

DESENVOLVIMENTO DE UM ROTOR PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS A PARTIR DA M/P COM ÍMÃS EMBUTIDOS¹

Jacoby, G. G.²
Martins, R.M.³
Aquim, P. M.⁴
Cezar, J. L.⁵
Schaeffer, L.⁶
Dias, M. M.⁷

Resumo: Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento (projeto, construção e testes) de um rotor para gerador elétrico de alto desempenho de 5 kW, também conhecido por Máquina Elétrica Rotativa Trifásica com Ímãs Permanentes, a ser utilizado em um gerador eólico. Este gerador (ou máquina elétrica rotativa) foi desenvolvido utilizando-se os processos da *Metalurgia do Pó (M/P)* para construção do núcleo do rotor e ímãs permanentes de Nd-Fe-B, porém o núcleo do estator foi construído a partir de um pacote de chapas laminadas, utilizando-se um aço magnético de elevada resistividade elétrica, como o aço-silício. Outras partes da máquina, como eixos, rolamentos e carcaça, foram adaptadas a partir de outras máquinas de dimensões equivalentes como um motor de indução ou usinadas. Geradores elétricos (ou máquinas elétricas rotativas) construídas a partir desta topologia podem apresentar rendimento até 95%. Esta máquina foi testada em bancada como gerador no qual foram observados tensão, corrente e formas de ondas dos enrolamentos de armadura.

Palavras-chave: Máquinas Síncronas com Ímãs Permanentes, Aerogeradores, Metalurgia do Pó.

¹ Contribuição técnica a ser apresentada na 5ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis – Brasil/RS, 7 a 9 de outubro de 2015, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Mestrando em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais. Engenheiro Eletrônico – Universidade Feevale Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93352000 – Novo Hamburgo – RS – Brasil. Fone: (51) 9945-3793 – e-mail: gilsonjacoby@terra.com.br;

³ Dr. Prof. Depto. Eng. Química e Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Campus II RS 239, 2755 – CEP 93352000 - Novo Hamburgo – RS – Brasil; Fone: (51) 35868800; Fax: (51) 35868836; e-mail: ricardomartins@feevale.br;

⁴ Dr^a. Prof^a. Depto. Eng. Química e Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Campus II RS 239, 2755 – CEP 93352000 - Novo Hamburgo – RS – Brasil; Fone: (51) 35868800; Fax: (51) 35868836; e-mail: patrice@feevale.br;

⁵ Dr. Prof. Curso. Eng. Mecânica e Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos Sustentáveis, ULBRA, CEP: 92.425-900 – Canoas/RS – Brasil – Fone: (51) 3462-9504 – e-mail: engmecanica.canoas@ulbra.br;

⁶ Prof. Dr. - Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, (PPGE3M), UFRGS. Av: Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. e-mail: schaeffer@ufrgs.br

⁷ Dr. Eng. Prof. Depto. Eng. Eletrônica e Mestrado em Tecnologia de Materiais. Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93352000 – Novo Hamburgo – RS – Brasil Fone: (51) 35868800 Fax: (51) 35868836 – e-mail: moisesdias@feevale.br.

1. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas podem funcionar como motor ou gerador, e possuem duas partes básicas que são os núcleos do estator e rotor. Estes núcleos, com raras exceções, são construídos atualmente, a partir de finas lâminas metálicas (chapas de aço baixo carbono) com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas. Algumas máquinas de maior rendimento, como os geradores são construídas com chapas de aço-silício, com percentual de aproximadamente 3% de silício. O processo total para confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, estampagem, um processo para isolamento elétrica, empacotamento e fixação. Com relação às chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste em um tratamento térmico, no qual os pacotes de chapas são colocados em fornos durante certo tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas, e em consequência, há a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes. Alguns tipos de chapas de aço-silício são fornecidas pelos fabricantes com uma pintura a base de óxidos sobre uma das superfícies [1,2].

Núcleos magnéticos envolvidos por bobinas, onde circulam correntes alternadas, geram um fluxo magnético também alternado. Por este motivo, esses núcleos ficam sujeitos a ação de correntes parasitas, também conhecidos por correntes de Foucault, que são responsáveis por apreciável perda de potência nestes núcleos. A construção destes núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente reduz parcialmente as correntes parasitas, reduzindo as perdas por correntes de Foucault [1,2].

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

Contudo, utilizando-se os processos da M/P (Metalurgia do Pó) é possível construir estes núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética e maior resistividade elétrica, se comparadas ao aço convencional, o que reduz as correntes parasitas [3, 4]. No caso da aplicação deste processo na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas, pode resultar em máquinas com algumas vantagens sobre aquelas com núcleos convencionais. Assim, na medida em que for possível construir núcleos em blocos únicos e maciços, menos etapas estarão presentes na construção das máquinas e, naturalmente, menos energia será consumida na fabricação das mesmas. Salienta-se também que a utilização de ligas magnéticas de maior resistividade na construção dos núcleos do estator e do rotor, haverá uma redução nas perdas por correntes parasitas, maior rendimento, resultando assim economia de energia elétrica.

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

de máquinas obtidas a partir da M/P no intuito de se comprovar ou descartar a aplicação desta tecnologia nestas máquinas [4].

Assim, neste trabalho, utilizou-se um motor de indução de alto rendimento, no qual o núcleo do rotor, usualmente construído a partir de chapas de aço laminadas, foi substituído por blocos maciços de ferro puro sinterizado, com ímãs permanentes embutidos no interior do núcleo, transformando, portanto, este motor de indução em uma máquina síncrona com ímãs permanentes de Nd=Fe-B, possível de ser utilizado em gerador trifásico com qualquer sistema de acionamento como uma turbina eólica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi realizado um estudo sobre o ferro sinterizado, onde foram obtidas propriedades magnéticas, resistividade elétrica e propriedades mecânicas (dureza e tensão de escoamento). A seguir foi projetado o núcleo do rotor [1,2,5,6], tomando como base um motor de indução de 10 cv produzido por Voges Motores, utilizando-se também o programa de simulação por elementos finitos FEMM 4.2, e após o rotor foi construído e inserido na máquina. Finalmente a máquina foi testada em bancada para verificação de tensão, corrente e formas de ondas dos enrolamentos de armadura.

