). Existem materiais compósitos que possuem resistividade menor para a aplicação em núcleos magnéticos, porém seu preço é mais elevado.

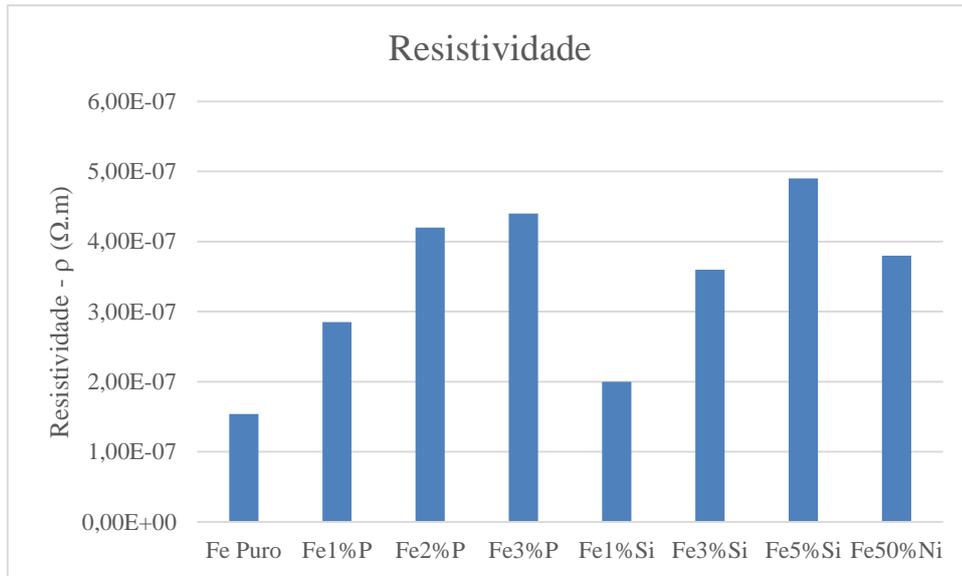
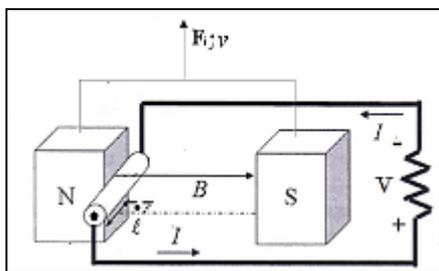


Figura 7 - Comparativo resistividade das ligas ensaiadas [3]

2.3. Máquinas Elétricas Síncronas

Máquinas elétricas funcionam de acordo com o princípio da indução eletromagnética. Segundo este princípio, quando há um condutor imerso em um campo magnético e este campo movimenta-se por uma força F em uma dada velocidade v , uma tensão surgirá entre os terminais do condutor. A tensão produzida devido este movimento é denominada tensão induzida. A Figura 8 a apresenta um condutor imerso em um campo magnético, este campo movimentando-se a uma velocidade v . Nessa condição, é possível decompor no eixo y e uma força F_i perpendicular ao campo magnético B . Assim, uma corrente I é produzida no condutor. Tal situação é descrita pela regra da mão esquerda, conforme Figura 8b [22].



Condutor movimentado a velocidade v



Regra da mão esquerda

Figura 8 - Condutor movimentado campo magnético B[23]

Para que ocorra a máxima indução em um condutor, o mesmo deve possuir todo comprimento (ℓ) imerso no campo magnético a fim de evitar partes inativas. Além disso, para se obter a máxima tensão induzida V , o ângulo entre o campo magnético e o

comprimento ativo do condutor deve ser de 90°, e o ângulo entre o campo magnético e a velocidade no qual o condutor é impulsionado no campo deve ser de 90°[23].

Caso o ângulo formado entre o campo magnético e a velocidade na qual o condutor é impulsionado no campo for diferente de 90°, a indução não será máxima. Se o ângulo entre as componentes B e v , for de 0°, não haverá indução de tensão no condutor [24].

Os tipos de motores elétricos se dividem em Motor CA, Universal e Motor CC. A Figura 9 apresenta esquema das tipologias de máquinas de corrente alternada (CA).

As máquinas elétricas com alimentação trifásica, assim como, a maioria das máquinas elétricas podem funcionar como motor ou gerador. Como motor, convertem potência elétrica, a partir de uma fonte de energia elétrica, numa potência mecânica, que aciona uma carga acoplada ao eixo. Como gerador processa-se o contrário. Por este motivo, os motores elétricos podem ser denominados de máquinas elétricas rotativas ou de máquinas elétricas[25].

As máquinas rotativas trifásicas podem ser síncronas e assíncronas. Nos motores síncronos a velocidade angular do eixo é constante e não tem dependência com a carga acoplada ao eixo, ou seja, não varia a rotação do eixo conforme torque mecânico aplicado no mesmo, isto ocorre enquanto se respeita o limite de potência nominal da máquina [25].

A Equação 3 representa a velocidade n_s [rpm] para máquinas síncronas.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{2 \cdot p} \quad \text{eq(3)}$$

Onde:

f - frequência de rede [Hz];

p - número de pólos da máquina.

Nos motores assíncronos, a diferença entre a velocidade síncrona do campo girante do estator e a velocidade do rotor é denominada velocidade de escorregamento. Quando acoplado uma carga mecânica no eixo do motor, existe uma diferença entre a velocidade angular do rotor e do campo girante desta forma existindo uma queda na velocidade angular. A velocidade de escorregamento geralmente é medida na unidade %[26].

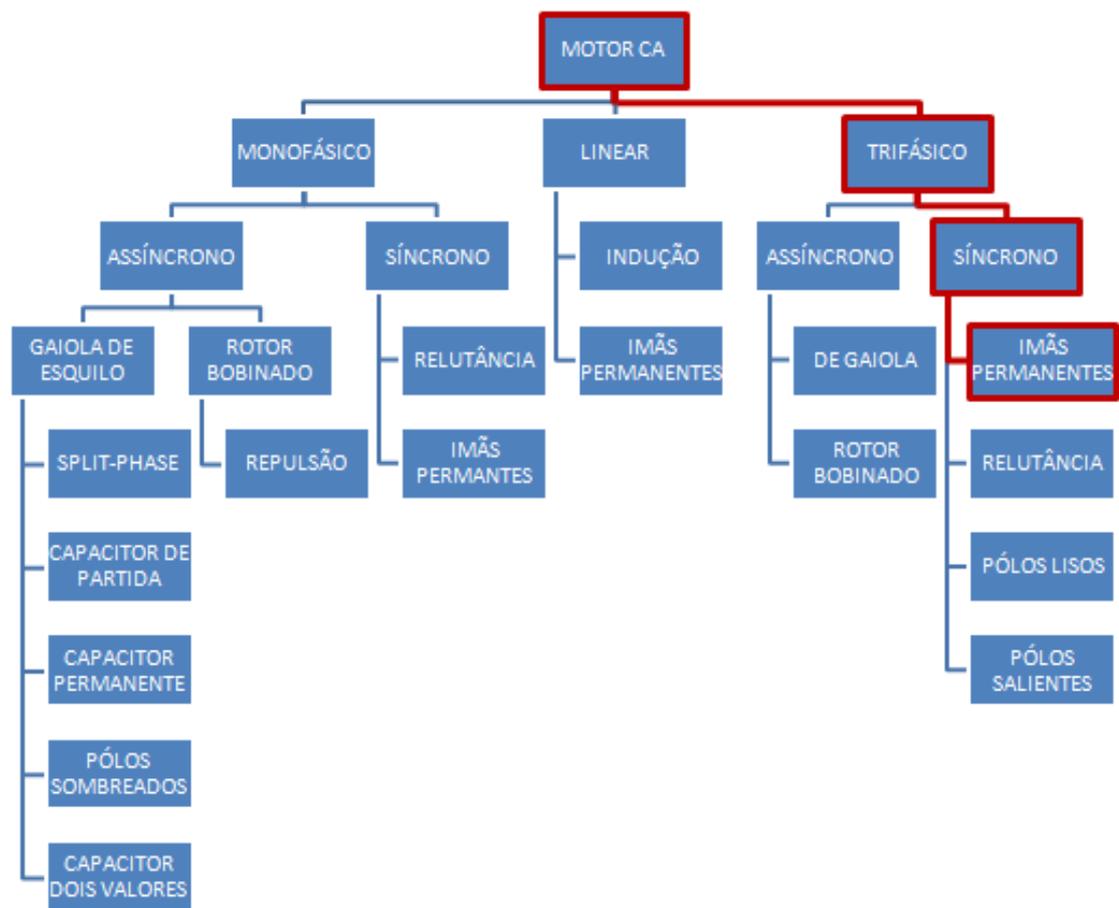


Figura 9 - Máquinas Elétricas - Motores CA – Topologias [27]

As máquinas elétricas síncronas em sua maioria são divididas em duas partes [27]:

Estató: parte fixa da máquina podendo possuir núcleo de material magnético macio, na qual são colocados os enrolamentos de armadura com alimentação trifásica, onde é gerada uma onda de indução magnética.

Rotor: parte girante da máquina onde estão presentes os enrolamentos de campo ou os ímãs permanentes.

2.3.1. Máquina Síncrona com Ímã Permanente:

Atualmente, o uso de ímãs permanentes com alto produto energético em substituição aos enrolamentos de campo em máquinas elétricas, tem aumentado consideravelmente. Esta tendência é devido à necessidade de sistemas de campo baratos e confiáveis produzidos a partir de ímãs de ferrita que, dependendo da aplicação, são adequados. Entretanto, o

desenvolvimento mais importante, se deu a partir da utilização de novos materiais magnéticos, como os ímãs permanentes de terras raras (super ímãs), que possuem um produto energético muito superior às ferritas. Estes super ímãs utilizados são conhecidos por sua composição, ou seja, o neodímio-ferro-boro ou NdFeB e o samário-cobalto ou SmCo [20].

As máquinas elétricas síncronas de ímãs permanentes dividem-se em dois tipos em relação à direção da densidade do fluxo magnético de excitação no entreferro, conhecidas como máquinas de fluxo radial ou axial. Nas máquinas de fluxo radial a direção do fluxo magnético de excitação é perpendicular ao eixo de rotação, o segmento do condutor associado à geração força eletromotriz induzida é aquele paralelo ao eixo de rotação. Nas máquinas de fluxo axial, a direção da densidade de fluxo magnético de excitação no entreferro se estabelece paralelamente ao eixo de rotação. Neste caso a seção do condutor associado à geração de força eletromotriz é aquele perpendicular ao eixo de rotação. Na Figura 10 observa-se que máquinas de fluxo radial possuem maior comprimento longitudinal e menor diâmetro, enquanto a máquina de fluxo axial possui maior diâmetro e comprimento axial[28].

Nos geradores com ímãs permanentes, não há enrolamentos de campo, que são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético. Não possuem escovas ou fonte de tensão contínua, reduzindo manutenções, aumentando o rendimento com melhor relação torque/volume. Os ímãs são fixados, em alguns casos, tangencialmente na superfície dos polos do rotor ou axialmente internamente no rotor. Alguns possuem uma configuração híbrida.

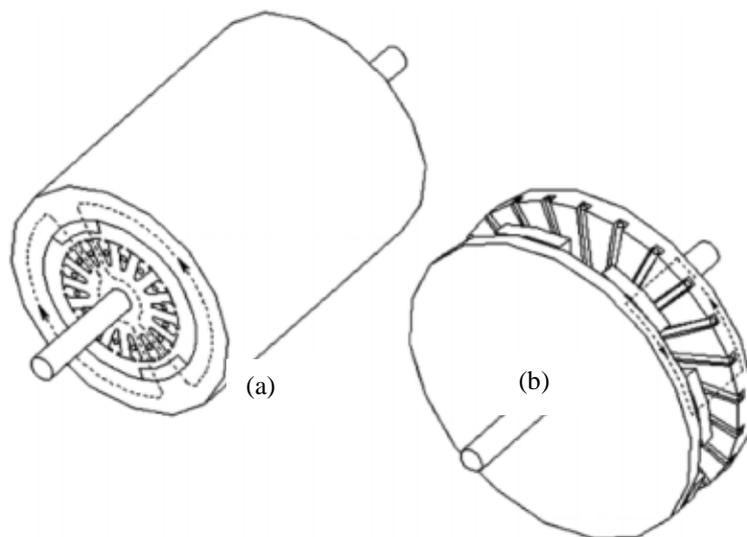


Figura 10 - (a) Máquina de fluxo radial e (b) Máquina de fluxo axial [29]

Spooner et al apresentou uma máquina com fluxo axial construída apenas com um estator e rotor duplo com pequeno comprimento axial. A máquina foi chamada de Torus. A utilização de ímãs permanentes de terras raras na referida máquina possibilitou uma relação de conjugado/massa relativamente elevada. A disposição dos rotores proporciona uma boa ventilação para os enrolamentos do estator. O grupo considerou satisfatórios os resultados dos ensaios e bom o desempenho apresentado pela máquina [30].

