

Estudo de uma máquina síncrona com núcleo do rotor a partir da metalurgia do pó e ímãs permanentes para aplicação em aerogeradores

Study of a synchronous machine rotor core from the powder metallurgy and permanent magnets for use in wind turbines

Monir Göethel BORBA [1](#); Moisés de Mattos DIAS [2](#); Felipe Guimarães RAMOS [3](#); Gérson Paz TEIXEIRA [4](#); Ricardo Martins de MARTINS [5](#); Patrice Monteiro de AQUIM [6](#); Lírio SCHAEFFER [7](#); Sérgio Deitos BITTENCOURT [8](#)

Recibido: 24/07/16 • Aprobado: 20/08/2016

Conteúdo

- [1. Introdução](#)
- [2. Materiais e métodos](#)
- [3. Resultados e discussão](#)
- [4. Conclusões](#)

[Referências](#)

RESUMO:

Este trabalho tem por objetivo o estudo e o projeto de uma máquina elétrica síncrona trifásica com ímãs permanentes para aerogeradores. A máquina proposta possui alterações na forma construtiva dos núcleos do rotor e do estator. O núcleo do rotor será substituído por um outro núcleo de ferro puro sinterizado obtido a partir do processo de metalurgia do pó. O núcleo do estator será formado por chapas empilhadas com inclinação de uma ranhura ao longo de toda a extensão. A máquina será montada em uma carcaça de um motor de indução trifásico de alto rendimento de 7,5kW.

Palavras-chave: máquina síncrona trifásica, metalurgia do pó, materiais magnéticos macios, aerogeradores.

ABSTRACT:

This work aims a study and design of a three-phase synchronous electric machine with permanent magnets for wind turbines. The proposed machine has constructive changes in the core of the rotor and stator. The rotor core is replaced by a core of pure iron obtained from the sintered powder metallurgy process. The stator core is formed of stacked plates with inclination of a groove along the entire length. The machine is mounted on a housing of a high yield three phase induction motor 7.5kW.

Keywords: three-phase synchronous machine, powder metallurgy, soft magnetic materials, wind turbines.

1. Introdução

As máquinas elétricas são dispositivos de vital importância nos dias de hoje. A sua utilização está relacionada com inúmeras aplicações, que vão desde pequenos acionamentos mecânicos até a geração da energia elétrica. A família das máquinas elétricas atualmente é composta por diversas topologias, que são divididas em categorias como o princípio de conversão de energia, tipo de corrente elétrica utilizada na alimentação, velocidade de rotação do eixo, características construtivas do rotor e do estator, entre outros.

As máquinas elétricas rotativas possuem duas partes básicas: estator e rotor. O estator é a parte fixa da máquina, na qual são colocados os enrolamentos de armadura com alimentação trifásica, defasadas de 120°. Os enrolamentos são dispostos espacialmente de tal forma que as correntes de todas as fases contribuem positivamente na geração de uma onda de fluxo magnético girante ou campo girante. O rotor é a parte móvel da máquina, onde são colocados os enrolamentos de campo. (Nasar, 1987; Kosow, 1987; Fitzgeralds, Kingsley Jr., & Umans, 1990; Toro, 1994)

Dentro destas partes estão situados os seus respectivos núcleos que, 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, processo para isolamento elétrico, empacotamento e fixação. Com relação às chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento é realizado a partir de um tratamento térmico, no qual os pacotes de chapas são colocados em fornos durante um determinado tempo, para que aconteça a oxidação da superfície das chapas. Como consequência, ocorre 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 óxido sobre uma das superfícies. (Nasar, 1987; Fitzgeralds, Kingsley Jr., & Umans, 1990)

Núcleos magnéticos envolvidos por bobinas, nas quais circulam correntes alternadas, geram um fluxo magnético também alternado. Por este motivo, esses núcleos ficam sujeitos a ação de correntes parasitas, também conhecidas por correntes de Foucault, que são responsáveis por apreciável perda de potência nestes núcleos. A construção destes núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente, tem como resultado a redução parcial das correntes parasitas. (Nasar, 1987; Fitzgeralds, Kingsley Jr., & Umans, 1990)

Utilizando-se os processos da metalurgia do pó é possível construir os núcleos do estator e do rotor a partir de blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética e maior resistividade elétrica se comparado ao aço convencional. Este processo contribui para que ocorra a redução das correntes parasitas. (Jansson, 1995; Krause, Bularzik, & Kokal, 1997). A aplicação da metalurgia do pó na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas pode resultar em máquinas com vantagens sobre aquelas com núcleos convencionais. Sendo assim, menos etapas estarão presentes na construção das máquinas e menos energia será consumida na fabricação das mesmas.

2. Materiais e métodos

O estudo da máquina elétrica proposta foi realizado em três etapas: análise de ligas metálicas para utilização novo núcleo do rotor, projeto da máquina elétrica e simulação computacional.

A definição da melhor liga metálica para utilização no núcleo do rotor foi realizada a partir da análise de oito tipos de ligas metálicas: Fe puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50%Ni. Destes materiais foram examinadas as suas propriedades elétricas, magnéticas e mecânicas.

O projeto da máquina elétrica envolveu alterações na forma construtiva do rotor e do estator. O novo rotor proposto foi projetado com modificações no seu núcleo e com substituição dos enrolamentos por ímãs permanentes de alto produto energético. O novo estator foi reprojeto

para que apresente um melhor desempenho quando utilizado em conjunto com um rotor que possua ímãs permanentes.