2.1. Características da Máquina Utilizada como Base

A máquina síncrona com ímãs permanentes desenvolvida neste trabalho foi projetada a partir de um motor de indução trifásico de alto rendimento com quatro pólos e 10 CV (Figura 1), produzido por Voges Motores[®] de Caxias do Sul. Assim o projeto das ranhuras, eixo, carcaça, tampas e rolamentos foram deste motor de indução, contudo o núcleo do rotor foi construído a partir de ferro puro sinterizado e ímãs permanentes de Nd-Fe-B.

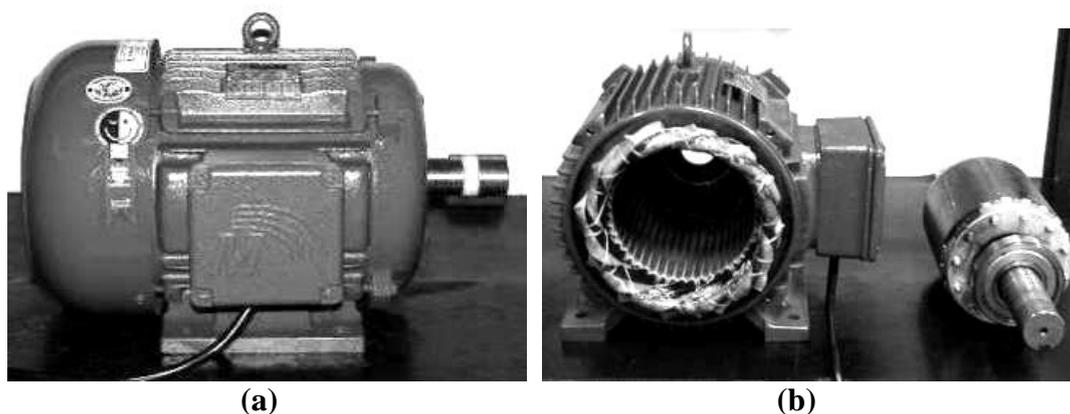
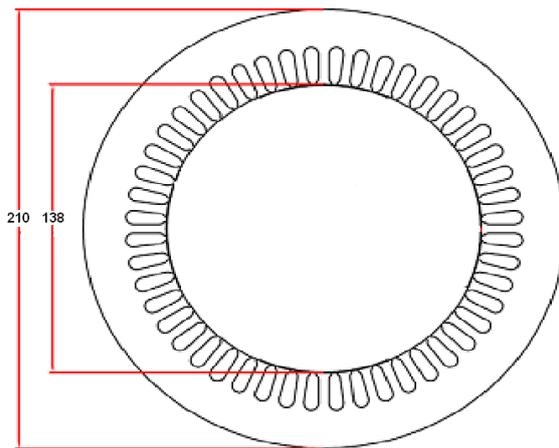


Figura 1 – Motor de indução trifásico de 10 CV - (a) Vista lateral - (b) parcialmente desmontado

Os dados da máquina e chapas do estator encontram-se na Figura 2. O motor possui originalmente um bobinamento em série sendo 12 espiras por ranhura do estator com fio 12AWG e 192 condutores em série por fase. A corrente nominal utilizada foi de 14.2 A, para uma tensão de 380 V ligação Y.



Carcaça de motor para 10cv 220v 60Hz
 Número de Polos: 4
 Diâmetro externo do disco: 210 mm
 Diâmetro interno do disco: 138 mm
 Número de ranhuras: 48
 Diâmetro Interno : 138 mm
 Pacote de chapas: 148 mm
 Número de chapas: 320

Figura 2 – Esquema das chapas do estator da máquina

2.2. Estudo do Ferro Puro sinterizado para o Núcleo do Rotor

A M/P é um processo relativamente recente da metalurgia de transformação, no qual peças são obtidas a partir de seus pós constituintes. Os processos básicos da M/P são: obtenção de pós e mistura, compactação e sinterização. Às vezes é necessária uma quinta etapa, como a retificação. Na M/P, os pós, depois de serem misturados, são compactados em matrizes onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Na sequência, são colocados em fornos para sinterização onde adquirem consistência e resistência mecânica. Os materiais obtidos a partir da M/P convencional também são denominados de sinterizados [7,8].

A construção do rotor da máquina foi a partir de blocos maciços de ferro puro sinterizado. Para análise das propriedades magnéticas e resistividade elétrica, utilizou-se a matriz da figura 3-a, para a qual foram obtidos corpos de prova na forma de anéis (figura 3-b). Para análise da dureza e tensão de escoamento das ligas estudadas utilizou-se a matriz da figura 4-a, obtendo-se corpos de prova na forma de cilindros (figura 4-b).



Figura 3 – Amostras na forma de anel – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova

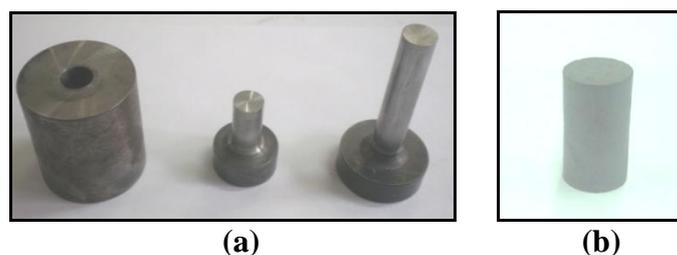


Figura 4 – Amostras na forma de cilindro – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova

O pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45 µm e 150 µm adquirido junto à Höganäs Brasil Ltda. Para a compactação dos corpos de prova, foi adicionado ao pó de ferro 1% de lubrificante sólido à base de estearato de zinco, em um misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm durante 20 minutos, para dispersão dos constituintes.

No que tange à pressão de compactação, os corpos de prova foram submetidos a uma pressão média de 600 MPa, seguindo-se orientação de dados da literatura [7,8].