Motores CA com ímã permanente acionadas eletronicamente são frequentemente chamados de motores *brushless* (sem escovas) ou motores CC sem escovas. Esta terminologia vem de ambos devido a sua semelhança nas características com motores CC e devido ao fato que podem parecer máquinas elétricas invertidas, com o seu enrolamento de campo no rotor e com sua armadura comutada eletronicamente pelo sensor de posição do eixo e através de chaves conectados aos enrolamentos de armadura [26].

A máquina Torus possui duas principais topologias de construção, elas diferem na disposição dos ímãs permanentes nos rotores. A disposição de ímãs em que os ímãs de um rotor possuem a mesma polaridade dos ímãs em frente no outro rotor são chamados de tipo NN Figura 11a. No segundo modelo os ímãs frente à frente possuem polaridades opostas nos rotores, o fluxo se estabelece no estator e segue uma trajetória axial na armadura, tipo NS Figura 11b[28].

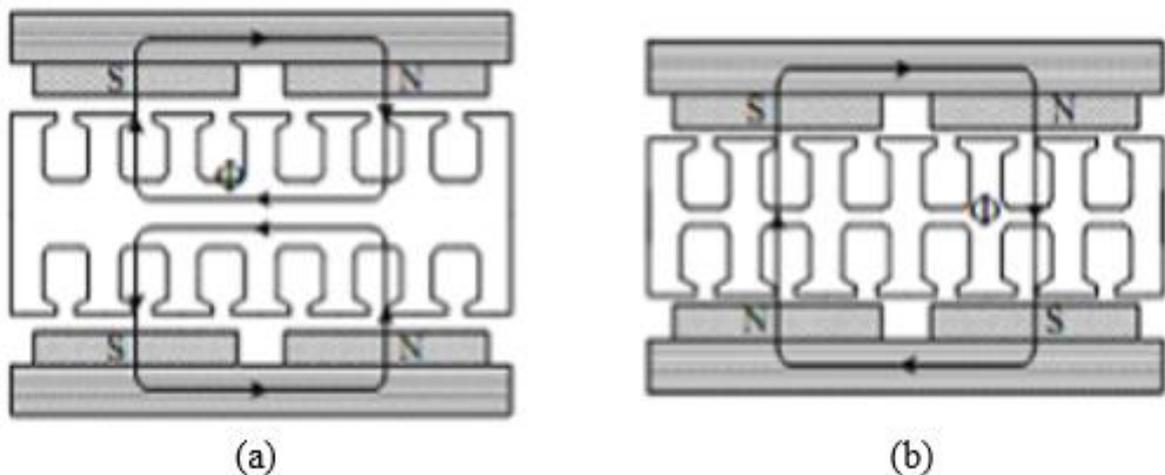


Figura 11 - Topologias máquinas de fluxo axial (a) Tipo Norte - Norte e (b) Tipo Norte - Sul[28]

A Figura 12 apresenta a representação planificada da máquina Torus tipo NN com o sentido magnético percorrido.

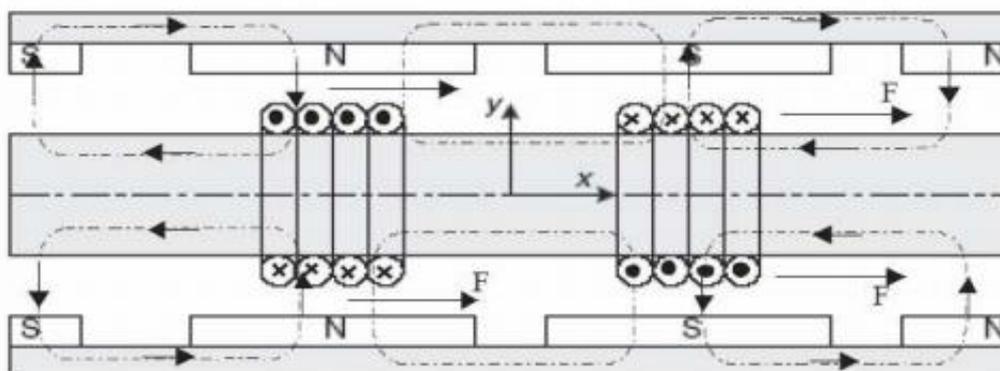


Figura 12 - Representação planificada da Torus [31]

A máquina Torus é conhecida como simples e barata. Os enrolamentos são construídos por enrolamentos montados em torno do núcleo do estator que é toroidal. O núcleo é construído sem ranhuras, contribuindo para reduzir as indutâncias próprias e mútuas do enrolamento. A utilização de ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro possibilitou a redução de volume e de massa, e a obtenção de carregamento elétrico elevado. O carregamento magnético elevado possibilita a obtenção de forças eletromotrizes especificadas com pequeno número de espiras, e resistência e indutâncias reduzidas. O estator da máquina foi construído com uma fita metálica enrolada formando um toróide, sobre o qual é montado o enrolamento. O rotor é formado por dois discos com ímãs polarizados e fixados de forma axial. As perdas na máquina foram analisadas em detalhe. Foram estudadas diferentes formas de montagem dos ímãs permanentes, bem como o desempenho térmico dos protótipos construídos [30]. Na Figura 13 é possível observar a representação da máquina Torus com fluxo axial utilizada no projeto.

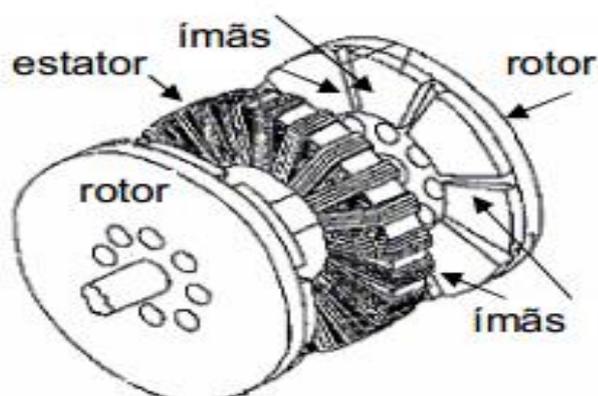


Figura 13 - Máquina Torus fluxo axial [30]

2.4. Aerogeradores

Os aerogeradores são conversores eletromecânicos de energia que transformam a energia cinética do vento em energia elétrica. Esses equipamentos possuem as seguintes formas de classificação: conforme sua potência nominal; de acordo com as forças predominantes no movimento rotação (forças de sustentação ou de arrasto); e conforme os tipos de geradores elétricos que os constituem (geradores síncronos ou assíncronos). Com base na definição de aerogeradores e agrupando-os de acordo com sua potência nominal, tem-se a seguinte classificação [32]:

- Pequeno porte: potência nominal menor que 100 kW;
- Médio porte: potência nominal entre 100 kW e 1.000 kW;
- Grande porte: potência nominal maior que 1.000 kW;

Outra maneira de classificação que pode ser mencionada é quanto a orientação do rotor do aerogerador. Quando relacionado a turbinas de pequeno porte também se utiliza a classificação do eixo, podendo ser horizontal e vertical. Os aerogeradores de eixo horizontal, em sua maioria, fazem uso predominante de força de sustentação, apresentam elevada velocidade de rotação (sendo muitas vezes maior do que a própria velocidade do vento incidente), alto rendimento aerodinâmico e baixo torque, quando comparadas às máquinas que utilizam força de arrasto utilizando eixo vertical. Essas características as tornam preferíveis para aplicação em geração de energia elétrica, justificando sua maior utilização [33]. Com isto, o gerador elétrico escolhido utiliza uma turbina de eixo vertical e pás que fazem uso da força de sustentação (Figura 14).



Figura 14 - Gerador eólico Enersud com turbina de eixo vertical

3. PROCEDIMENTOS E ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Neste capítulo serão demonstrados os procedimentos e as análises realizadas pelos experimentos. Para garantir a fidelidade no ensaio em bancada do motor foram realizados os ensaios de histerese, magnetização, resistividade. Os testes são realizados para efeito comparativo com os trabalhos anteriores realizados no GDER, visto que os pós de Fe e de Fe₃P são de lotes diferentes.

3.2. Obtenção dos Corpos de Prova de Fe₂P

3.2.1. Matrizes dos Corpos de Prova para Ensaio

Para realizar a avaliação e a comparação das propriedades físicas de interesse foram utilizadas matrizes para a obtenção dos corpos de prova. A geometria de cada matriz e os ensaios realizados com as peças conformadas pelas mesmas estão relacionados a seguir:

a) *Matriz para obtenção dos corpos de prova na forma de cilindro:* Estes corpos de prova foram utilizados para medição da densidade e compressão. A Figura 15 mostra a matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro, a Figura 16 sua geometria expressa em milímetros e a Figura 17 mostra o desenho da matriz montada com a localização do pó metálico durante a compactação.



Figura 15 - Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro

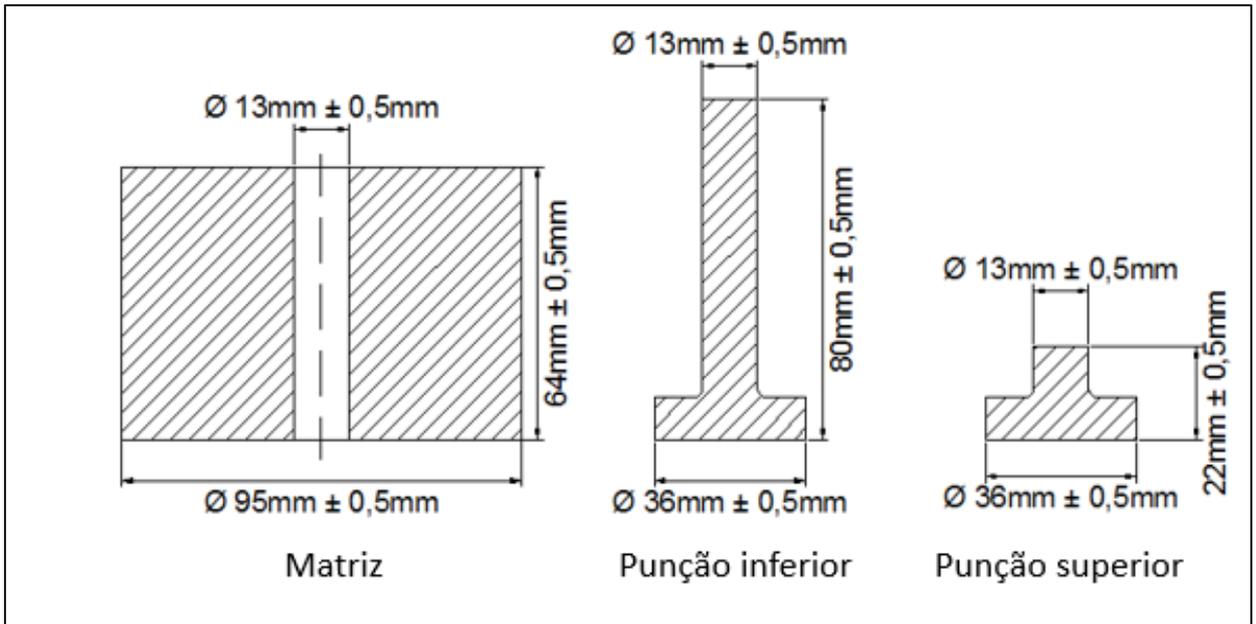


Figura 16 - Geometria matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro (arquivos GDER)