A simulação computacional da máquina permite uma previsão dos resultados das interações eletromagnéticas que ocorrerão na máquina proposta, tais como torque momentâneo, fluxo concatenado em cada bobina e perdas por corrente de Foucault. O conhecimento destes resultados permite ao projetista verificar a eficiência da máquina projetada e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho.

2.1. Avaliação dos pós metálicos

Para a fabricação do núcleo de máquinas elétricas busca-se um material que apresente baixa coercitividade magnética e altas permeabilidade magnética relativa, resistividade e indução de saturação. A análise das propriedades físicas das ligas metálicas foi realizada a partir da compactação de corpos de prova. Baseado nos resultados obtidos, é possível elencar qual material possui as melhores propriedades para a construção do núcleo do rotor.

2.1.1. Preparação das ligas

As ligas foram preparadas utilizando como pó base o pó de ferro puro. A este pó foi misturado fósforo, silício e níquel, adquiridos da Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificado do fabricante, o pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre $45\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$. Para obtenção das ligas de ferro-fósforo e ferro-silício foram utilizados pós com formulação comercial pronta e foi realizada a mistura com pó de ferro puro até que a relação entre os elementos fosse atingida. O pó Fe₃P (84% de Fe + 16% de P) utilizado na formulação das ligas de ferro-fósforo apresenta 90% de sua dimensão abaixo de $14,58\mu\text{m}$. Para a formulação das ligas de ferro-silício foi utilizado o pó FeSi 45 (55% de Fe + 45% de Si), que possui 87% de seu conteúdo entre $45\mu\text{m}$ e $250\mu\text{m}$. O pó de níquel apresenta granulometria mínima de $3\mu\text{m}$ e máxima de $7\mu\text{m}$. O pó de ferro foi misturado com fósforo (1, 2, 3%), silício (1, 3, 5%) e níquel (50%) em um misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm durante 20 minutos, para dispersão dos constituintes. Também foi adicionado as misturas, 1% de lubrificante sólido a base de estearato de zinco.

2.1.2. Corpos de prova

A compactação dos corpos de prova foi efetuada com uma pressão de 600 MPa, em uma prensa hidráulica modelo P30ST, da marca Bovenau, com capacidade de 30 ton. Foi utilizado o processo de compactação de dupla ação com matriz flutuante. Este processo permite a centralização da linha neutra da peça, evitando assim a variação de densidade ao longo do corpo de prova.

Para análise das propriedades magnéticas e resistividade elétrica, utilizou-se a matriz da figura 1-a, que permite obter corpos de prova na forma de anéis (figura 1-b).



Para análise da dureza e tensão de escoamento das ligas estudadas foi utilizada a matriz da figura 2-a, cujos corpos de prova obtidos possuem a forma de cilindros (figura 2-b).

