

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 ROTOR A PARTIR DE FERRO SINTERIZADO PARA APLICAÇÃO EM AEROGERADORES DE 7,5 kW

GERSON PAZ TEIXEIRA

Dissertação para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2017

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 ROTOR A PARTIR DE FERRO SINTERIZADO PARA APLICAÇÃO EM AEROGERADORES DE 7,5 kW

GERSON PAZ TEIXEIRA
Engenheiro Eletricista

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
2017

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. Lírío Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias - FEEVALE

Prof. Dr. Químico Ricardo Martins de Martins - FEEVALE

Prof. Dr. Eng. José Carlos Krause de Verney - ULBRA

Prof. Dr. Eng. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Dedico à minha esposa Rita de Cássia, cujo incentivo e apoio foram fundamentais para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

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

Ao Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias, pelo auxílio nas dúvidas ao longo deste período, além do incentivo durante as pesquisas.

Aos colegas do GDER, André Carvalho Tavares, Diego Pacheco Wermuth, Felipe Guimarães Ramos, Franciele Peruchi, Franciele Weschenfelder e Monir Göethel Borba pelo apoio durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas Alex Fabiano Bueno e Wilson Correa Rodrigues pelo incentivo para realizar esta dissertação.

A todos que colaboraram de alguma forma, os meus sinceros agradecimentos.

“Não é o trabalho, mas o saber trabalhar, que é o segredo do êxito no trabalho. Saber trabalhar quer dizer: não fazer um esforço inútil, persistir no esforço até ao fim, e saber reconstruir uma orientação quando se verificou que ela era, ou se tornou errada.”

Fernando Pessoa

RESUMO

Desenvolvimento de uma máquina síncrona trifásica com ímãs de Nd-Fe-B e núcleo do rotor a partir de ferro sinterizado para aplicação em aerogeradores de 7,5 kW, verificando a viabilidade do protótipo. Partindo de um projeto anteriormente desenvolvido, foi realizada alteração no ângulo das chapas do estator em 10° , com o intuito de minimizar o efeito de correntes parasitas, sendo esse um dos fatores que influenciam os resultados. Para avaliação de desempenho, foi utilizada uma bancada de testes composta de analisador de energia, sensor de torque e instrumentos de medição, sendo o acionamento do protótipo realizado através de um motor de indução controlado por um inversor de frequência. Entre os resultados encontrados, foi constatada a presença de harmônicas que impactam sobre os valores obtidos do protótipo. Os testes realizados, de simulação e parâmetros elétricos, indicaram resultados apropriados ao desempenho de uma máquina elétrica trifásica, porém mostram-se necessárias alterações para um melhor desempenho do protótipo.

Palavras-chave: Máquina síncrona trifásica. Metalurgia do Pó. Núcleo de máquinas elétricas. Aerogeradores.

ABSTRACT

Development of a three-phase synchronous machine with Nd-Fe-B magnets and rotor core from sintered iron for application in 7.5 kW wind turbines, verifying the feasibility of the prototype. Starting from a previously developed design, a change in the angle of the stator plates was made in 10° , in order to minimize the effect of the parasite currents, being one of the factors that influence the results. For performance evaluation, a test bench composed of energy analyzer, torque sensor and measuring instruments was used, and the drive of the prototype was carried out through an induction motor controlled by a frequency inverter. Among the results found, it was verified the presence of harmonics that impact on the values obtained from the prototype. The tests performed, simulation and electrical parameters, indicated results appropriate to the performance of a three-phase electric machine, however changes are needed for a better performance of the prototype.