A sinterização dos corpos de prova foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera controlada (pressão atmosférica) e gás verde (5% de hidrogênio e o restante de nitrogênio). Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, até a temperatura de 500 °C, permanecendo as peças nesta temperatura durante 30 minutos para retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir, a temperatura foi elevada para 1.150 °C, ocorrendo a sinterização, com um novo patamar isotérmico nesta temperatura por 60 minutos (patamares segundo dados bibliográficos [7,8]). Após, as peças permaneceram no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente.

As propriedades magnéticas foram obtidas a partir das curvas magnéticas (laço de histerese e curva de magnetização) que relacionam campo magnético \mathbf{H} aplicado a um material com a indução magnética \mathbf{B} resultante. A partir do laço de histerese, foram obtidas a retentividade (magnetismo remanente) e a coercitividade (campo desmagnetizante). Através da análise da curva de magnetização, foi observada a permeabilidade magnética e a indução de saturação ou indução máxima (que também pode ser visualizada a partir do laço de histerese) [9]. A determinação das propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide) segue a norma ASTM A773 [10]. As curvas magnéticas foram obtidas a partir de um dispositivo modelo *TLMP-TCH-14*.

A resistividade do material (corpos de prova) das ligas foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Para medição desta, utiliza-se um dispositivo denominado de multímetro ou multiteste, que mede diretamente a resistência elétrica do corpo. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa, aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. Um artifício é a utilização de um anel, cortando-se um segmento do mesmo, fazendo que este tenha a forma de uma barra curvada, ou seja, de grande comprimento e pequena área de seção transversal [11]:

Para avaliação da resistência à vibração de um material a ser utilizado em uma máquina elétrica rotativa, também foram realizados ensaios mecânicos nos corpos de prova. Os ensaios de dureza (Brinell – HB) foram realizados em um durômetro *Precision-England* com indentador de esferas de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf, segundo a norma ASTM E10 [12]. Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000, utilizando-se velocidades de 2,0 mm/min, de acordo com a norma ASTM E9 [13].

2.3. Projeto da Máquina e Simulação

O projeto do estator, como se trata da adaptação de uma máquina da Voges motores, encontra-se na figura 2, contudo algumas medidas foram omitidas por motivos óbvios. Assim, o núcleo do rotor foi projeto a partir de uma máquina síncrona trifásica desenvolvida pela Siemens com ímãs de Nd-Fe-B embutidos no núcleo do rotor [2], considerando também o uso de ferro puro sinterizado, mantendo-se todas as outras partes da máquina, como carcaça, estator, eixo e tampas do motor de indução de 10 cv da Voges Motores. Desta maneira foi possível transformar um Motor de Indução em uma Máquina Elétrica Síncrona Trifásica ou mais precisamente um Gerador Trifásico de Alto Rendimento. A figura 5-a mostra o esboço do projeto do núcleo do rotor e a figura 5-b mostra a vista em perspectiva.

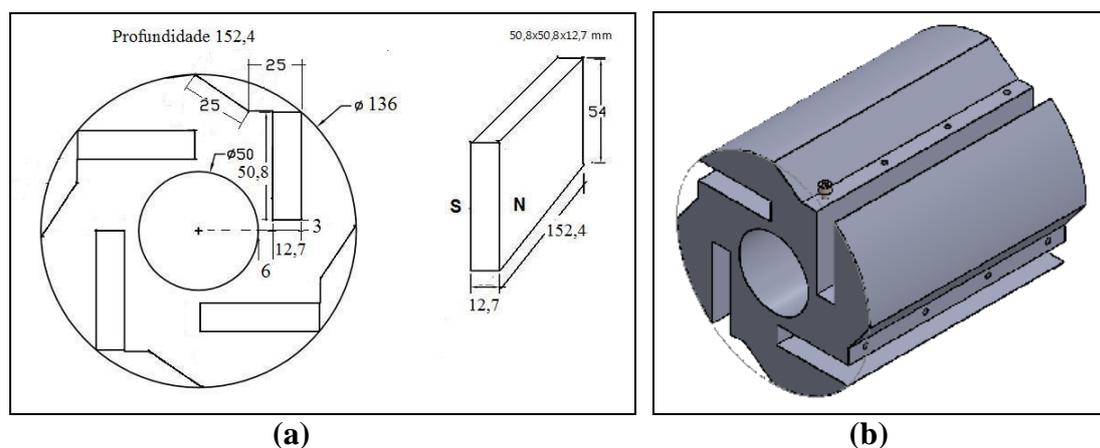


Figura 5 – Projeto do rotor – (a) Desenho dimensional – (b) vista em perspectiva

Com relação às simulações, os resultados das iterações eletromagnéticas de uma máquina elétrica rotativa podem ser obtidos através de simulações em software de elementos finitos FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics). A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. O objetivo principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada uma com uma geometria simples (e.g. triângulo). Em cada elemento a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo [14].

Através do FEMM 4.2 é possível verificar dados importantes tais como o torque momentâneo da máquina elétrica, o fluxo concatenado em cada bobina e as perdas por corrente de Foucault. O conhecimento destes resultados permite ao projetista verificar a eficiência da máquina e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho.

Foram realizadas simulações comparativas considerando o estator com núcleo de chapas laminadas (aço M15) conforme desenho da figura 2, e o rotor (figura 5) a partir de chapas de aço M15 e a partir de blocos sinterizados de ferro puro.. Assim, foram inseridas no FEMM 4.2 as topologias do estator e rotor, características do bobinamento e as curvas de magnetização dos materiais utilizados (figura 14-b), ou seja, aço M15 e ferro sinterizado. A corrente nominal foi de 14,2 A por fase e 192 condutores em Série por Fase. Assim, foi possível uma análise comparativa de torque e fluxo de entreferro considerando os núcleos do rotor a partir de chapas de aço M15 e ferro sinterizado.

2.4. Construção da Máquina

Para a construção do núcleo do rotor a partir de ferro sinterizado, não foi possível construir uma matriz para a compactação da peça mostrada na figura 5, uma vez que teria um custo muito elevado. A solução encontrada foi a utilização de uma matriz já disponível para compactação de tarugos maciços (figura 6-a), sinterização dos mesmos e usinagem (eletroerosão a fio) para a forma final do núcleo do rotor em segmentos de blocos maciços. A Figura 6-b mostra os ímãs de Nd-Fe-B utilizados..