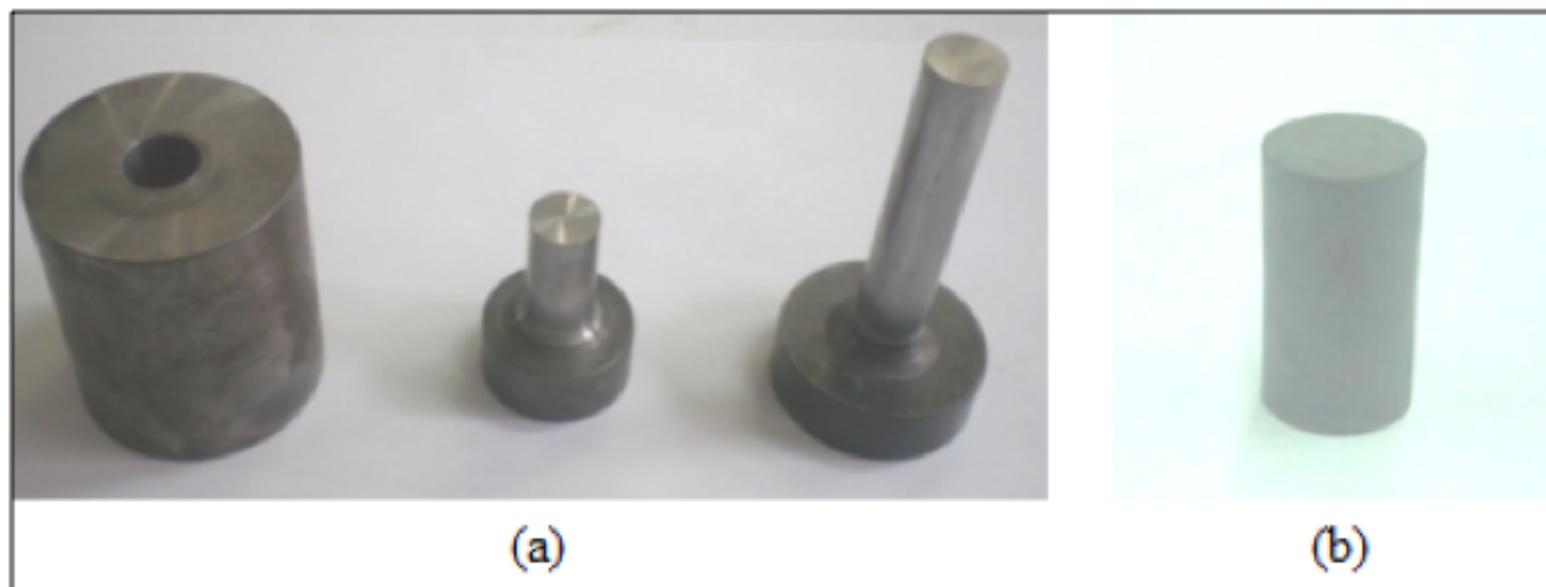


Figura 2 – Amostras na forma de cilindro – (a) matriz – (b) corpo de prova

A sinterização dos corpos de prova foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera controlada de gás verde (95% nitrogênio + 5% de hidrogênio). Foi utilizada uma taxa de aquecimento de 10oC por minuto, até a temperatura de 500oC, onde as peças permaneceram nesta temperatura por 30 minutos para extração do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir a temperatura foi elevada para 1.150oC, onde ocorreu o processo de sinterização. As peças permaneceram nesta temperatura por 60 minutos. (German, 1984; Bradbury, 1986). Após este tempo as peças permaneceram no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente.

2.1.3. Obtenção das propriedades físicas

As propriedades magnéticas das ligas metálicas foram obtidas em um equipamento traçador de curva de histerese, fabricado pela empresa GlobalMag, modelo TLMP-TCH-14. O levantamento das curvas de histerese e de magnetização foram realizados conforme a norma ASTM A773 /A773M - 01. Da curva gerada no ensaio de histerese foram obtidas a retentividade e a coercitividade. A permeabilidade magnética e a indução de saturação foram avaliadas a partir da curva de magnetização. (Jiles, 1998; ASTM, ASTM A773 /A773M - 01 (2009): Standard test method for DC magnetic properties of materials using ring and permeameter procedures with DC electronic hysteresigraphs, 2005).

A propriedade elétrica das ligas estudadas foi determinada através da resistividade elétrica. A resistividade foi obtida a partir do cálculo da resistência elétrica dos corpos de prova. Para a medição da resistência elétrica utilizou-se um multímetro, que informa diretamente a resistência elétrica do corpo de prova. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa, aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Sendo assim, o corpo de prova para a determinação da resistividade elétrica deve ter a forma de uma barra fina e comprida. Um artifício é a utilização de um anel, onde é cortado 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. Os anéis utilizados para este ensaio foram os mesmos que utilizados nos ensaios de histerese e magnetização. (Boylestad & Nashelsky, 2009).

A determinação das propriedades mecânicas das ligas estudadas foi realizada a partir de ensaios mecânicos nos corpos de prova no formato cilíndrico. As propriedades mecânicas das ligas estudadas fornecem dados importantes para avaliação da resistência a vibração de um material a ser utilizado em uma máquina elétrica rotativa. 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 E 10-14. Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000, com velocidade de 2,0 mm/min, segundo a norma ASTM E9. (ASTM, ASTM E10 - 15 - Standard test method for Brinell Hardness of metallic materials, 2015; ASTM, ASTM E9 - Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature, 2009)

2.2. Projeto da máquina

O ponto de partida para o projeto da máquina elétrica síncrona foi um motor de indução modelo VTOP, fabricado pelo Grupo Voges. As máquinas elétricas VTOP foram projetadas para atender a lei de eficiência energética nº 10.925/2001 (portaria 533 de 08 de dezembro de 2005) que dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia. As principais características desta máquina estão na tabela 1.

Tabela 1 – Características gerais da máquina elétrica

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

Fonte: Voges motores (2015)

As características construtivas dos núcleos do estator e do rotor da máquina VTOP merecem destaque, em virtude de serem alvos das modificações propostas nesta pesquisa. O núcleo do estator é composto por chapas de aço de baixo teor de carbono tratadas termicamente ou por chapas de aço silício. O pacote de chapas é montado na carcaça de maneira que as ranhuras não apresentem inclinação entre elas ao longo do comprimento do núcleo. O núcleo do estator possui diâmetro interno de 138 mm, diâmetro externo de 210 mm e comprimento de 148 mm. O rotor da máquina é do tipo gaiola de esquilo, sendo composto por lâminas, gaiola e eixo. As lâminas que formam o núcleo têm como matéria prima chapas de aço baixo carbono ou aço silício e são produzidas a partir de um processo de estampagem com ferramentas progressivas de alta precisão. O rotor possui 137,20 mm de diâmetro e 192 mm de comprimento. O eixo é fabricado em aço SAE 1045 através dos processos de usinagem e retificação. Após a união das três partes que compõem o rotor, o conjunto é balanceado dinamicamente dando origem a uma peça rígida e compacta.

A máquina elétrica proposta apresenta alterações na forma construtiva do rotor e do estator. O novo rotor proposto possui duas modificações: o núcleo de chapas será substituído por um

outro núcleo projetado e produzido com o uso da metalurgia do pó. A segunda modificação é a substituição da gaiola por ímãs permanentes de alto produto energético.

As medidas do diâmetro e do comprimento do novo núcleo foram definidas com valores praticamente iguais às do rotor de referência. Para a fabricação do núcleo foi realizado um projeto onde foi definida a sua geometria. O diâmetro do núcleo foi definido como sendo o valor do diâmetro do novo rotor menos a altura de um ímã, resultando em 130,65 mm. O comprimento do núcleo também foi definido em função dos ímãs, ficando em um valor de 190 mm que é equivalente ao somatório do comprimento de dois ímãs. A figura 3 mostra o desenho de um dos ímãs utilizados e a figura 4 mostra o projeto de uma das peças do núcleo do rotor. As demais peças utilizadas, como o eixo e os rolamentos, são dos mesmos modelos que os usados no rotor original da máquina elétrica de referência. A figura 5 traz um desenho do novo rotor com todas as peças montadas.