Keywords: Three-phase synchronous machine. Powder Metallurgy. Electric machines core. Wind Turbines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo de histerese para materiais macios e duros.....	19
Figura 2 – Curva JxH de um ímã ideal.....	21
Figura 3 – Curva BxH de ímãs comerciais	23
Figura 4 – Distribuição de fluxo em um motor de indução síncrono de com ímã permanente	29
Figura 5 – Máquina de fluxo radial	30
Figura 6 – Máquina de fluxo axial.....	31
Figura 7 – Máquina de fluxo transversal	32
Figura 8 – Característica torque/velocidade para partida de um motor de indução síncrono e ângulo característico de torque/carga após a sincronização	35
Figura 9 – Componentes básicos de um aerogerador de eixo horizontal.	36
Figura 10 – Esquema geral de funcionamento de um aerogerador	36
Figura 11 – Esquema de um gerador do tipo SCIG.....	38
Figura 12 – Esquema de um gerador do tipo WRIG.	39
Figura 13 – Esquema de um gerador do tipo DFIG.	40
Figura 14 – Esquema de um gerador do tipo SCIG com conversor de larga escala.	40
Figura 15 – Esquema de um gerador do tipo PMSG com conversor de larga escala.....	41
Figura 16 - Esquema de um gerador do tipo Acionamento Direto Síncrono	42
Figura 17 – Esquema de um gerador do tipo EESG.....	43
Figura 18 – Esquema de um gerador de Acionamento Direto do tipo PMSG	43
Figura 19 – Esquema de um gerador do tipo PMSG com caixa de engrenagem de estágio único.	44
Figura 20 – Variáveis de entrada e saída no FEMM 4.2 para materiais magnéticos	45
Figura 21 – Fluxo do desenvolvimento da máquina.....	47
Figura 22 – Desenho dimensional da matriz dos corpos de prova na forma cilíndrica.....	49
Figura 23 – Matriz dos corpos de prova na forma cilíndrica	50
Figura 24 – Desenho dimensional da matriz dos corpos de prova na forma de barra.....	50
Figura 25 – Matriz dos corpos de prova na forma de barra.....	51
Figura 26 – Desenho dimensional da matriz dos corpos de prova na forma de anel.	51