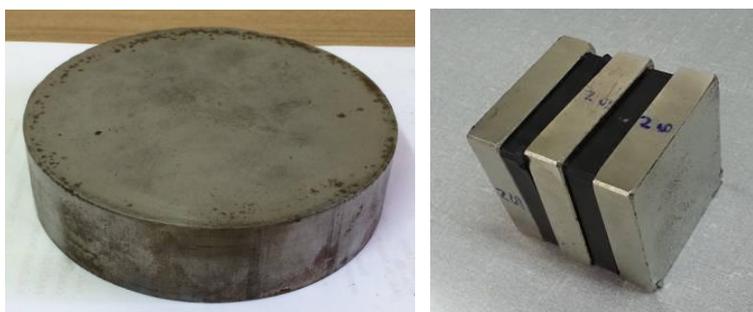


Figura 6 – Peças a serem utilizadas na construção do rotor da máquina - (a) Tarugo compactado e sinterizado – (b) Ímãs de Nd-Fe-B

Assim, foram compactados e sinterizados quatro blocos cilíndricos (figura 6-a), usinados e inseridos no eixo da máquina, conforme se pode observar na Figura 7. Posteriormente através de eletroerosão a fio, foram feitas as cavidades no núcleo do rotor da máquina para colocação dos ímãs de Nd-Fe-B (figura 8-a), bem como barras de latão para prender os ímãs no interior das cavidades (figura 8-b)



Figura 7 – Blocos usinados e inseridos no eixo da máquina



Figura 8 – Usinagem (eletroerosão a fio) e confecção das cavidades dos ímãs – (a) Detalhe da cavidade – (b) tira de latão para prender os ímãs

A figura 9-a mostra o rotor montado com as tiras de latão fixas, contudo, mais dois discos de aço inoxidável foram inseridos nas extremidades do núcleo do rotor (figura 9-b), uma vez que as elevadas forças de atração e repulsão dos ímãs poderiam fazê-los soltar-se do interior do núcleo, o que seria algo até mesmo perigoso.



Figura 9 – Máquina montada – (a) Detalhe da fixação das tiras de latão – (b) Detalhe de fixação dos discos de aço inoxidável nas extremidades

A figura 10-a mostra a carcaça, estator e eixo da máquina a ser montada, já na bancada de ensaios onde também pode-ser visualizar o outro motor que irá funcionar como máquina primária, e a figura 10-b mostra também as mesmas máquinas e bancada mas com o rotor a frente.

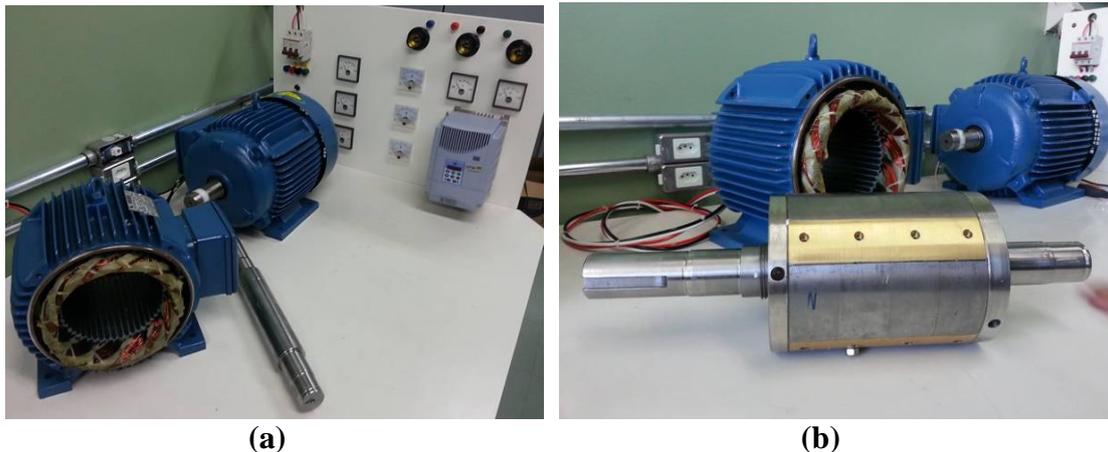


Figura 10 – Detalhes da máquina na bancada – (a) Sem o rotor – (b) Com o rotor a sua frente

A figura 11-a mostra o detalhe dos parafusos sendo colocados e a máquina sendo fechada com o rotor em seu interior, e a figura 11-b mostra o acoplamento entre as duas máquinas ou seja, a máquina desenvolvida neste projeto e o motor de indução para acionamento da mesma como máquina. Como a carcaça das máquinas é a mesma, externamente são idênticas, contudo o interior difere completamente.

2.5. Bancada para Ensaios

Para os ensaios da máquina como gerador, possível de ser utilizado em um aerogerador de 5 kW, foi desenvolvida uma bancada (figura 12), composta inicialmente pelos seguintes dispositivos:

- Motor de Indução funcionando como Máquina Primária no lugar da Turbina Eólica;
- Inversor para acionamento do Motor de Indução;
- Gerador ou a Máquina Síncrona Trifásica desenvolvida neste projeto (Máquina Secundária);
- Voltímetros, Amperímetros e Wattímetros para leitura de Tensão, Corrente e Potência, tanto da máquina primária, quanto da máquina secundária;
- Lâmpadas e Resistências Elétricas funcionando como Cargas para o Gerador.



Figura 11 – (a) Máquina sendo fechada com a colocação dos parafusos – (b) Acoplamento das duas máquinas

Também foi colocado na bancada um segundo inversor idêntico ao primeiro, de tal maneira a regular e estabilizar a tensão gerada na saída do gerador. Quando em operação, também são colocadas na bancada, multímetros portáteis e osciloscópio para visualização de formas de ondas de tensão geradas.