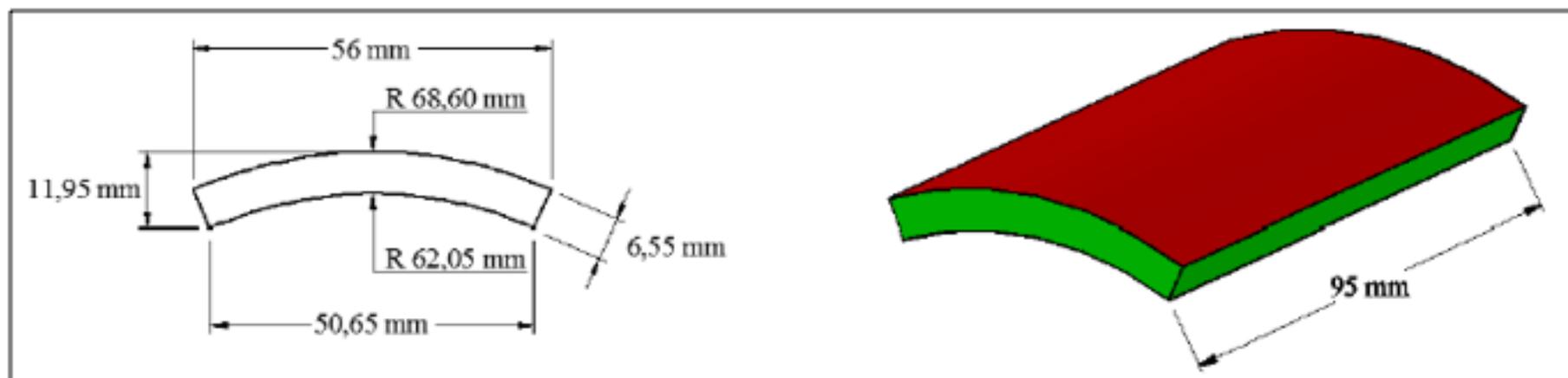


Figura 3 - Desenho dos ímãs de Nd-Fe-B

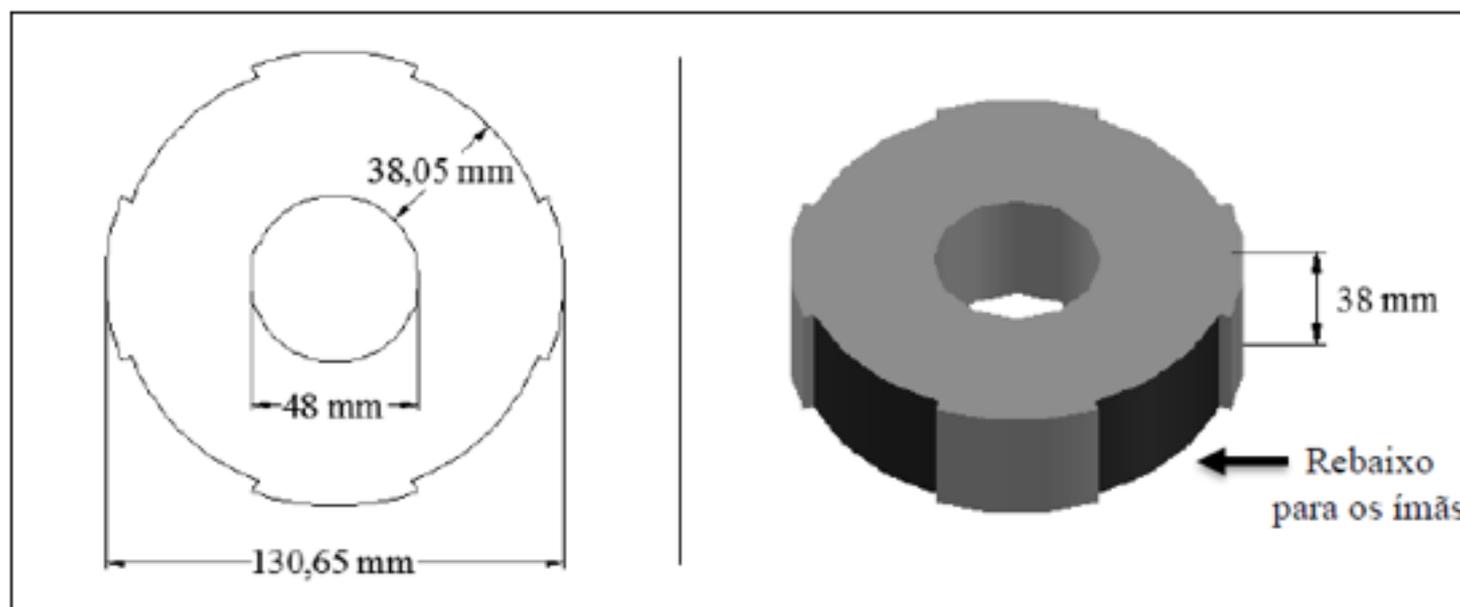


Figura 4 - Projeto das peças do núcleo do rotor

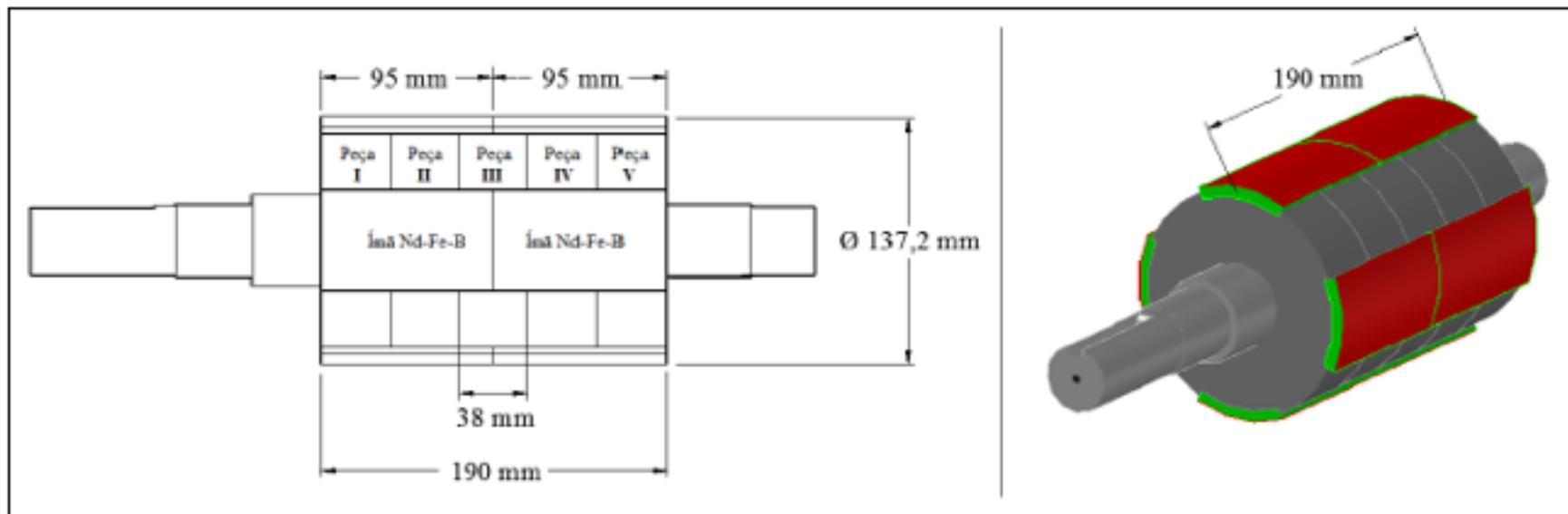


Figura 5 - Projeto completo do rotor

O novo estator será montado em uma carcaça modelo 132S utilizada nas máquinas VTOP e foi reprojetoado para que apresente um melhor desempenho quando utilizado em conjunto com um rotor que possua ímãs permanentes. A principal diferença deste estator em relação ao estator da máquina usada como referência nesta pesquisa está na montagem do seu núcleo. O pacote de chapas que compõe o núcleo será montado de maneira que as ranhuras apresentassem um ângulo de inclinação de 10°. A tabela 2 apresenta parâmetros do pacote de chapas utilizado e a tabela 3 traz as especificações utilizadas para o bobinamento.

Tabela 2 – Especificações do pacote de chapas

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

Tabela 3 – Especificações do bobinamento

Especificações	Valor
Fio	1x20 AWG + 2x21 AWG
Esquema de bobinagem	4D0111-22-1

Passo	1:10:12
Cabo [AWG]	12
Classe isolamento	F
Corrente nominal [A]	14,2
Número de condutores em série por fase	192

2.3. Simulação computacional

A simulação computacional da máquina elétrica foi realizada no software FEMM 4.2, onde foram inseridos os seguintes dados: topologia do motor, características do bobinamento e a curva de magnetização do material do núcleo do rotor. Foram realizadas três simulações para o estator com núcleo de chapas M15 (aço silício), onde foi variado o material do rotor: chapas M15, Fe2%P e Fe puro. A corrente nominal foi de 14,2 A por fase e 192 condutores em série por fase.