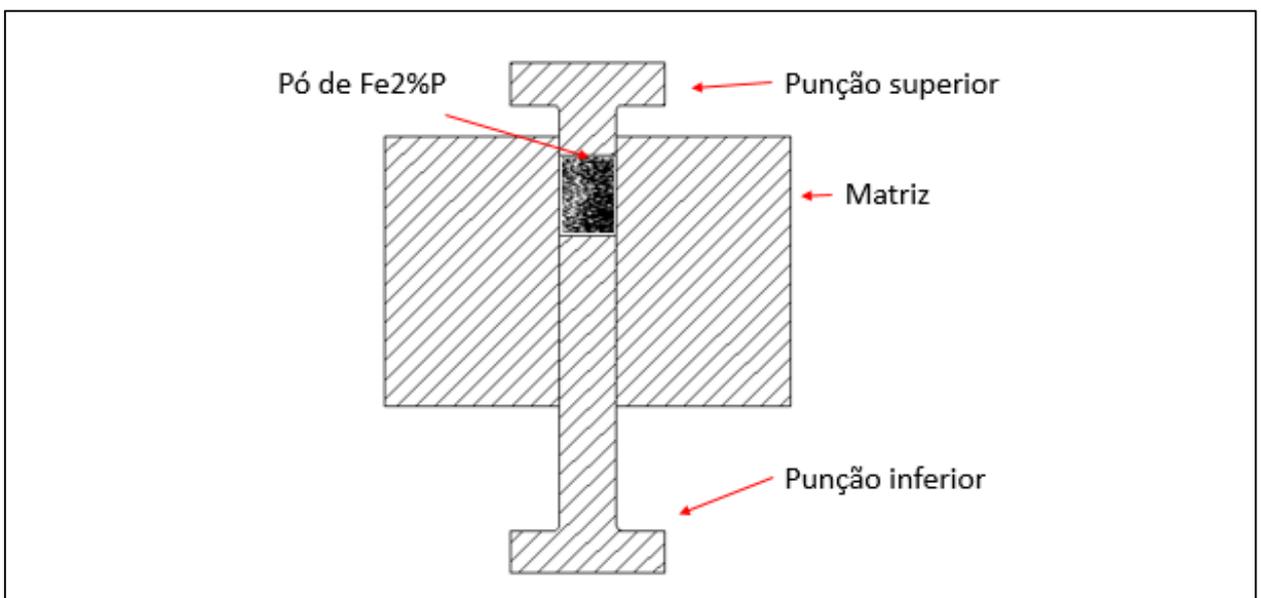


Figura 17 - Desenho de montagem da matriz de compactação na forma de cilindro

b) *Matriz para obtenção dos corpos de prova na forma de anel*: Os corpos de provas obtidos por esta matriz são utilizados para obtenção das curvas de histerese e magnetização, assim como, para determinação da resistividade elétrica. A Figura 18 mostra a matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel, a Figura 19 sua geometria e a Figura 20 mostra o desenho de montagem da matriz e a localização do pó metálico durante a compactação.



Figura 18 - Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel [(a) - punção superior; (b) - matriz interna; (c) - punção inferior; (d) - matriz externa]

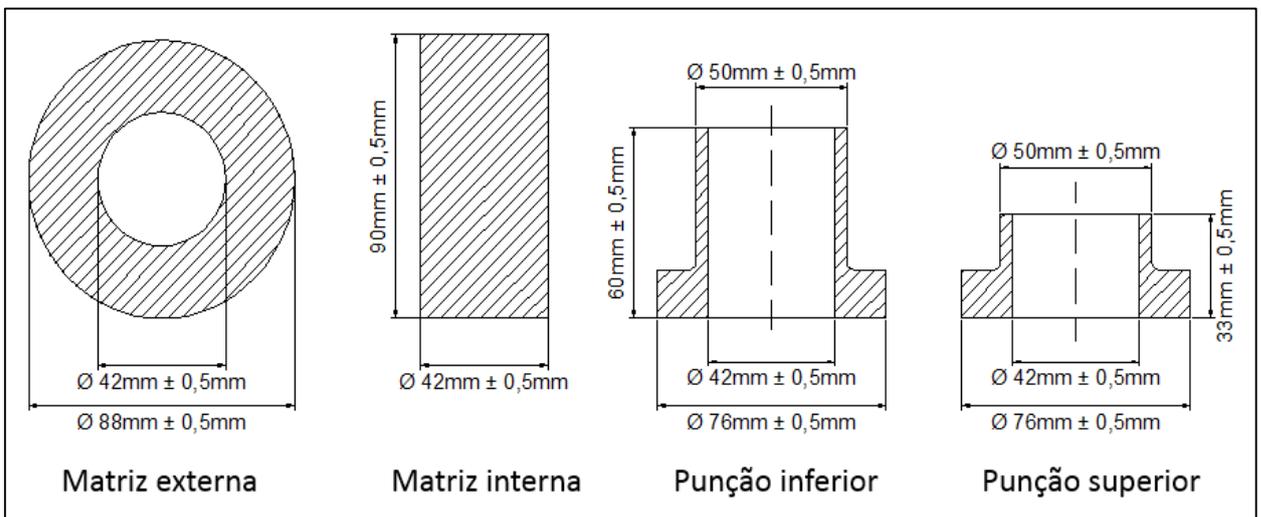


Figura 19 - Geometria matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel (arquivo GDER)

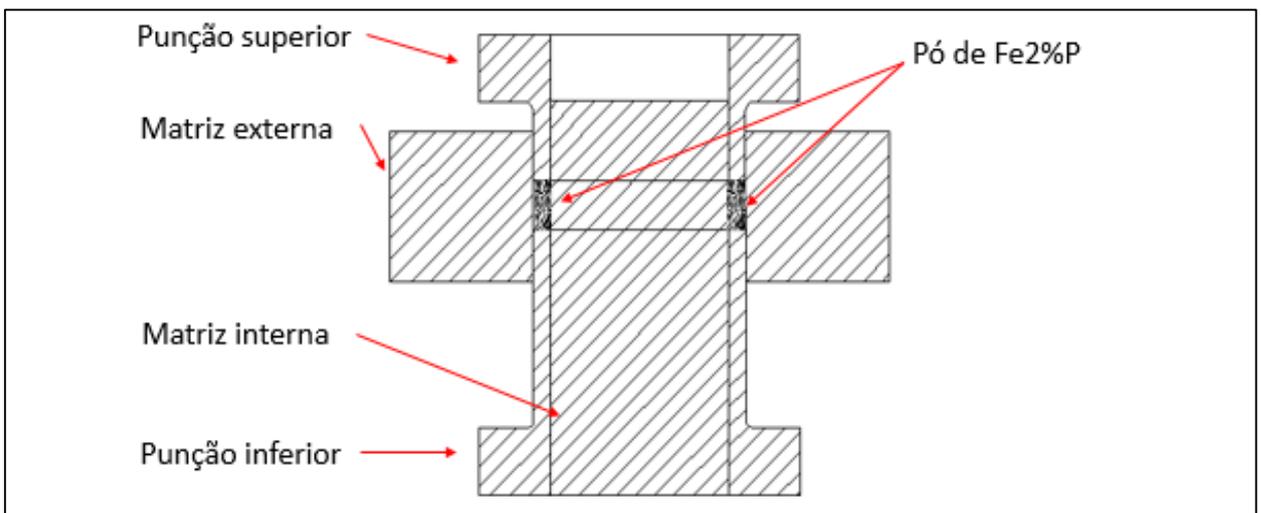


Figura 20 - Desenho de montagem da matriz de compactação na forma de anel

3.2.2. Ensaio de Magnetização e Histerese

Para aplicação deste método é necessário a preparação de amostras, que consiste na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel, conhecidas como Anel de Roland (Figura 21). O procedimento consiste em: isolar o anel com filme plástico para evitar descascamento do fio esmaltado, enrolamento de espiras secundárias AWG 26 (0,41mm de diâmetro). Posteriormente novo isolamento, seguido de enrolamento das espiras primárias AWG 23 (0,57mm de diâmetro) [10].



Figura 21 - Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolando secundário e (d) enrolamento do primário.

As dimensões do anel são conforme Figura 22.

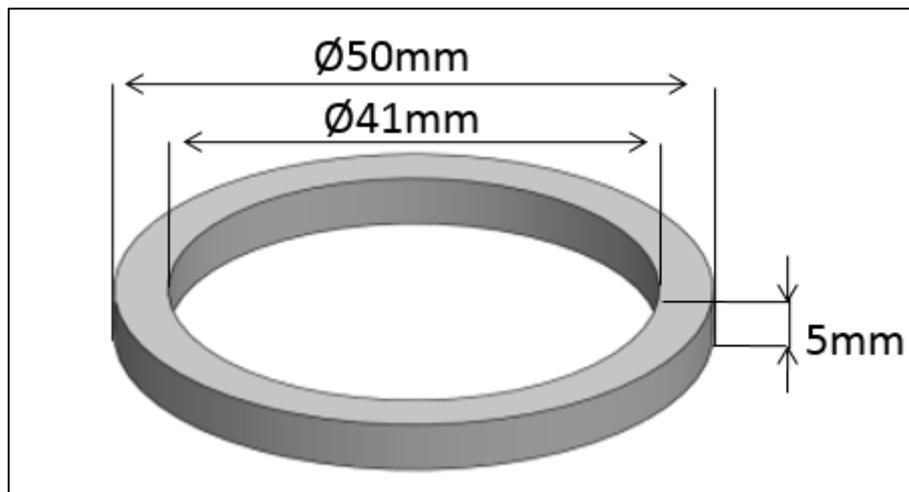


Figura 22 - Anel de Roland

Entre os parâmetros de controle para as medições das propriedades magnéticas, são necessárias algumas medidas da amostra durante sua preparação. É preciso calcular a densidades de espiras (D_{sp}) no enrolamento primário, sendo obtido pela Equação 4. Os enrolamentos foram padronizados para 270 espiras no secundário e 160 espiras no primário.

$$Desp = \frac{Np}{L} = \frac{Np}{\frac{\pi(d_{ext} + d_{int})}{2}} \quad eq(4)$$

Onde, Np é o número de espiras no enrolamento primário, L é o comprimento do circuito magnético [mm], d_{ext} é o diâmetro externo do anel [mm] e d_{int} , diâmetro interno do anel [mm].

Para constar nos resultados dos ensaios realizados, foi estipulada a utilização do resultado mais coerente entre as três medidas feitas para cada liga, considerando que possa ocorrer um desvio para qualquer medida.

Após a confecção dos anéis, estes foram conectados ao equipamento Remagraph-Remacomp C-710, da marca Magnet-Physik Dr. Steingroeber GmbH (Figura 23 e Figura 24), utilizado para aquisição da curva de magnetização e curva de histerese das amostras.



Figura 23 - Equipamento Remagraph-Remacomp C-710

Os dados de entrada para a obtenção das curvas foram:

- Densidade de espiras do primário (nº de voltas/m).
- Número de espiras do secundário.
- Resistência do fio de cobre (0,2 Ohms).

- Área secção transversal (mm^2).
- Densidade do material (kg/m^3).

Após inserir os dados no equipamento foi possível a obtenção da curva de histerese do Fe2%P conforme Figura 25.