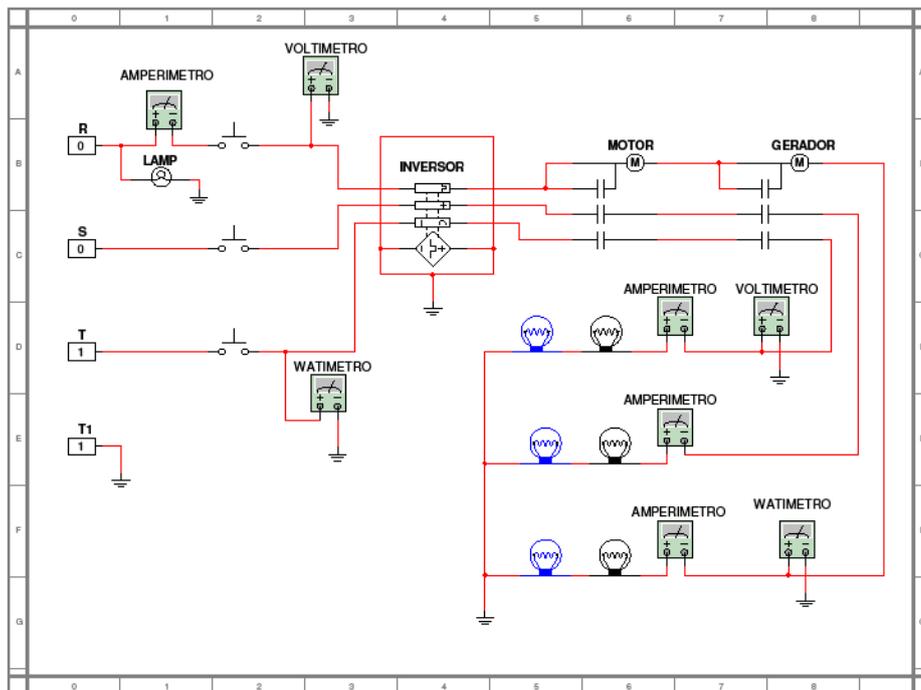


Figura 12 – Esquema Elétrico da Bancada de Ensaios concebida inicialmente

Conforme pode ser visualizado na figura 13-a e figura 13-b, a bancada é composta por:

- Inversor WEG CFW 08 de para 10 cv (acionamento do motor de indução ou máquina primária)
- Voltímetro, Amperímetro e Wattímetro (medições da Máquina Primária)
- Voltímetros, Amperímetro e lâmpadas na saída do gerador (para medições e Carga de Sinalização)
- Resistências Elétricas (carga para o Gerador)
- Segundo Inversor WEG (artifício estudado para regulação da tensão de saída do Gerador para variações de amplitude e frequência)



Figura 13 – Bancada de Testes do Gerador Trifásico ou Máquina desenvolvida neste projeto – (a) Vista geral com as máquinas – (b) Detalhe da vista lateral

A partir da bancada mostrada na figura 13 é possível medir as potências, direta ou indiretamente, na entrada e saída das máquinas possibilitando assim a avaliação do desempenho e rendimento da máquina desenvolvida neste projeto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Propriedades Físicas Obtidas das Ligas Sinterizadas

Com relação aos corpos de prova de ferro puro sinterizado, foram obtidas propriedades magnéticas a partir das curvas BxH (histerese – figura 14-a e magnetização – figura 14-b), resistividade elétrica e propriedades mecânicas.

Salienta-se que, a curva de histerese do Fe puro, tem características semelhantes ao ferro baixo carbono, material típico utilizado em pacotes de chapas laminadas utilizados na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas convencionais [1,2,5]. A tabela 1 mostra os resultados da densidade, resistividade elétrica, das propriedades magnéticas e mecânicas observadas na forma de anel e cilindro, a partir dos valores médios de três corpos de prova para cada material estudado.

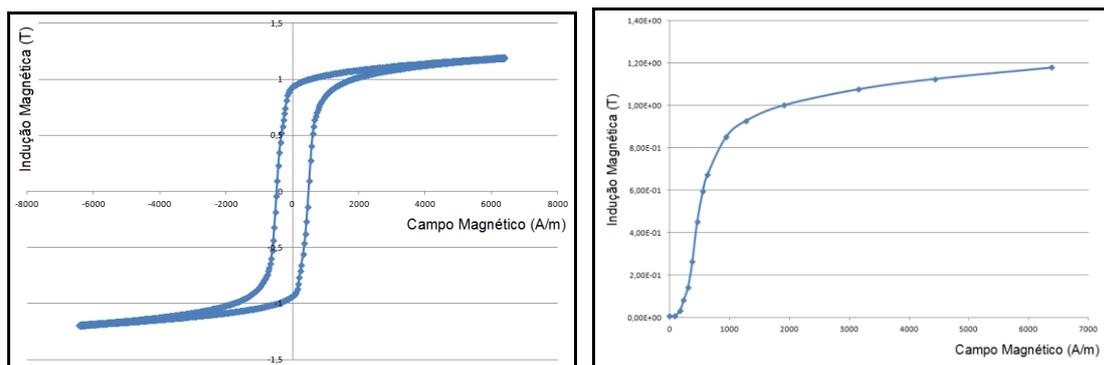


Figura 14 – Curvas magnéticas do ferro sinterizado – (a) Histerese – (b) Magnetização

Tabela 1 – Propriedades físicas do ferro sinterizado

| Material | ρ_m [g/cm ³] | ρ_e [$\mu\Omega.m$] | B_r [T] | H_c [A/m] | B_{max} [T] | μ_r | HB | σ_e [kgf/mm ²] |
|------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------|----------------|------------------|---------|------|--------------------------------------|
| Ferro Puro | 6,632 | 0,157 | 0,90 | 448,2 | 1,19 | 1.852,6 | 52,1 | 13,99 |

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

Os valores obtidos na tabela, diferem um pouco das referências bibliográficas [3]. Tal fato ocorreu devido às muitas variantes nos processos da M/P, na qual fatores como tamanho e forma de partícula, pressão de compactação, patamares de sinterização e atmosfera influenciam na densidade desejada [7,8]. Ademais, algumas referências não indicam as pressões de compactação utilizadas para materiais magnéticos macios por M/P, sendo que em alguns estudos utilizam-se pressões de até 800 MPa para materiais compósitos por M/P [15], e tal pressão tende a aumentar a densidade.