3. Resultados e discussão

A avaliação dos resultados das propriedades físicas das ligas metálicas mostrou que a adição de fósforo, silício ou níquel tem influência positiva ou negativa nas propriedades físicas dos materiais. Tomando como base os resultados obtidos para o pó de Fe puro, a tabela 4 apresenta como cada elemento de liga influenciou o comportamento das propriedades físicas analisadas.

Tabela 4 – Influência da adição de elementos de liga nas propriedades físicas do Fe puro

Propriedade	Fe1%P	Fe2%P	Fe3%P	Fe1%Si	Fe3%Si	Fe5%Si	Fe50%Ni
Retentividade							
Coercitividade							
Permeabilidade magnética							
Indução de saturação							
Resistividade elétrica							
Dureza							
Tensão de escoamento							

Os corpos de prova produzidos com ferro puro sinterizados se caracterizaram por elevada densidade, perdas por histerese, indução de saturação e permeabilidade relativa; propriedades magnéticas médias, baixa resistividade elétrica e coercitividade. As ligas de ferro-fósforo possuem as vantagens econômicas do ferro puro, adicionando ainda características magnéticas

superiores: a força coercitiva foi reduzida, a resistividade aumentou e foram observadas uma elevação dos valores de indução máxima e permeabilidade relativa. As ligas de ferro-silício apresentam força coercitiva, indução máxima e permeabilidade relativa máxima similares às das ligas ferro-fósforo. Porém, sua resistividade elétrica ficou bastante superior. Por fim, a liga de ferro-níquel se caracterizou por apresentar elevada permeabilidade relativa, baixa indução de saturação e resistividade de valor intermediário. (Bittencourt, 2012; Pauletti, 2012)