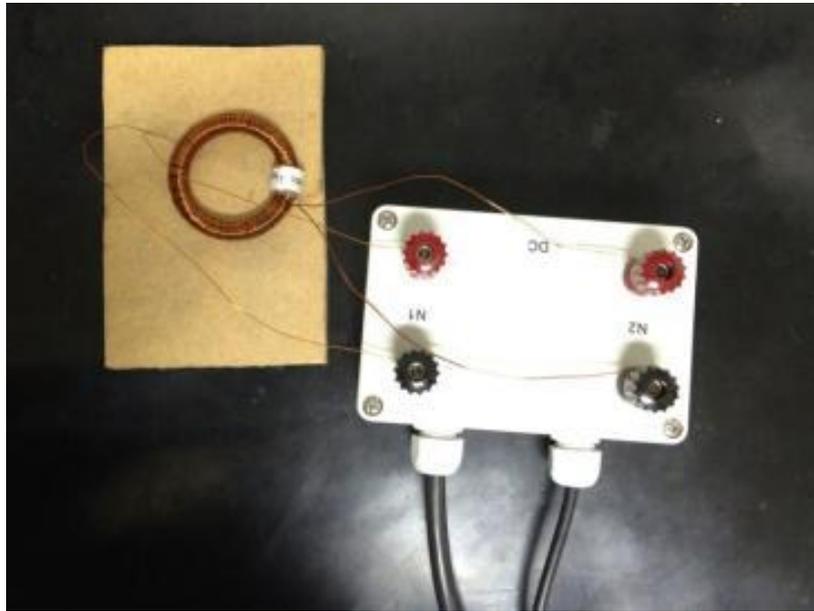


Figura 24 - Conectores de entrada do equipamento Remagraph-Remacomp C-710

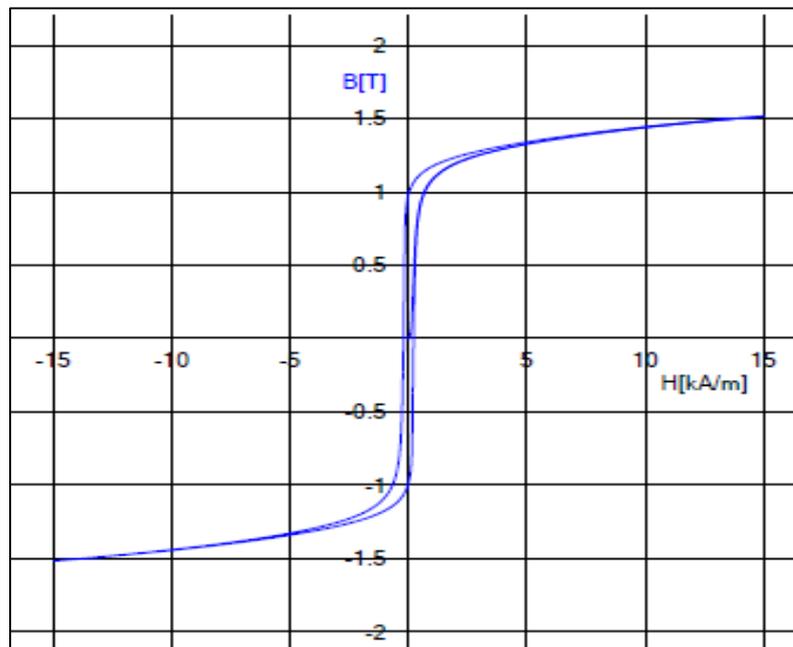


Figura 25 - Curva de histerese Fe2%P [relação entre indução magnética B e campo magnético H]

Os dados adquiridos através da curva de histerese foram comparados com os dados dos trabalhos anteriores realizados no laboratório como ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo dos resultados obtidos pela curva de histerese Fe2%P

	Fe2%P [10, 4]	Fe2%P
Indução de Saturação - B_m(T)	1,36	1,5
Magnetismo remanente - B_r (T)	1,00	0,982
Força coercitiva - H_c (A/m)	208	211

Observa-se que os resultados obtidos através do ensaio de histerese do material ficaram próximos aos já realizados anteriormente no GDER. Com exceção da força coercitiva, 3 A/m mais elevada, os demais resultados foram melhores, B_m 10,2% superior e B_r 1,8% menor que os resultados anteriores. A diferença entre os resultados pode ocorrer pelo equipamento utilizados para ensaio, além disso os pós utilizados são de lotes diferentes, podendo variar minimamente sua composição, bem como a precisão de compactação e temperatura do forno, que apesar de programadas iguais pode existir variação devido a imprecisão de cada equipamento.

Os ensaios realizados anteriormente foram feitos com o equipamento traçador de curvas de histerese magnética GlobalMag, modelo *TLMP-TCH-14*. Já no caso dos ensaios atuais realizados foram executados com o equipamento *Remagraph-Remacomp C-710*.

A permeabilidade máxima se encontra no ponto da curva de magnetização onde a relação de B e H é máxima, ou seja, o maior ponto na curva de magnetização, sendo designada por $\mu_{m\acute{a}x}$. A permeabilidade máxima ($\mu_{m\acute{a}x}$) da liga Fe2%P ficou na ordem de 1784 H/m.

3.2.3. Perdas Elébricas da Liga

Para a determinação da resistividade do material foi utilizado o corpo de prova no formato de anel. A amostra para determinação da resistividade deve possuir a área transversal bem menor que seu comprimento, assim sendo, realizou-se um corte na secção do perímetro dos corpos de prova na forma de anel (Figura 26) [10].

O dispositivo utilizado em trabalhos anteriores do laboratório foi substituído para maior precisão na medição dos valores de resistência, foi utilizado um ohmímetro digital DO5, da marca Cropico (Figura 27).



Figura 26 - Corpo de prova com corte conectado aos cabos para medição da resistividade



Figura 27 - Ohmímetro digital utilizado para a obtenção da resistência das amostras

3.3. Projeto da máquina Torus 1kW

3.3.1. Introdução

O gerador elétrico utilizado é da fabricante Enersud, oriundo da turbina eólica gerar 246 – 1 Kw. É uma máquina Torus de fluxo axial dotada de topologia Tipo NN. É um gerador síncrono de ímãs permanentes com potência declarada de 1kW. Este gerador possui um estator, Figura 28 e um rotor com duas partes Figura 29.

O estator é o componente onde estão localizadas as bobinas, local este onde será induzida uma corrente.

O rotor é o local onde estão fixados os ímãs permanentes de Neodímio Ferro Boro. No caso desta máquina, existem duas peças que formam um rotor, rotor frontal e rotor posterior. Estes são responsáveis pelo campo magnético o qual corta os enrolamentos do estator induzindo uma corrente. Cada peça do rotor possui 14 ímãs.



Figura 28 - Estator Enersud



Figura 29 - Peças do rotor do gerador Enersud

Esta máquina da empresa Enersud tem a estrutura conforme a imagem meramente ilustrativa da Figura 30.

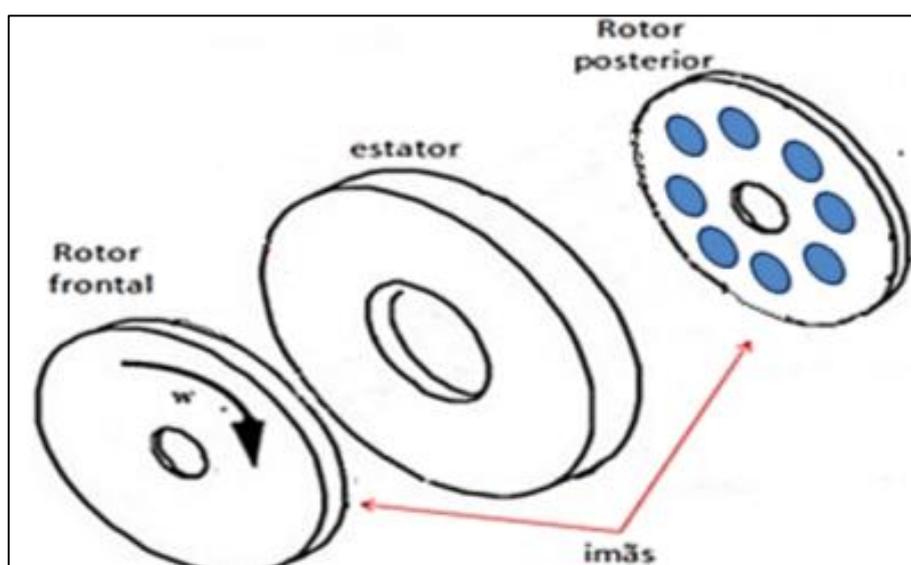


Figura 30 - Estrutura gerador Enersud

3.3.2. Núcleo do Estator

No centro do enrolamento há um núcleo (Figura 31) para aumentar o direcionamento das linhas do campo magnético. Este núcleo possui o efeito próximo dos núcleos construídos de chapas laminadas, porém tem uma montagem diferenciada, sendo constituído de uma lâmina enrolada.



Figura 31 - Núcleo do estator

Este núcleo será substituído por um núcleo construído pela técnica de metalurgia de pó convencional.

3.3.3. Especificações dos Ímãs

Os 28 ímãs de neodímio ferro boro são de categoria N-32, seu fluxo magnético é de 0,46 tesla Gauss quando realizada a medição no seu centro.

3.3.4. Projeto do Estator

Após a análise do motor foi realizada as medições geométricas do núcleo comercial da máquina. As medidas são necessárias para construir uma matriz que realize uma compactação do pó de Fe2%P com o intuito da peça final ficar com geometrias próximas a geometria original, com isto não acarretando mudanças nas bobinas da máquina.

Conforme exibido na Figura 32 o toróide possui um raio interno de 70 mm e raio externo de 96 mm.

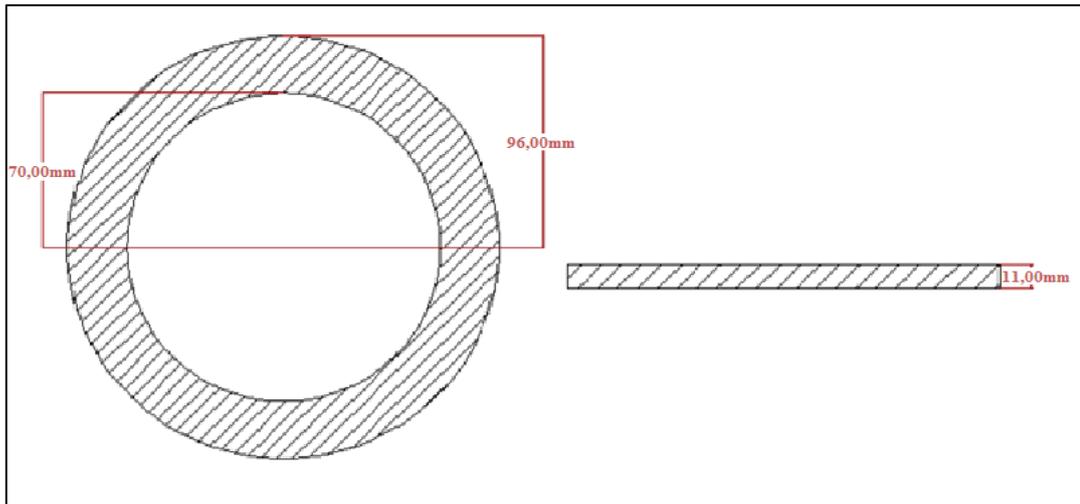


Figura 32 - Medidas do núcleo toroidal

Para determinar a força (F) para compactação dos pó compactação é necessária a realização do cálculo da área da peça que será compacta, calculando a área da circunferência maior diminuindo o valor da área circunferência menor se obtém a área do núcleo do estator do gerador, 13559 mm². Usando esta área para determinar a força necessária para a compactação dos pó tem-se:

$$F = P * A \quad \text{eq(5)}$$

F = força (N);

P = pressão (Pa);

A = area (m²);

Sabendo que a peça de Fe2%P obteve seu melhor desempenho magnético e mecânico durante os ensaios com 600 MPa de pressão aplicada no punção da matriz. Para a compactação do núcleo do estator é necessário uma força total de compactação de 8134.6 kN[10].

A prensa de maior capacidade no laboratório é da fabricante FKL com força máxima de 5884 kN, por este motivo foi optado a divisão do núcleo em quatro peças, dessa forma trabalhando com menor pressão, facilitando o lido com a matriz. Após a compactação das peças as mesmas serão levadas a usinagem, que montadas passem a formar uma peça final, o núcleo.

Para levar em conta o desenho da nova matriz, foi realizado o cálculo de contração aproximada da peça de Fe2%P, comparando as dimensões da peça verde e sinterizada. Para este ensaio foi utilizado a matriz para compactação de corpos de prova em forma de cilindro (Figura 15).

O corpo de prova de formato cilíndrico foi compactado com uma pressão de 600MPa, adquirindo as seguintes medidas, sendo a inicial verde e a final sinterizada (Tabela 2):

Tabela 2 - Dimensões e contrações corpo de prova cilíndrico

Pressão P (MPa)	Densidade Dm (g/cm ³)	Altura inicial Hi (mm)	Altura final Hf (mm)	Contração Ct (%)	Diâmetro inicial Di (mm)	Diâmetro final Df (mm)	Contração Ct (%)
600	6,46	13,46	13,27	1,41	13,08	12,78	2,29

Com estes valores é possível determinar uma medida aproximada da espessura da matriz, considerando que a contração radial é a maior foi utilizada a mesma para determinar a espessura.