O Ferro sinterizado apresentou tensão de escoamento de 139,0 MPa (13,99 kgf/mm²). O aço 1008 utilizado na maioria de núcleos de máquinas elétricas rotativas [1,2] possui tensão de escoamento média de 170 MPa. O Aço AISI 1008 possui dureza de 86 HB [16]. A dureza do Ferro sinterizado foi de 52,5 HB. Assim, com relação às propriedades mecânicas, o Ferro sinterizado apresenta parâmetros aceitáveis para sua utilização na construção de núcleos da maioria das máquinas elétricas rotativas [1,2].

3.2. Resultado das Simulações

Foram realizadas simulações com estator de chapas M15 e núcleo do rotor também com chapas M15 mas também com ferro sinterizado. A figura 15-a mostra, à esquerda, a amplitude, em módulo, da indução de entreferro, e a direita, as linhas de fluxo magnético geradas no plano longitudinal da máquina com rotor de chapas de aço M15. As figuras 16-a e 16-b mostram os mesmos gráficos para o rotor com ferro sinterizado.

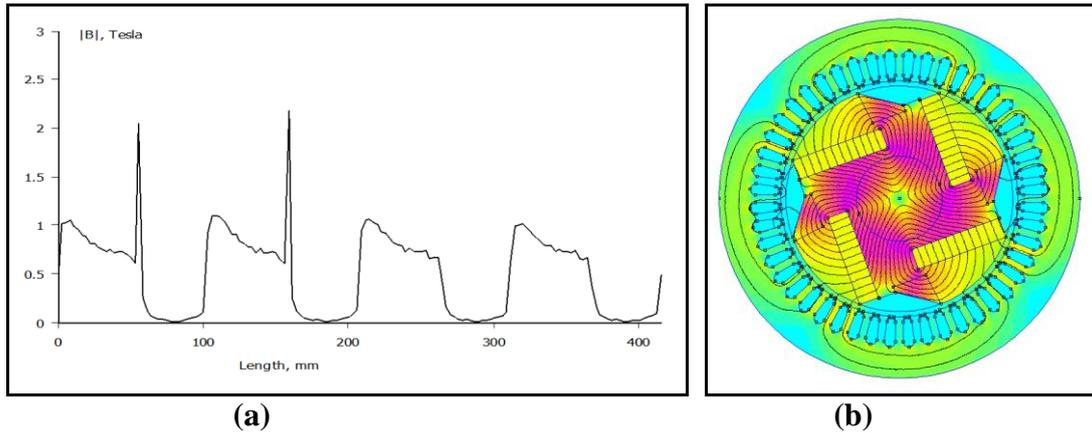


Figura 15 – Simulação da máquina com rotor a partir de chapas aço M15 – (a) Densidade de fluxo de entreferro – (b) Linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina

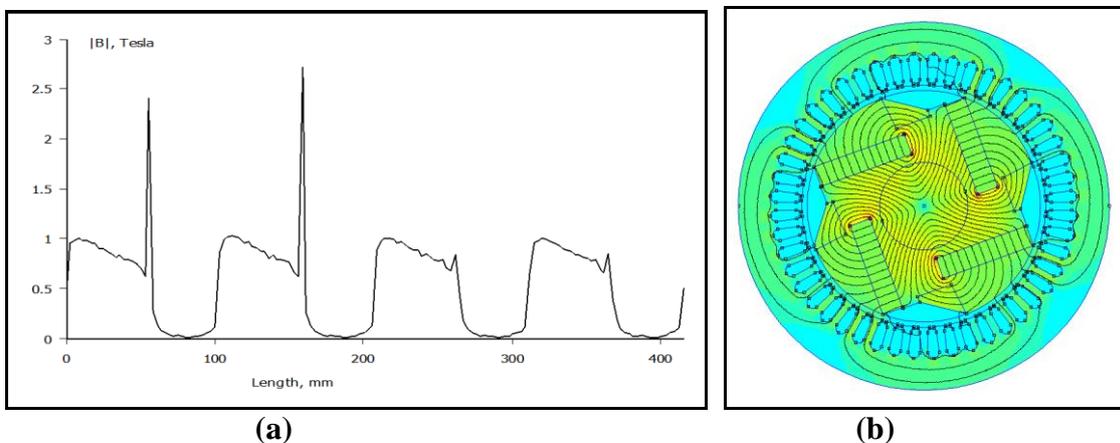


Figura 16 – Simulação da máquina com rotor a partir de ferro sinterizado – (a) Densidade de fluxo de entreferro – (b) Linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina

A tabela 2 mostra os valores máximos de densidade de fluxo de entreferro e torque desenvolvido na ponta de eixo, considerando a máquina funcionando como motor.

Tabela 2 – Simulação de Torque e Densidade de Fluxo de entreferro para núcleo de Ferro sinterizado e Chapas M15

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

Os testes e simulações realizados com ferro sinterizado apresentou resultados muito semelhantes em comparação com motores construídos a partir do método convencional de chapas laminadas, conforme se pode observar na tabela 2. Contudo convém salientar que as simulações realizadas consideram somente o torque instantâneo, ou seja, estaticamente. Entretanto, como neste tipo de máquina a variação

de fluxo magnético no rotor é pequena, este fica sujeito a baixas correntes parasitas, reduzindo assim as perdas magnéticas no ferro.

Em uma máquina elétrica rotativa, seja funcionando como motor ou gerador, o torque na ponta de eixo é função do fluxo magnético de entreferro (indução máxima) e da inclinação das linhas de fluxo magnético no entreferro, também conhecido como ângulo de carga para o caso das máquinas elétricas síncronas rotativas. Uma máquina elétrica rotativa é, portanto, um transdutor dinâmico de energia, ou seja, como motor, transforma energia elétrica dos enrolamentos de armadura em energia mecânica entregue a uma carga na ponta de eixo. Em um gerador, processa-se o contrário, isto é, transforma energia mecânica na ponta de eixo, a partir de uma turbina, por exemplo, em energia elétrica. Em ambos os casos, a conversão de energia elétrica para mecânica e vice-versa ocorre a partir do campo magnético, e o fluxo magnético de entreferro (ou indução máxima) é o fator determinante. Em razão disso, através da simulação, consideram-se como melhores resultados as máquinas que operam com maior fluxo magnético de entreferro e os maiores torques finais [1,2,5].