A liga metálica mais apropriada para a construção do núcleo do rotor é aquela que possua uma alta permeabilidade magnética relativa, resistividade e indução de saturação, além de baixa coercitividade magnética. De acordo com os resultados obtidos, a liga Fe2%P apresentou a melhor permeabilidade magnética e a melhor indução de saturação, seguida da liga Fe1%P, nos dois casos. Em relação aos resultados de indução remanente, a combinação FeSi foi a que se mostrou mais interessante para a aplicação, em virtude de que ao cessar a força magnetizante, as ligas apresentaram os menores valores de magnetismo remanente. Entretanto, em relação a força coercitiva, as ligas tiveram resultados bastante próximos, o que pode compensar a diferença na remanência. O ensaio de resistividade que avaliou as perdas nos materiais, mostrou que os acréscimos de elementos de liga, tanto na formulação FeP e FeSi, acarretou um aumento na resistividade. Sendo assim, analisando somente as propriedades físicas, a liga mais recomendada para a aplicação na construção do núcleo do rotor é a Fe2%P, pois, ao equiparar-se com as demais na maioria dos resultados, teve o diferencial de apresentar melhor desempenho de permeabilidade e indução de saturação.

A liga ferro com adição de fósforo possui um inconveniente na obtenção de peças via metalurgia do pó. O acréscimo de fósforo confere a peça sinterizada um aumento da dureza e resistência mecânica. Para peças que necessitam de usinagem posterior, como no caso do núcleo do rotor projetado neste trabalho, a dureza da peça praticamente inviabiliza a sua usinagem, tornando o serviço muito difícil e caro. A solução encontrada foi a utilização da liga de ferro puro.

3.1. Propriedades físicas do ferro puro

Os corpos de prova obtidos a partir do ferro puro apresentaram, após a sinterização, densidade de $6,63 \text{ g/cm}^3$. Considerando a média de três corpos de prova, o Fe puro apresentou valor um pouco abaixo das especificações do material indicado na literatura (entre 6,8 a 7,3 – valor típico de $7,2 \text{ g/cm}^3$) (Jansson, 1995). A figura 6-a mostra a curva de histerese e figura 6-b mostra a curva de magnetização do Fe puro. A indução máxima foi observada a partir das curvas de magnetização para um campo magnético de 6 kA/m.

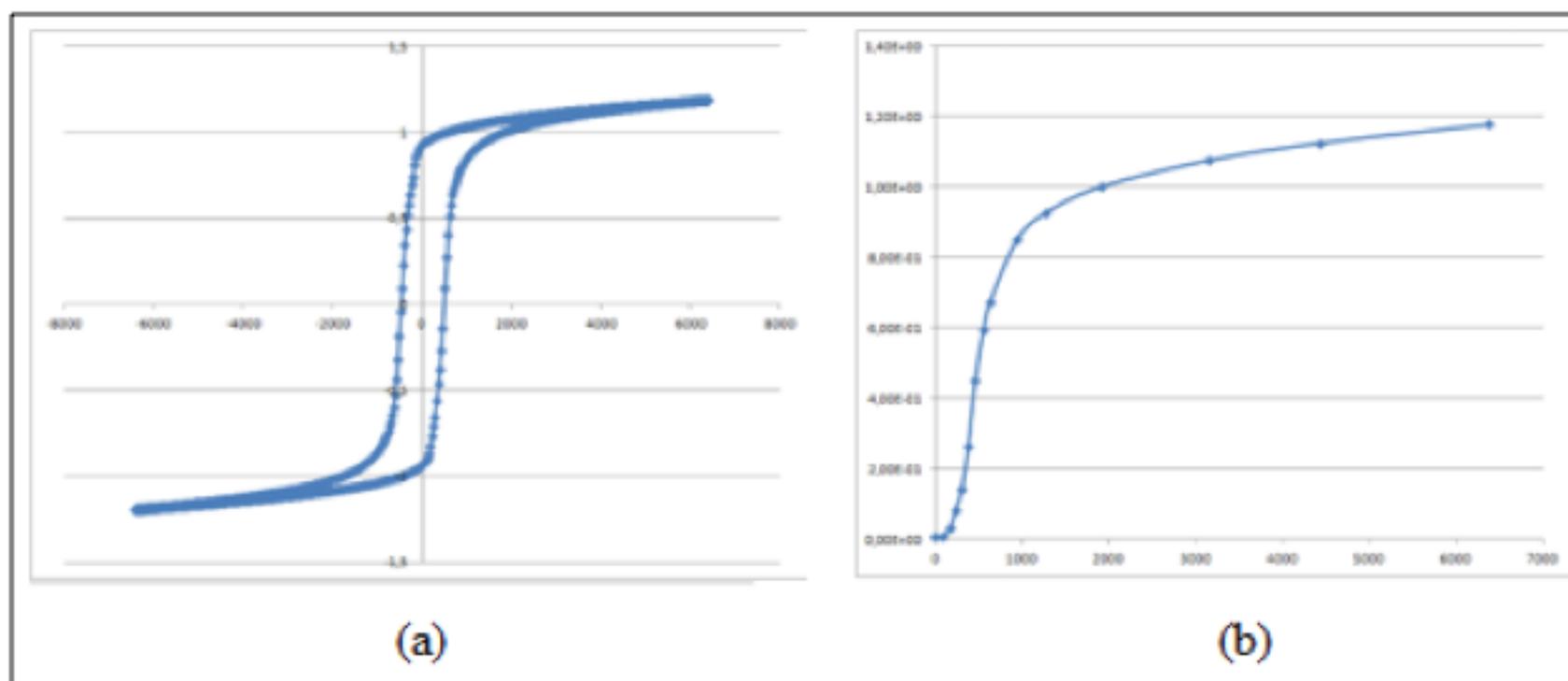


Figura 6 – Gráficos magnéticos – (a) curvas de histerese – (b) curva de magnetização