Tendo que a espessura do núcleo é de 26 mm e a contração é de 2,3 % a matriz deverá possuir 26,6 mm de espessura. Estes 0,6 mm de diferença deverão ser distribuídos entre os dois lados do núcleo, ou seja, entre o raio externo e o raio interno. Desta forma o raio interno da circunferência deverá possuir 69,7 mm e o raio externo 96,3 mm. Tomando estas medidas a peça após compactada e sinterizada deverá ter as medidas do núcleo comercial.

Na Figura 33 consta o desenho da matriz com suas medidas internas.

A matriz possui um raio maior de 90° de forma que nas extremidades possam ser usinados os encaixes das peças. Além disso, as beiradas são arredondadas para que não exista concentradores de tensões e leve a matriz a ruptura.

Os punções da matriz foram fabricados com uma folga de aproximadamente 0,05 mm. Dessa forma a espessura dos punção é 26,5 mm, Figura 34.

O punção superior possui o mesmo formato e as mesmas dimensões com exceção da altura. O punção inferior possui 70 mm de altura para facilitar a extração das peças após compactação, enquanto o punção superior tem 35 mm de altura.

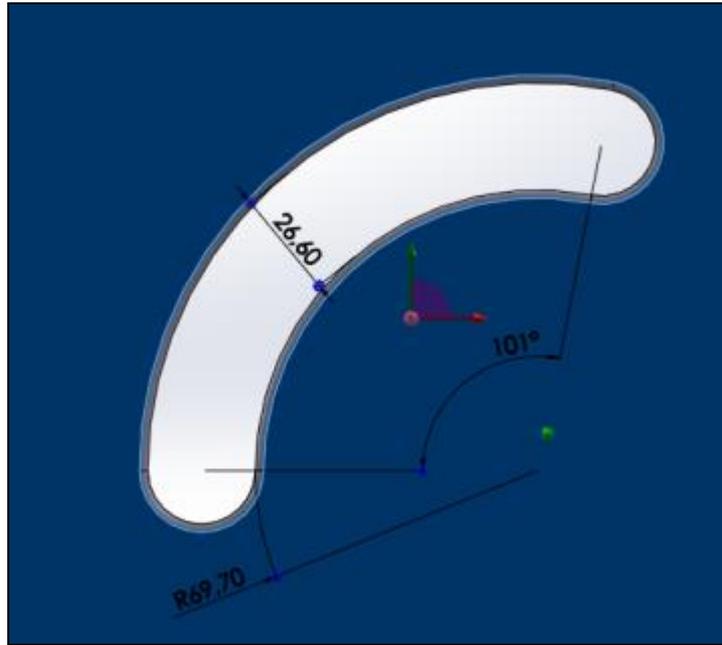


Figura 33 - Dimensões matriz de compactação das peças do núcleo do estator

Com estas medidas a matriz ficou com uma área total próxima a 4429 mm², para isso a força na compactação será de aproximadamente 2657 kN, para conseguir uma pressão de compactação de 600 MPa, assim podendo utilizar a prensa FKL de força máxima de 5884 kN, localizada no Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS.

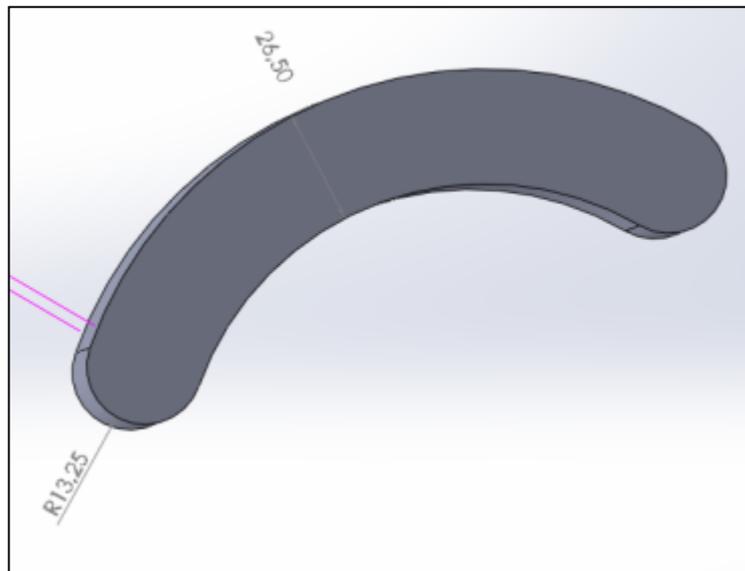


Figura 34 - Medidas do punção inferior da matriz de compactação

Na Figura 35 se observa a matriz montada, em uma vista explodida, com seus respectivos punções.

Após o projeto da matriz concluído foi enviada para confecção em aço D6 com têmpera e revenido. Na Figura 35 pode-se observar a matriz fixada na prensa pronta para realizar a compactação das peças.

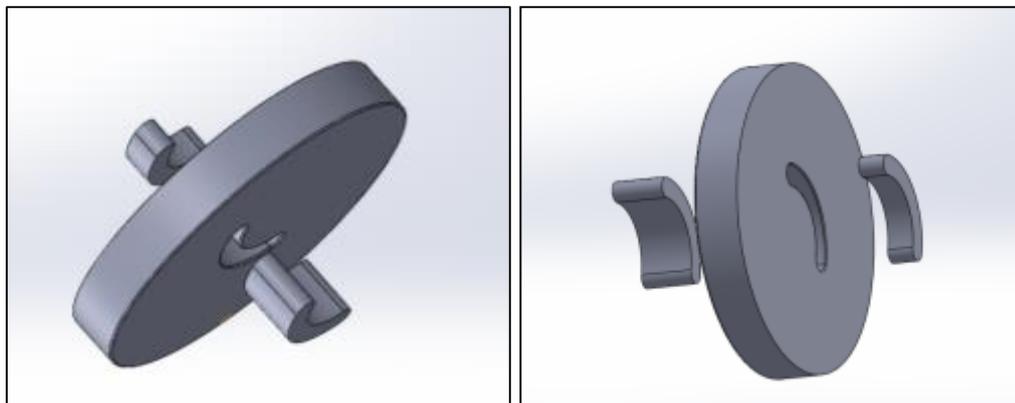


Figura 35 - Matriz com punções



Figura 36 - Matriz fixada na prensa FKL

3.4. Montagem da Máquina

A montagem da máquina foi realizada pela fabricante do produto, por dominar toda a montagem mantendo o padrão entre as máquinas para efeito comparativo.

3.4.1. Obtenção do Núcleo do Estator

Após o projeto e construção da matriz para compactação do núcleo de Fe2%P a peça foi enviada para sinterização em uma empresa. Isto foi necessário devido as dimensões da peça não serem compatíveis com os fornos até então instalados no LdTM. Na Figura 37 é possível analisar uma das cinco peças obtidas. Foi obtida uma peça a mais para caso houvesse problema na usinagem.



Figura 37 - Peça de Fe2%P que compõem o núcleo, após sinterização

Na Figura 37 é possível observar uma trinca na horizontal da peça de Fe2%P, esta trinca ocorreu durante a extração das peças na matriz. Foi verificado que a trinca ocorreu somente no lado onde não havia chanfro na matriz. Como o núcleo comercial possui uma altura equivalente a 11 mm e a peça final sinterizada possui aproximadamente 20 mm. Sendo assim, a usinagem foi realizada na mesma face da trinca para eliminá-la.

Os encaixes para união das peças estão desenhados na Figura 38, mostrando como ficarão dispostas as peças após montagem.

Após com os desenhos das peças contendo seus respectivos encaixes e medidas, as mesmas foram enviadas para uma empresa para realizar a usinagem por eletrofito, respeitando velocidades baixas para evitar possíveis aquecimentos que danificassem o desempenho magnético do material.

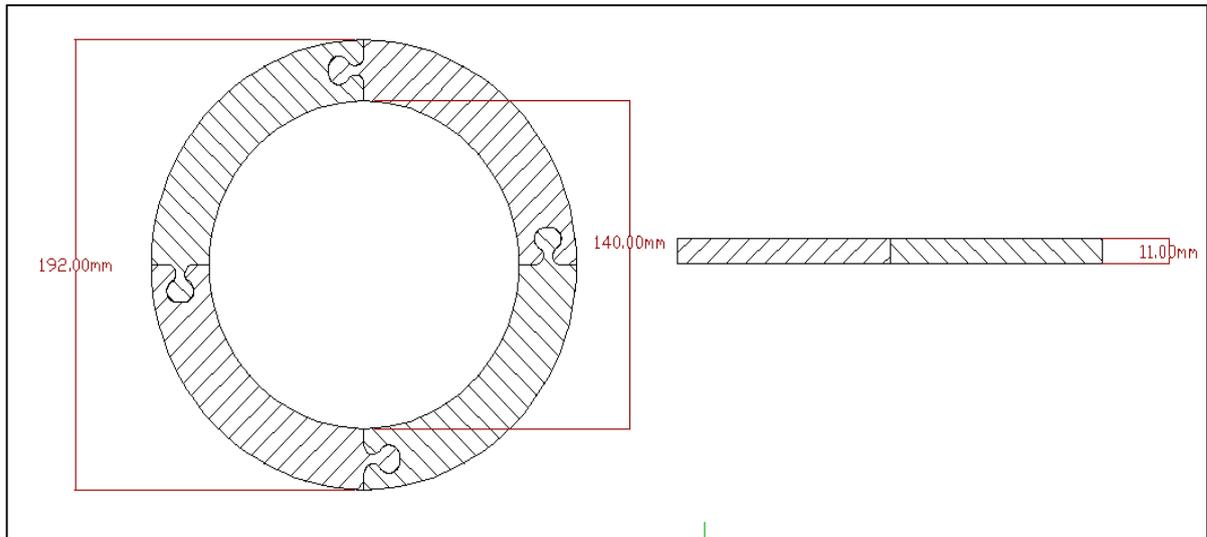


Figura 38 - Peças montados com encaixes formando o núcleo

Na Figura 39 pode ser observado as cotas da usinagem realizada nos encaixes, sobre a peça sinterizada.

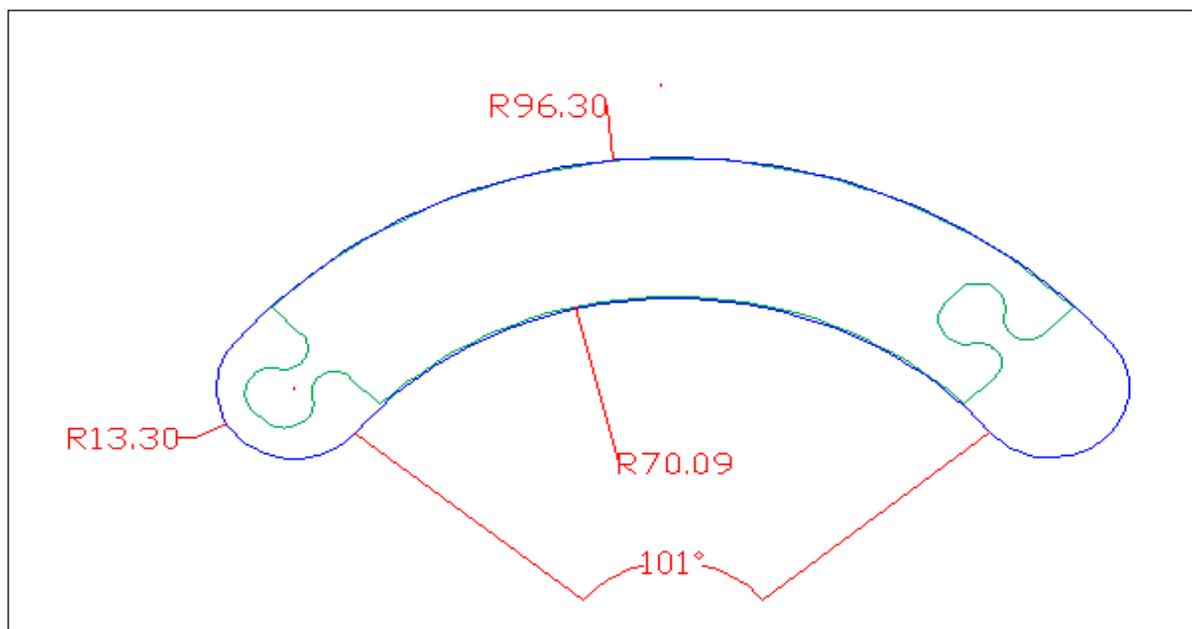


Figura 39 - Desenho da peça usinada sobreposta a peça sinterizada (medidas em mm)

Na Figura 41 é demonstrado as peças usinadas já com os encaixes comparando com a peça sinterizada antes da usinagem. Na Figura 42 consta o as peças usinadas já montadas formando o núcleo.