3.3. Resultados dos Ensaiois

A máquina síncrona com ímãs permanentes ou mais especificamente o gerador trifásico desenvolvido neste projeto, foi testado em bancada. A partir do inversor da máquina primária (motor de indução acoplada a direita da máquina), foi possível variar velocidade angular do mesmo, fazendo com que o eixo do gerador também variasse na mesma velocidade. Assim, iniciou-se com baixas velocidades, aumentando-se lentamente até os 60 Hz da rede, ou 1800 RPM do eixo de rotação das máquinas (4 polos), observando inicialmente as formas de onda (figura 17-a) e a tensão gerada na saída do Gerador (figura 17-b), além dos componentes que compõe a bancada.

A seguir, foram ligadas as lâmpadas em uma ligação triângulo na saída do gerador, variando-se a velocidade de rotação do eixo, medindo tensão e corrente, tanto na entrada no motor de indução trifásico (máquina primária) quanto na saída do aerogerador, observando-se também as formas de onda para estas frequências. A tabela 3 mostra os valores medidos, para frequências de 15, 30, 45 e 60 Hz da corrente, equivalente a velocidades angular de giro do rotor de 450, 900, 1350 e 1800 RPM. A figura 18-a mostra a forma de onda gerada para uma das fases do gerador e a figura 18-b mostra as lâmpadas alimentadas a partir do gerador para uma frequência de 45 Hz de tensão e corrente (1350 RPM).

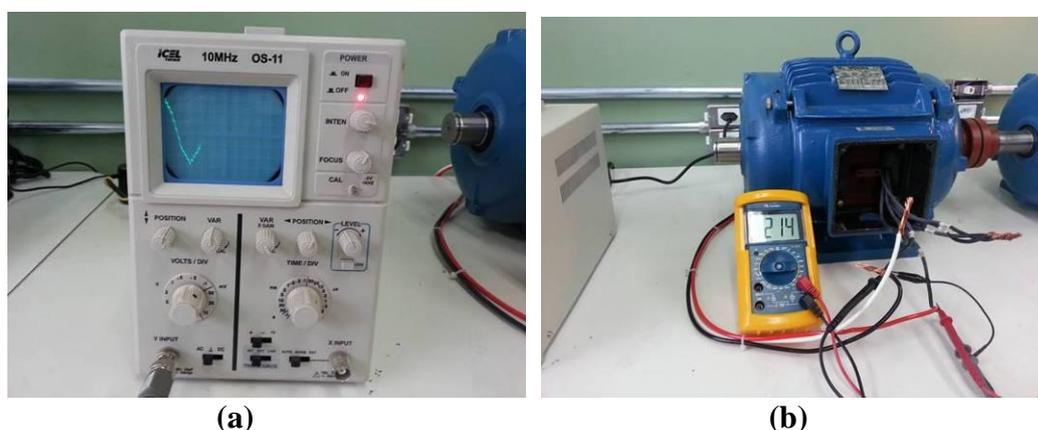
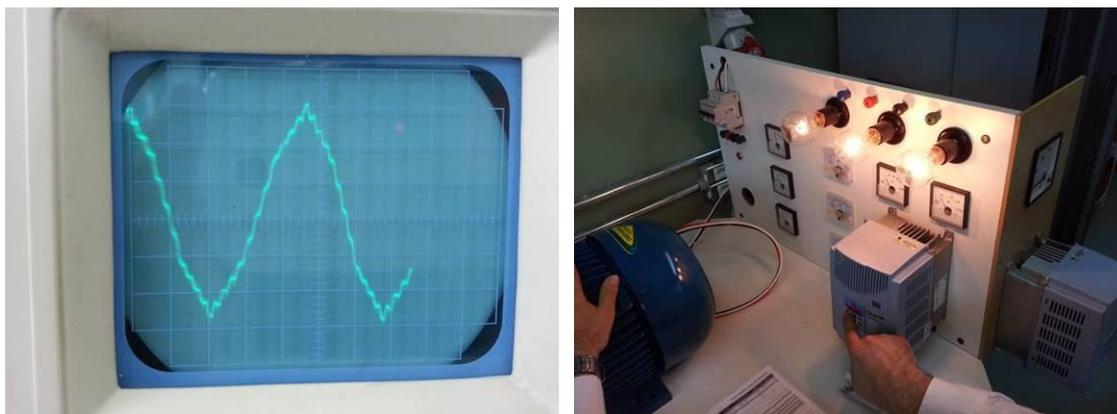


Figura 17 – Ensaiois do Gerador – (a) Osciloscópio – (b) Multímetro de Precisão



(a) (b)
Figura 18 – Ensaio em 45 Hz – (a) Forma de onda de tensão – (b) lâmpadas

Tabela 3 – Variações de Tensão e Corrente em função da Frequência do giro do eixo

| Rotação [RPM] | Tensão V_i [V] | Corrente I_i [A] | Tensão V_o [V] | Corrente I_o [A] |
|----------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 450 | 102 | 5,94 | 79 | 0,04 |
| 900 | 204 | 5,86 | 160 | 0,18 |
| 1.350 | 300 | 5,76 | 241 | 0,24 |
| 1.800 | 390 | 5,67 | 325 | 0,26 |

Onde V_i e I_i é a tensão e a corrente na entrada da máquina primária, e V_o e I_o a tensão e a corrente na saída do gerador, ou seja, nas lâmpadas.