A resistividade elétrica foi medida a partir dos corpos de prova na forma de anel, com o corte de um segmento de 10 mm. A tabela 5 mostra uma comparação entre os resultados das propriedades físicas que contam na literatura e os obtidos experimentalmente a partir dos valores médios de três corpos de prova. (Jansson, 1995)

Tabela 5 – Propriedades físicas do ferro puro sinterizado

Propriedade	Fe puro (literatura)	Fe puro (experimental)
Densidade [g/cm ³]	7,20	6,63
Resistividade elétrica [$\mu\Omega.m$]	0,12	0,16
Retentividade [T]	1,18	0,90
Coercitividade [A/m]	127,0	448,0
Indução máxima [T]	1,36	1,19
Permeabilidade relativa	3.700,0	1.852,6

As grandes diferenças entre as propriedades indicadas na literatura (Lenel, 1984; Lall, 1992; Jansson, 1995) e aquelas obtidas a partir dos corpos de prova devem-se aos seguintes aspectos: algumas referências não indicam as pressões de compactação utilizadas para materiais magnéticos macios por metalurgia do pó, e em alguns estudos utilizam-se pressões até 800 MPa para materiais compósitos por metalurgia do pó (Enescu, Soptea, Gavrilu, & Cristescu, 1998), e tal pressão tende a alterar as propriedades físicas obtidas. Salienta-se também que fatores como forma e tamanho de partículas dos pós; tempo, temperatura e atmosfera utilizados na sinterização podem influenciar nas propriedades físicas dos materiais sinterizados (German, 1984; Bradbury, 1986).

A tensão de escoamento foi de 139,9 MPa, considerando a média obtida de três ensaios em três corpos de prova diferentes e a dureza média obtida foi de 52,1 HB. O aço 1008 (baixo carbono) apresenta tensão de *escoamento* média de 170 MPa e dureza de 86 HB (Enescu, Soptea, Gavrilu, & Cristescu, 1998). Portanto, com relação às propriedades mecânicas, observa-se que o ferro puro sinterizado possui dureza menor que o aço baixo carbono, bem como tensão de escoamento menor. Entretanto, tais características permitem o uso deste material em núcleos de máquinas elétricas rotativas.

3.2. Resultado da simulação computacional

Foram realizadas a partir do FEMM 4.2 três simulações da máquina elétrica utilizando o estator com núcleo de chapas M15 (aço silício) e variando o núcleo do entre chapas M15 (figura 7), liga sinterizada Fe2%P (figura 8) e Fe puro sinterizado (figura 9). Nestas figuras pode-se observar a esquerda a amplitude, em módulo, da indução de entreferro, e a direita, as linhas de fluxo magnético geradas no plano longitudinal da máquina.

Figura 7 – 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 8 – Simulação da máquina com rotor a partir da liga sinterizada Fe2%P – (a) Densidade de fluxo de entreferro – (b) Linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina

Figura 9 – Simulação da máquina com rotor a partir do Fe puro sinterizado – (a) Densidade de

fluxo de entreferro – (b) Linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina

A partir das figuras 7, 8 e 9, pode-se observar que a indução magnética de entreferro apresenta valores máximos entre 1,0 e 1,25 T para alimentação, não variando muito entre os três tipos de materiais de rotores estudados. Tal característica está de acordo com as referências bibliográficas, que indicam para máquinas elétricas rotativas, densidade de entreferro nesta faixa (Nasar, 1987; Fitzgeralds, Kingsley Jr., & Umans, 1990). A partir do FEMM 4.2 obteve-se também o valor do torque resultante e amplitude média de indução de entreferro (tabela 6).

Tabela 6 – Grandezas elétricas e magnéticas obtidas a partir da simulação

Tipo de rotor	Indução de Entreferro [T]	Torque [N.m]
Chapas M15	1,17	33,65
Fe2%P	1,21	33,61
Fe puro	1,17	33,66

Os valores resultantes da indução no entreferro e o torque são bastante semelhantes para os três tipos de rotor, o que indica que a máquina com núcleo do rotor produzido a partir de Fe puro resultará em uma máquina com características similares quanto ao desempenho, o que está dentro de algumas referências bibliográficas as quais citam o uso de tais materiais em determinadas aplicações em núcleos de máquinas elétricas rotativas (Bas, Puig, & Molins, 1988).