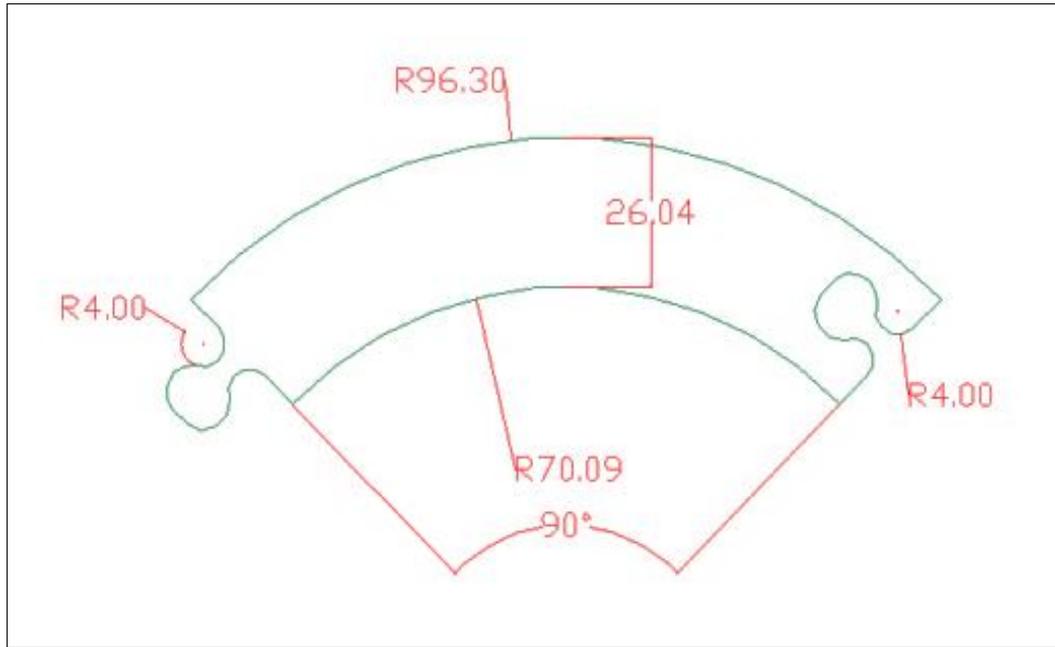


Figura 40 - Desenho de peça já usinada (medidas em mm)



Figura 41 - Peça sinterizada comparando com as peças usinadas com os encaixes



Figura 42 - Peças usinadas encaixadas formando núcleo do estator



Figura 43 - Comparativo entre núcleo comercial (laminado) e núcleo com peças sinterizadas

3.4.2. Bobinamento

Após a compactação, sinterização e posterior usinagem das peças que confeccionam o núcleo do gerador, as mesmas foram enviadas para a empresa fabricante do gerador para ser realizado o enrolamento.

O gerador elétrico tem uma tensão de operação de 24 Volts trifásico. Possui 21 enrolamentos e cada fase possui sete enrolamentos conectados em série elevando a tensão induzida em cada fase.

O condutor de cobre utilizado nas bobinas do núcleo do estator é um 15 AWG. Cada enrolamento possui primeira camada com 13 voltas, segunda camada 12 voltas e terceira e

última camada 11 voltas. Os enrolamentos são conectados em série a cada 7 formando três fases. As fases do gerador estão conectadas em estrela, dessa forma fazendo com que eleve a tensão entre fase e fase do gerador.

3.4.3. Montagem Final

A montagem da máquina foi realizada pela fabricante do gerador, a fábrica domina a tecnologia de encapsulamento do estator, bem como a centralização dos imãs e resina para fixação.

3.5. Ensaio da Máquina

Após o bobinamento, resinagem das peças e montagem do gerador com núcleo de Fe₂P, a empresa se dispôs a realizar testes de desempenho na máquina comparando a mesma com outra máquina construída no mesmo padrão realizando.

A empresa fabricante do aerogerador, por possuir a patente da máquina, tem o domínio da tecnologia, por estes motivos os ensaios da máquina foram realizados na empresa. Os dados levantados no ensaio são:

- a) Ensaio em vazio, sem carga elétrica, da máquina com núcleo de Fe₂P para levantamento de dados de consumo de potência mecânica para movimentar a mesma.
- b) Ensaio da máquina com núcleo de Fe₂P com carga elétrica, seguindo os padrões da fabricante, para levantamento da potência elétrica gerada e da potência mecânica consumida para fornecimento desta potência elétrica.
- c) Ensaio da máquina com núcleo comercial, laminado, levantando a curva de potência elétrica fornecida e potência mecânica consumida.
- d) Traçar a curva de eficiência das máquinas, comparando a eficiência da máquina que utiliza núcleo do estator de Fe₂P com a máquina que possui estator laminado.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A máquina elétrica construída com Fe2%P apresentou um bom desempenho, porém com uma resistência mecânica exigindo uma potência maior do motor de acionamento durante o teste em vazio quando comparado ao teste aplicado na máquina comercial. Segundo relatório enviado pela empresa o motor se comportava como se houvesse um curto circuito elétrico em algum enrolamento. Porém, o bobinamento foi novamente testado e aprovado as resistências equilibradas e dentro do padrão do fabricante.

Na Figura 44 é possível observar a potência consumida em Watt para o acionamento mecânico da máquina em vazio.



Figura 44 - Potência consumida acionamento do motor em vazio (Dados fornecidos pelo fabricante)

É necessária uma alta potência no motor para acionamento do gerador elétrico. A potência necessária em 82 rpm é equivalente a 6,45 W e Quando a máquina atinge 526 rpm a potência consumida pelo motor acionador é de 181,36 W. Como não há carga elétrica conectada ao gerador a potência deveria ser apenas para manter o mesmo girando, sendo assim, conforme relatório enviado pela fabricante, próxima a zero.

A potência consumida, apenas para movimentar o gerador, não se mantém a mesma quando acoplada carga elétrica no mesmo. Observando o comportamento e comparando ao gerador comercial, percebe-se que essa potência perdida, apenas para o acionamento do gerador, diminuí quando a potência elétrica útil gerada aumenta.

Apesar da liga utilizada no trabalho apresentar uma resistência elétrica relativamente alta quando comparada aos outros materiais ensaiados no laboratório, ficando apenas abaixo

de Fe5%SI e Fe3%P, a resistência elétrica do Fe2%P ainda é baixa quando comparada a resistência elétrica de chapas isoladas. As chapas utilizadas em máquinas elétricas convencionais possuem um isolamento elétrico entre cada chapa o que reduz a circulação de corrente em áreas menores, diminuindo como um todo as correntes parasitas no núcleo[34].

As correntes parasitas funcionam como uma resistência mecânica no gerador, quanto maior a circulação delas mais aumenta a força necessária apenas para movimentar a máquina sem carga.

Após o teste em vazio foi realizado um teste de carga em baterias 24 Vcc, o gráfico da potência elétrica gerada e da potência mecânica no eixo do gerador, pode ser observado na Figura 45.

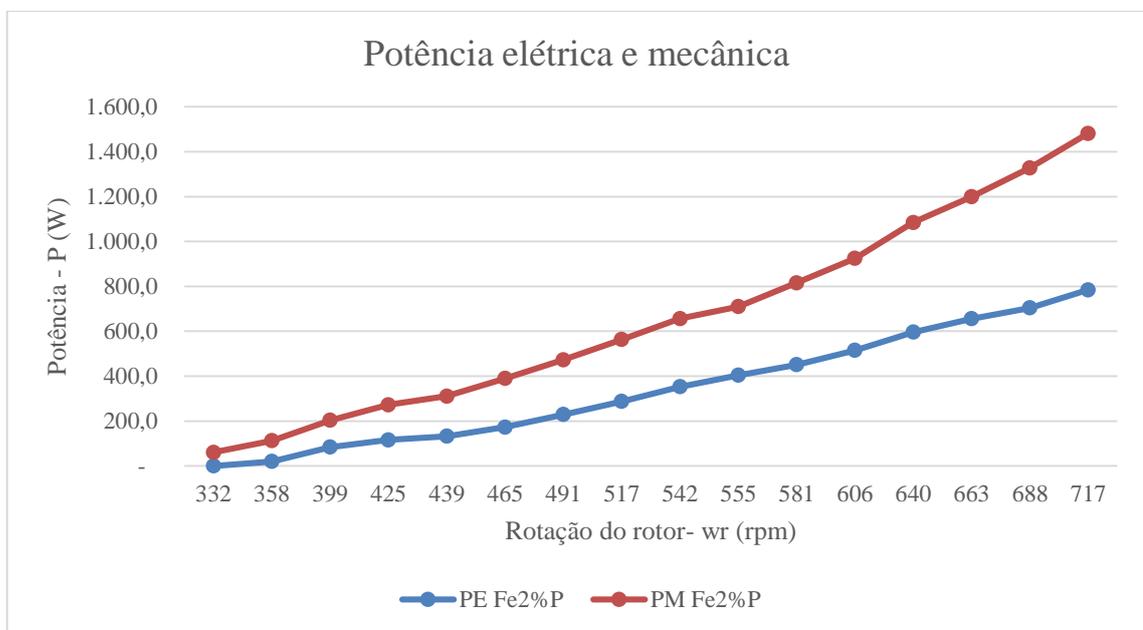


Figura 45 - Gráfico de potência gerada por RPM máquina Fe2%P

É possível observar que para gerar uma determinada potência elétrica é necessário aproximadamente o dobro de potência mecânica no eixo do gerador. A curva de potência elétrica gerada pela máquina utilizando núcleo Fe2%P ficou próxima a curva de potência elétrica da máquina com núcleo de chapas laminadas, confirmando o funcionamento da máquina e demonstrando que o material é aplicável em testes práticos para máquinas Torus.

O gráfico comparativo entre as máquinas com núcleo comercial e com núcleo a partir da MP é visualizado na Figura 46.

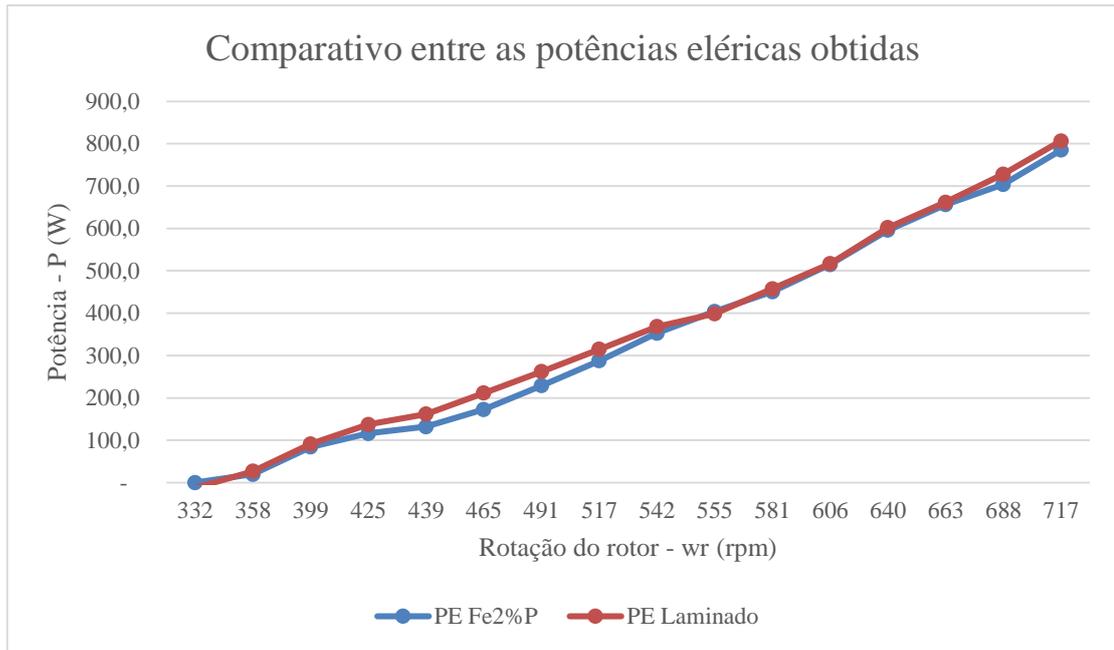


Figura 46 - Comparativo de potência elétrica gerada núcleo Fe2%P e laminado

Quando levado em conta apenas a rotação e a potência elétrica fornecida os dois geradores possuem curvas extremamente próximas. A diferença delas em alguns pontos é de no máximo 3%, tanto para mais quanto para menos.