Da tabela 3 pode-se concluir que a 1800 RPM a tensão na saída do gerador ficou em 325 para uma ligação em estrela, e esta deveria ser de 380 V, ou seja, ficando abaixo deste valor. Contudo, houve pequenas diferenças na execução do projeto, comparado as simulações, devido a problemas construtivos. Tal ajuste é relativamente simples, bastando rebobinas a máquina, aumentando proporcionalmente o número de espiras por enrolamento por fase. Com relação aos picos observados na senoide mostrada no osciloscópio, tal se deve ao fato de que as chapas do estator não estão inclinadas com relação a direção dos ímãs do rotor. Tal ajuste também é relativamente simples, bastando que haja uma inclinação de uma ranhura na altura do pacote de chapas do estator. Assim, a partir destas duas correções bem simples, a máquina irá gerar uma senoide de tensão com poucos harmônicos, e tensão da rede, ou seja, 60 Hz, 220 / 380 V.

Devido a estas distorções não foi possível determinar com precisão a rendimento da máquina desenvolvida. Contudo, como a base sobre a qual a mesma foi montada, ou seja, a carcaça e estator de um motor de indução da Voges cujos dados são bastante conhecidos, foi possível estimar o rendimento da mesma, com base nos dados desta máquina e dos ensaios realizados. Assim, a partir das potências observadas na entrada da máquina primária e na saída do aerogerador e conhecendo-se as perdas e rendimento da máquina utilizada como base, estima-se um rendimento de aproximadamente 90% para esta máquina.

Salienta-se que, apesar das distorções e da menor tensão induzida, citadas anteriormente, tal máquina não possui enrolamentos no rotor, portanto não haverá perdas ôhmicas nestes enrolamentos, e também não existe escorregamento, o que limita as variações de fluxo no rotor diminuindo neste as perdas magnéticas (por correntes parasitas e ciclo de histerese).

Finalmente convém ressaltar que, com as modificações propostas citadas e que são relativamente simples, tal máquina terá um rendimento entre 92 a 96%, ficando dentro dos parâmetros de rendimento deste tipo de máquina.

4. CONCLUSÕES

Com relação ao ferro puro sinterizado utilizado na construção do núcleo do rotor da máquina síncrona, constatou-se que o mesmo apresentou bom desempenho, e suas propriedades físicas são bastante similares ao aço baixo carbono utilizado na maioria dos núcleos das máquinas elétricas rotativas. Salienta-se que devido ao fato de não haver grande variação de fluxo no núcleo do rotor, tal não implicará em perdas significativas por correntes parasitas, não havendo então a necessidade de se construir tal núcleo com chapas laminadas.

Com relação ao desempenho da máquina, apesar de não ter sido possível observar-se diretamente o rendimento da mesma, estimou-se este, através de medições indiretas, em aproximadamente 90%, o que está bem próximo das máquinas síncronas com ímãs permanentes. Contudo, fazendo-se as modificações indicadas como rebobinamento e inclinação das ranhuras do núcleo do estator, estima-se que tal máquina terá rendimento maior, ou seja, na faixa das máquinas síncronas trifásicas.

AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, Fapergs e FINEP pelas bolsas e financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – FITZGERALD, A.E, KINGSLEY, Jr. C, UMANS, S.D. **Electric Machinery**. New York, McGraw-Hill Inc, 1990. 599p.
- [2] – NASAR, S.A. **Handbook of Electric Machines**. New York, McGraw-Hill, 1987.
- [3] – JANSSON, P. **Soft Magnetic Materials for A.C. Applications**. Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, 1992. p.63-66.
- [4] – KRAUSE, R.F., BULARZIK, J.H., KOKAL, H.R. **New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications**. Magnetics Inc, Burns Harbor, IN, USA. Journal of Materials Engineering and Performance, v.6, n.6, Dec. 1997. p.710-712.
- [5] – KOSOW, I.L. **Electric Machinery and Transformers**. Prentice Hall, 1991 - 626p.
- [6] – BOLDEA, I. **Reluctance Synchronous Machines and Drives**. New York., Oxford University Press Inc, 1996. 230p.
- [7] – BRADBURY, S. **Powder Metallurgy Equipment Manual**. New Jersey, USA, MPIF, 1986. 199p.
- [8] – GERMAN, R.M. **Powder Metallurgy Science**. New Jersley, Metal Powder Industries Federation, 1984, 279p.
- [9] – JILES. D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. Boca Raton, Chapman and Hall, 568p, 1998.
- [10] – ASTM A773/A773M **American Standard Test Method for DC Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with DC Electronic Hysteresigraphs**.
- [11] – BOYLESTAD, R.L., NASHELSKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory**. New Jersey, Prentice Hall, 894p, 2009.
- [12] – ASTM E10 (**Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials**)
- [13] – ASTM E9 (**Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature**)
- [14] – Mats Persson, **SMC Update**, Vol1. No. 1, April 1997.
- [15] – ENESCU, E., SOPTEA, E., GAVRILIU, S., CRISTESCU, E. **New Composite Materials Based on Iron for Soft Magnetic Cores**. Cercet. Metal. Mater. (Metall. New Mater. Res.), II, (3), 1998, p.69-78.
- [16] – FLETCHER F.B. **Carbon and Low-Alloy Steel Plate in: ASM Handbook**, v.1, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Materials Park, OH, 1995.

DEVELOPMENT OF A ROTOR TO SYNCHRONOUS MACHINES FROM P/M WITH EMBEDDED MAGNETS

ABSTRACT

This work aimed at the development (design, construction and testing) of a rotor for electric generator of high-performance of 5 kW, also known as Three-phase rotating electrical machine with permanent magnets to be used in a wind generator. This generator (or rotating electrical machine) was developed using the methods of powder metallurgy (P/M) for construction of the rotor core and permanent magnets of Nd-Fe-B, but the stator core was constructed from a package of laminated sheets, using a magnetic steel with high electrical resistivity such as silicon steel. Other machine parts such as shafts, bearings and housing, have been adapted from other machines of equivalent size as an induction motor or machined. Electric generators (or rotating electrical machines) constructed from this topology can have yield up to 95%. This machine was tested in a bench as a generator in which were observed voltage, current and waveforms of the armature windings.

Key words: Synchronous Machines with Permanent Magnets, Wind Generators, Powder Metallurgy.