4. Conclusões

A busca por tecnologias que permitam o desenvolvimento sustentável causando baixo impacto ambiental, tem impulsionado o avanço da utilização da metalurgia do pó na fabricação de máquinas elétricas. Aliando os conhecimentos da metalurgia do pó com a filosofia proposta pelas energias renováveis, foi realizada esta pesquisa propondo o estudo e projeto de uma máquina síncrona trifásica com núcleo do rotor produzido a partir da metalurgia do pó e ímãs de neodímio-ferro-boro para aerogeradores. Diante dos resultados obtidos e discutidos no decorrer do trabalho pode-se concluir que a obtenção do núcleo do rotor a partir do processo de metalurgia do pó é uma alternativa perfeitamente viável. A metalurgia do pó permite a eliminação de uma série de etapas onerosas que são necessárias no tradicional processo de produção de núcleos com chapas laminadas.

Apesar de não ser a liga com as melhores propriedades físicas, o Fe puro se sobressai no quesito propriedades mecânicas, onde as demais ligas apresentam restrições que podem inviabilizar a sua utilização. Ainda que o ferro puro sinterizado apresente a menor resistividade elétrica (o que ajuda a induzir correntes parasitas) do que outros pós metálicos, o seu uso não deve comprometer a eficiência do rotor. Isto se deve graças aos ímãs permanentes utilizados que tendem a produzir um fluxo magnético constante ou com poucas variações. Não havendo variação ou redução de fluxo, as perdas por correntes parasitas serão mínimas. O ferro puro possui propriedades físicas bastante similares ao aço baixo carbono utilizado na maioria dos núcleos das máquinas elétricas rotativas.

As simulações computacionais da máquina elétrica com diferentes materiais para o núcleo do rotor reforçam a ideia de que a máquina com rotor construído a partir do ferro puro sinterizado terá desempenho muito similar a uma máquina com núcleos de chapas somente. Salienta-se que, somente os ensaios definitivos darão uma real indicação do desempenho desta máquina.

Referências

- ASTM. (2005). *ASTM A773 /A773M - 01 (2009): Standard test method for DC magnetic properties of materials using ring and permeameter procedures with DC electronic hysteresigraphs*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. doi:10.1520/A0773_A0773M-14
- ASTM. (2009). *ASTM E9 - Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. doi:10.1520/E0009-09
- ASTM. (2015). *ASTM E10 - 15 - Standard test method for Brinell Hardness of metallic materials*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials. doi:10.1520/E0010-15
- Bas, J. A., Puig, J., & Molins, C. B. (1988). Soft magnetic materials in P/M: current applications and state-of-the-art. *Modern Developments in Powder Metallurgy*, 18, 745-756.
- Bittencourt, S. D. (2012). Caracterização de ligas magnéticas sinterizadas para aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2009). *Electronic devices and circuit theory*. New Jersey: Prentice Hall.
- Bradbury, S. (1986). *Powder metallurgy equipment manual*. Princeton: Metal Powder Industries Federation.
- Enescu, E., Soptea, E., Gavriliu, S., & Cristescu, E. (1998). New composite materials based on iron for soft magnetic cores. *Cercet. Metal. Mater.*, 69-78.
- Fitzgeralds, A. E., Kingsley Jr., C., & Umans, S. D. (1990). *Electric Machinery*. Nova York: McGraw-Hill.
- Fletcher, F. B. (1995). ASM Handbook. *Carbon and low-steel plate*, 1. ASM International.
- German, R. M. (1984). *Powder metallurgy science*. Princeton: Metal Powder Industries Federation.
- Jansson, P. (1995). Soft magnetic materials for A.C. applications. *Powder Metallurgy*, 63-66.
- Jiles, D. (1998). *Introduction to magnetism and magnetic materials*. Boca Raton: Chapman and Hall.
- Kosow, I. L. (1987). *Máquinas elétricas e transformadores*. Rio de Janeiro: Globo.
- Krause, R. F., Bularzik, J. H., & Kokal, H. R. (Dez de 1997). New soft magnetic material for AC and DC motor applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 710-712.
- Lall, C. (1992). *Soft magnetism, fundamentals of powder metallurgy and metal injection molding*. Princeton: Metal Powder Industries Federation.
- Lenel, F. V. (1984). *Magnetic applications*. Metals Handbook.
- Meeker, D. (2010). Finite element method magnetics. *User's manual*, v. 4.2.
- Nasar, S. A. (1987). *Handbook of Electric Machines*. Nova York: McGraw-Hill.
- Pauletti, P. (2012). Construção e análise de desempenho de um motor de indução trifásico com núcleo produzido via metalurgia do pó. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Rech, R. (Ago de 2009). Nova linha VTOP Voges Motores. Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Toro, V. (1994). *Fundamentos de máquinas elétricas*. Rio de Janeiro: Pentice-Hall do Brasil Ltda.
- Voges Motores. (2010). Produtos. Fonte: http://www.voges.com.br/_arquivos/motores/motor_trifasico_linha_vtop.pdf
-

1. Doutorando no Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis - Laboratório de Transformação Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - monir.borba@ufrgs.br
 2. Professor Universidade Feevale - moisesdias@feevale.br
 3. Professor Universidade UniRitter - felipe.guimaraes@gmail.com
 4. Mestrando no Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis - Laboratório de Transformação Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - gerson.teixeira@senairs.org.br
 5. Professor Universidade Feevale - ricardomartins@feevale.br
 6. Professora Universidade Feevale - patrice@feevale.br
 - 7- Coordenador do Centro Brasileiro de Conformação Mecânica - schaefer@ufrgs.br
 - 8- Doutorando Universidade Federal do Rio Grande do Sul - sergio_deitos_bittencourt@hotmail.com
-

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015
Vol. 38 (Nº 01) Año 2017

[Índice]

[En caso de encontrar algún error en este website favor enviar email a [webmaster](#)]