Quando comparado a potência mecânica com a potência elétrica já não ocorre o mesmo, é nesse instante que a energia mecânica necessária para acionamento em vazio do gerador com núcleo de Fe2%P (Figura 44) torna a aparecer. A Figura 47 apresenta as curvas de potência mecânica e elétrica de ambos geradores.

A linha em vermelho representa a potência mecânica no eixo do gerador de núcleo sinterizado. Já em roxo apresenta a potência mecânica do núcleo laminado. Quando comparada as duas curvas de potência mecânica fica visível que no gerador com núcleo sinterizado é necessária maior potência mecânica para a mesma quantidade de potência elétrica. Possuindo os dois dados é possível determinar a eficiência de conversão, mecânica para elétrica, de ambos geradores.

O gráfico da Figura 48 expõe o comparativo da eficiência de conversão dos geradores com núcleo comercial e o núcleo sinterizado.

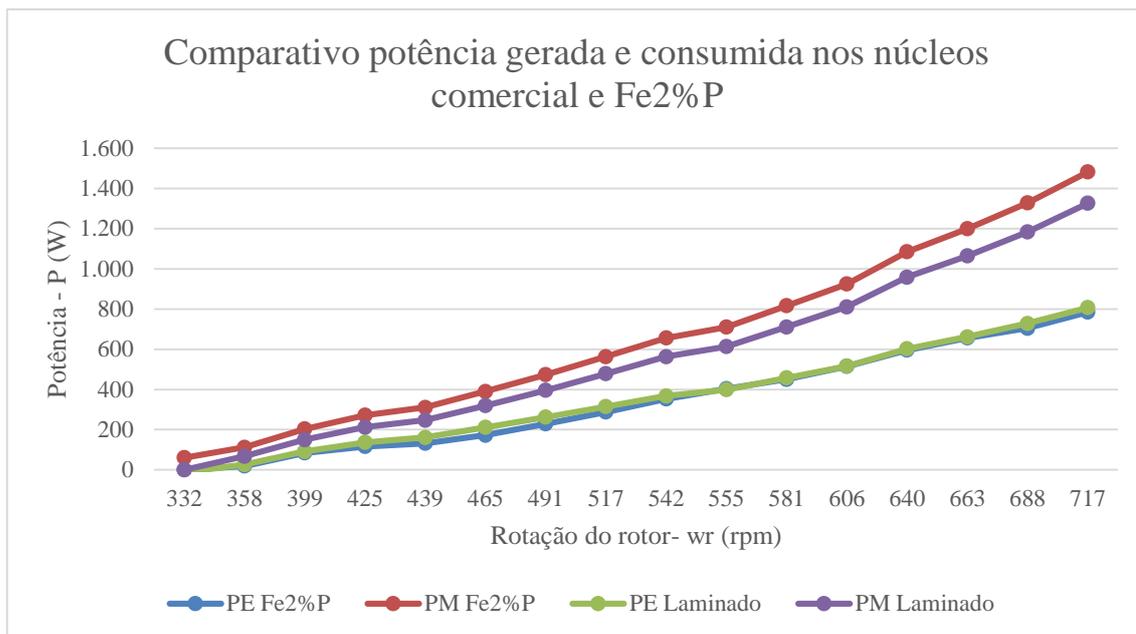


Figura 47 - Potência elétrica e mecânica dos geradores com núcleo sinterizado e laminado

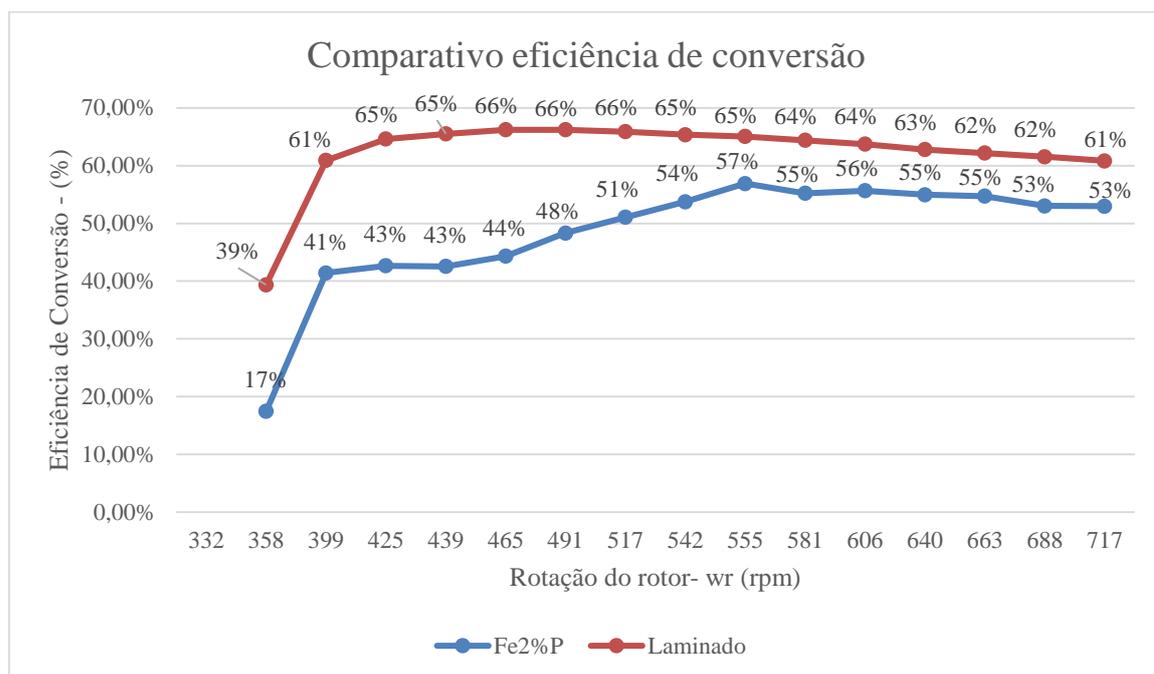


Figura 48 - Comparativo eficiência de conversão dos geradores

Observa-se que a eficiência do núcleo comercial é em torno de 8% melhor em rotações mais elevadas, apesar da eficiência do núcleo de Fe2%P ser menor, ela aumenta conforme a potência e rotação. Isto ocorre devido à diminuição das correntes parasitas no núcleo do estator com através do aumento da tensão induzida nas bobinas, com isso gerando a força contra eletromotriz.

Isso pode ser visualizado quando comparado a potência mecânica do gerador de Fe2%P em vazio com a diferença entre a potência mecânica necessária para acionamento dos geradores, subtraindo a potência mecânica do gerador com núcleo de Fe2%P pela potência mecânica do núcleo comercial, laminado (PM Fe2%P – PM laminado). Para isto foi traçada uma linha tendência no gráfico do teste em vazio, chegando em uma equação polinomial de 2ª ordem. Esse comparativo pode ser visualizado na Figura 49.

A linha tendência da potência mecânica fica próxima ao polinômio de segundo grau, desta forma usa-se o mesmo para extrapolar o valor da potência em rotações mais altas:

$$PM = 0,0005 \times wr^2 + 0,0883 \times wr - 4,951 \quad \text{eq(6)}$$

Onde:

PM = Potência mecânica

wr = Rotação do rotor

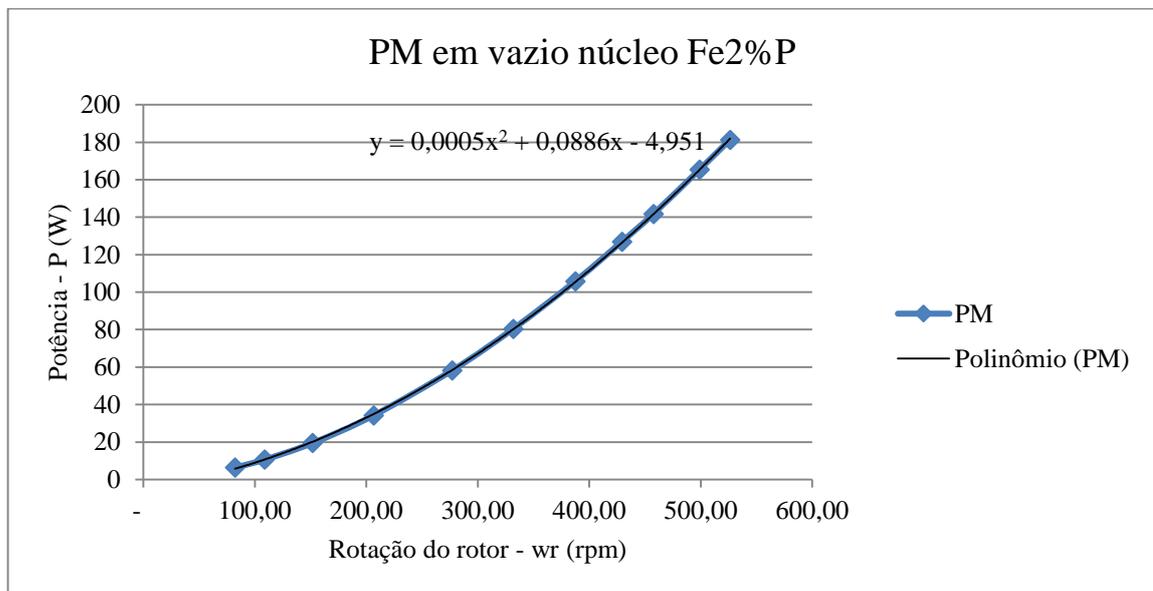


Figura 49 - Curva tendência potência mecânica gerador em vazio

Com esta expressão pode-se extrapolar o valor da potência mecânica perdido no acionamento da máquina em vazio comparando este com diferença de potência mecânica das duas máquinas com carga como mostrado na Figura 50.

Lembrando que a potência elétrica dos geradores é praticamente igual quando comparada a rotação de funcionamento. Observa-se que na linha vermelha consta a diferença entre as potências de acionamento dos dois geradores em diferentes rotações para a mesma

potência elétrica. Já na linha em azul consta a potência desperdiçada apenas com o gerador em vazio.

Quando em carga a potência mecânica acaba diminuindo de forma percentual, aumentando assim a eficiência da máquina elétrica com núcleo de Fe₂P. A energia que é desperdiçada com a máquina em vazio não se repete em sua totalidade com a máquina em carga.

A diferença de potência mecânica entre a PM Fe₂P e PM laminado é menor que a potência mecânica desperdiçada em vazio. Quando analisada uma rotação em torno de 717 RPM tem-se PM Fe₂P – PM Laminado igual a 155 W enquanto a PM com o gerador de Fe₂P em vazio é de 315 W. Isto representa uma queda de 159 W de consumo mecânico de acionamento quando o gerador está com carga elétrica acoplada.

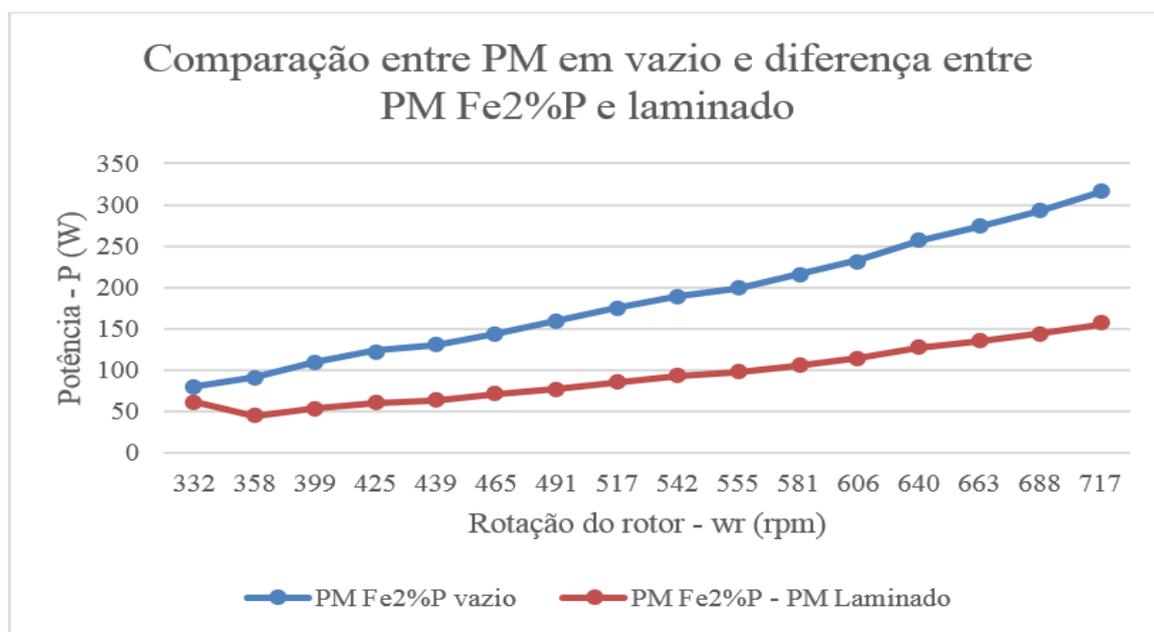


Figura 50 - Comparativo entre a diferença potência mecânica e a potência em vazio

Esta queda da potência mecânica possivelmente ocorre pela redução das correntes parasitas no núcleo do estator de Fe₂P quando adicionado carga elétrica. No momento em que se adiciona uma carga elétrica ao gerador cria-se uma força contra eletromotriz, essa energia acaba por reduzir as correntes parasitas diminuindo dessa forma a resistência mecânica. Isso não é percebido no núcleo laminado em consequência a baixa resistência elétrica do mesmo devido ao isolamento elétrico entre as camadas.

CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi apresentado o desenvolvimento e análise de uma máquina elétrica síncrona de corrente alternada e topologia Torus utilizado em gerador eólico, em que o núcleo do estator da máquina comercial, produzido originalmente laminado, foi substituído por material produzido a partir do processo de Metalurgia do Pó. Através do desenvolvimento deste trabalho foi possível analisar as características do gerador elétrico quando utilizado o núcleo do estator de liga Fe₂P, comparando seu desempenho com a máquina elétrica comercial.

De maneira geral, a substituição do núcleo do estator laminado da máquina elétrica comercial pelo núcleo obtido pelo processo de MP ocorreu dentro do esperado. A liga estudada de Fe₂P demonstrou um desempenho magnético aceitável, ficando próximo aos de trabalhos anteriores do GDER.

A divisão do núcleo do estator em quatro partes para não necessitar de uma força de compactação muito elevada apresentou-se satisfatória em caráter de estudo. A matriz não apresentou problemas durante a compactação das peças com o pó de Fe₂P.

Os testes de desempenho da máquina apresentaram bons resultados e o desempenho elétrico da máquina com núcleo de Fe₂P ficou próximo da máquina elétrica sem alterações. A potência elétrica gerada na máquina utilizando núcleo do estator de Fe₂P é próxima a potência elétrica da máquina com núcleo laminado comercial. Além disso, a entrega desta potência elétrica ocorre na mesma rotação do gerador com núcleo do estator comercial.

O desempenho de conversão mecânica para elétrica do gerador com núcleo de Fe₂P ficou menor que o desempenho da máquina comercial. Isso possivelmente ocorre devido à resistência elétrica do núcleo de Fe₂P ser menor que do núcleo que o núcleo comercial laminado.

O núcleo de Fe₂P acaba induzindo tensão no núcleo gerando correntes parasitas que funcionam como uma resistência mecânica ao gerador. As chapas do núcleo comercial apresentam isolamentos entre elas, reduzindo sua resistência elétrica em consequência reduzindo as correntes parasitas com isto aumentando o desempenho e eficiência da máquina comercial quando comparado a máquina com núcleo de Fe₂P.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Seguem abaixo algumas sugestões que podem ser utilizadas em trabalhos futuros que se baseiam nesta pesquisa:

- Testar o núcleo do estator com materiais microencapsulados como Somaloy da Höganäs, estes materiais possuem uma isolamento elétrica a base de polímero ou óxidos entre as partículas aumentando a resistência elétrica do material, em consequência reduzindo as correntes parasitas;
- Teste de técnicas para a criação da camada isolante para a liga Fe2%P em laboratório, capazes de reduzir as perdas por correntes parasitas apresentada por este;
- Testar novas ligas hipersaturadas de fósforo ou silício por outras técnicas como o sinterforjamento, ou tixoforjamento de pós, aumentando assim a resistividade. Desta forma reduzindo as correntes parasitas;
- Testar a liga de ferro dois por cento fósforo em outras topologias de máquinas elétricas observando se os resultados de desempenho se comportaram da mesma maneira.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Federicce, “Brasil 247,” 27 janeiro 2015. [Online]. Available: <http://www.brasil247.com/pt/247/economia/167372/Energia-e-%C3%B3lica-Brasil-vive-revolu%C3%A7%C3%A3o-silenciosa.htm>. [Acesso em 02 fevereiro 2015].
- [2] A. d. M. Pereira, Sistema de tração de um ônibus elétrico híbrido com pilhas a combustível e baterias, Rio de Janeiro - Brasil: Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia em Energia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [3] P. Pauletti, Construção e análise do desempenho de um motor de indução trifásico com núcleo produzido via metalurgia do pó, Porto Alegre - Brasil: Dissertação de Mestrado, PPGEM - UFRGS, 2012.
- [4] L. L. Cerva, Desenvolvimento de uma máquina síncrona com ímas permanentes e núcleo sinterizado utilizada em aerogerador, Porto Alegre - Brasil: Tese Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M - UFRGS, 2014.
- [5] M. Borba, A. Tavares, D. P. Wermuth, M. d. M. Dias e L. Schaeffer, Development of a rotor from powder metallurgy and permanent magnets for a synchronous machine used in wind turbines, Tailândia - Bangkok: Sustainable Development Conference, 2014.
- [6] M. E. Pflingstag, A. C. Tavares, M. d. M. Dias, R. Mesquita e L. Schaeffer, Análises de desempenho por elementos finitos de um micro-motor de passo com quatro rotores de morfologias diferentes, Porto Alegre - Brasil: 4ª Conferência Internacional de Metalurgia do Pó, 2013.
- [7] M. M. Dias, Construção de uma máquina síncrona de relutância trifásica com rotor de material magnético macio sinterizado, Porto Alegre - Brasil: Tese de Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M - UFRGS, 1990, p. 62.
- [8] J. A. L. J. Esswein, Desenvolvimento de compósitos magnéticos macios utilizados em núcleos de máquinas elétricas, Porto Alegre - Brasil: Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M - UFRGS, 2009.

- [9] D. Jiles, Introduction to magnetism and magnetic materials, London - Inglaterra: Chapman and Hall, 1991.
- [10] S. Bittencourt, Caracterização de ligas magnéticas sinterizadas para aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas, Porto Alegre - Brasil: Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M - UFRGS, 2012.
- [11] R. F. Krause, J. H. Bularzik e H. R. Kokal, A new soft magnetic material for AC and DC motor applications, vol. 6, Journal of Materials Engineering and Performance, 1997, pp. 710-712.
- [12] B. D. Cullity e C. Graham, Introduction to magnetic materials, Addison-Wesley Publishing, 1972.
- [13] J. S. L. E. J. C. L. D. M. Barboza, Influência da variação do teor de resina nas propriedades magnéticas de compósitos magnéticos macios aplicados a núcleo de máquinas elétricas, Porto de Galinhas - PE, 2008.
- [14] P. Jansson, Soft magnetic materials for A.C. applications, vol. 35, Powder Metallurgy, 1992, pp. 63-66.
- [15] J. L. J. S. L. D. M. C. L. B. J. Esswein, Estudo comparativo de ligas magnéticas através de simulação por elementos finitos, Porto de Galinhas - Brasil: 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008.
- [16] C. Lall e L. W. Baum, High performance soft magnetic components by powder metallurgy and metal injection molding, vol. 18, Modern Developments in P/M, 1998, pp. 363-389.
- [17] E. Adler, G. Reppel, W. Rodewald e H. Warlimont, Powder metallurgy 1986 state of the art, powder metallurgy in science and practical technology, Düsseldorf - Freiburg: International Conference and Exhibition Powder Metallurgy, 1986.
- [18] J. Peterson e R. Devine, Complex permeability of soft magnetic ferrite/polyester resin composites at frequencies above 1MHz, J. Magn. Mater, 1999, pp. 196-197.

- [19] F. Ramos, M. Borba, D. Wermuth, A. Tavares, L. Schaeffer e V. Canalli, Development of synchronous generator with hard drives components, Bangkok - Tailândia: Sustainable Development Conference, 2014.
- [20] F. Weschenfelder, P. Pauletti, S. D. Bittencourt, L. Pelegrini, D. K. Ito e L. Schaeffer, Situação atual e perspectivas da produção de Ímãs permanentes e reservas de terras raras: Brasil × Mundo, São Paulo - Brasil: Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.
- [21] L. C. A. B. d. Pinho, Materiais magnéticos e suas aplicações, Porto- Portugal: Dissertação mestrado Eng. Eletrotécnica e Computadores- FEUP, 2009.
- [22] M. N. Sadiku, Elementos de eletromagnetismo, Bookmann, 2008.
- [23] F. Ramos, A. Tavares, F. Peruchi e C. Vicente, Análise de protótipo de gerador síncrono via componentes de disco rígido, Sapucaia do Sul - Brasil: 2º Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul, 2013.
- [24] G. C. d. Nascimento Junior, Maquinas elétricas: teoria e ensaios, Érica, 2008.
- [25] I. L. Kosow, Máquinas elétricas e transformadores, Brasil: Globo, 2006, p. 2006.
- [26] A. E. Fitzgerald, C. K. J. Umans e S. D., Máquinas elétricas: Com introdução à eletrônica de potência, 6ª ed., Brasil: Bookman Companhia, 2006.
- [27] WEG, 2009. [Online]. Available: <http://pt.scribd.com/doc/35118692/WEG-Apostila-Sobre-Motores-Eletricos>. [Acesso em 20 02 2014].
- [28] J. O. M. Osório, Análise da máquina torus sob frenagem eletrodinâmica, Porto Alegre - Brasil: Dissertação de Mestrado, PPGEE - UFRGS, 2011.
- [29] J. F. Gieras, R.-J. Wang e M. J. Kamper, Axial flux permanent magnet brushless machines, Springer Netherlands, 2008.
- [30] L. T. d. R. Loureiro, Um estudo sobre a máquina torus, Porto Alegre - Brasil: Tese doutorado, PPGE3M - UFRGS, 2008.

- [31] S. Huang, T. Aydin e T. Lipo, Torus concept machines: pre-prototyping design assessment for two major topologies, Shanghai - China: Industry applications conference, 2001.
- [32] K. H. Nielsen, Technological trajectories in the making: Two case studies from the contemporary history of wind power, 3 ed., vol. 52, Wind Energy, 2010.
- [33] T. P. S. d. Azevedo, Bancada experimental para ensaios em aerogeradores elétricos utilizados em aerogeradores de pequeno porte, Belém - Brasil: Dissertação de Mestrado, PPGEE - UFPA, 2012.
- [34] M. Dias, H. Mozetic, J. Barboza, R. Martins, L. Pelegrini e L. Schaeffer, Influence of resin type and content on electrical and magnetic properties of soft magnetic composites (SMCs), Powder Technology 237, 2013.