Figura 27 – Matriz dos corpos de prova na forma de anel.	52
Figura 28 – Geometria da cavidade das matrizes dos corpos de prova na forma de cilindro e de barras.	52
Figura 29 – Geometria da cavidade e pino macho da matriz dos corpos de prova na forma de anel.	53
Figura 30 – Temperatura e tempo de sinterização.....	54
Figura 31 – Carcaça do modelo 132S.....	56
Figura 32 – Pacote de chapas (a) vista superior (b) vista frontal	56
Figura 33 – Carcaça com o pacote de chapas.	57
Figura 34 – Máquina com estator.....	58
Figura 35 – Cota dos ímãs	58
Figura 36 - Rotor com ímãs permanentes.....	59
Figura 37 – Bancada de testes.	60
Figura 38 – Simulação da máquina com rotor de ferro puro sinterizado: (a) densidade de fluxo de entreferro e (b) linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina.	62
Figura 39 – Relação Rotação x Potência.....	64
Figura 40 – Relação Torque x Torque.....	64
Figura 41 – Formas de onda da tensão e corrente para 300 rpm.....	65
Figura 42 – Formas de onda da tensão e corrente para 400 rpm.....	66
Figura 43 – Formas de onda da tensão e corrente para 450 rpm.....	66
Figura 44 – Formas de onda da tensão e corrente para 540 rpm.....	67
Figura 45 – Formas de onda da tensão e corrente para 1800 rpm.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos com máquinas elétricas realizadas pelo GDER.....	15
Tabela 2 – Pressão de compactação dos corpos de prova.	53
Tabela 3 – Características gerais da máquina de referência.....	55
Tabela 4 – Especificações do pacote de chapas.	56
Tabela 5 – Especificações da máquina proposta.	57
Tabela 6 – Resultados dos testes de desempenho.....	61
Tabela 7 – Grandezas elétricas e magnéticas obtidas a partir da simulação.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DTH	Distorção total de harmônicas
FEMM 4.2	Método de Elementos Finitos para Materiais Magnéticos (Finite Element Method Magnetics)
GDER	Grupo de Desenvolvimento de Energias Renováveis
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
LSPM	Motor de ímã permanente de partida de linha (line start permanent magnet)
MP	Metalurgia do Pó
Nd-Fe-B	Liga Neodímio-Ferro-Boro
rpm	Rotações por minuto
SmCo	Liga Samário-Cobalto
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Indução magnética	[T]
B_m	Indução de saturação ou máxima indução	[T]
B_r	Indução magnética remanente	[T]
f.e.m	Força eletro motriz	[V]
f.m.m	Força magneto motriz	[Ae]
I_{rms}	Corrente rms	[A]
H	Campo magnético	[Oe]
H_c	Campo coercitivo ou força coerciva	[Oe]
H_{ci}	Campo coercitivo intrínseco	[Oe]
P	Potência	[W]
T	Torque	[N.m]
V_{rms}	Tensão rms	[V]
μ	Permeabilidade Magnética	[T]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Materiais magnéticos por metalurgia do pó	17
2.1.1 Materiais magnéticos macios.....	19
2.1.2 Materiais magnéticos duros.....	24
2.2 Aplicação da metalurgia do pó em núcleos de máquinas elétricas rotativas.....	24
2.3 Máquinas elétricas síncronas trifásicas com ímãs permanentes	28
2.4 Aerogeradores.....	35
2.5 Femm 4.2.....	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 Máquina elétrica de referência	48
3.2 Corpos de prova	48
3.2.1 Matrizes dos corpos de prova.....	49
3.2.2 Compactação e sinterização dos corpos de prova.....	52
3.3 Máquina elétrica proposta	55
3.4 Bancada de testes.....	59
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	61
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	62
5.1 Simulação computacional.....	62
5.2 Ensaio de desempenho da máquina	63
6. CONCLUSÃO.....	69
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	70
8. REFERÊNCIAS	71
APÊNDICE A - RESULTADOS DE TENSÃO E CORRENTE COM CARGA.	75
APÊNDICE B- RESULTADOS DE POTÊNCIA COM CARGA.....	78

1. INTRODUÇÃO

A relação de uma maior eficiência energética e um menor impacto ambiental é considerada, atualmente, como diretriz para a pesquisa e desenvolvimento de dispositivos eletromecânicos de conversão de energia. O uso da metalurgia do pó (MP) no desenvolvimento de novos compósitos apresenta-se como área fundamental na obtenção de novos elementos construtivos em máquinas elétricas rotativas.

Um dos grandes desafios atuais está no desenvolvimento e produção de materiais magnéticos com custos baixos, mas que garantam as características adequadas para a utilização em máquinas elétricas. Com o intuito de garantir a sua otimização com a utilização de novos materiais, graças aos avanços tecnológicos, diferentes tipos de materiais magnéticos têm sido utilizados, incluindo ferro puro e suas ligas, capazes de substituir os materiais tradicionais utilizados na parte ativa de máquinas elétricas. Diferentes aspectos do processamento, propriedades, efeito de aditivos nas propriedades magnéticas e aplicações desses materiais já foram discutidos por muitos pesquisadores. Materiais, incluindo materiais amorfos, materiais nanocristalinos e materiais magnéticos compósitos macios, hoje são os mais recentes desenvolvimentos na história magnética. Desta forma, foi possível, não só a fabricação de ímãs permanentes, mas também materiais magnéticos capazes de substituir os materiais tradicionalmente usados nas partes magnéticas ativas das máquinas elétricas (SHOKROLLAHI et al., 2007).

O Grupo de Energias Renováveis (GDER), pertencente ao LdTM da UFRGS, já realizou o desenvolvimento de compósitos magnéticos macios utilizados em núcleos de máquinas elétricas, a caracterização de ligas magnéticas sinterizadas para a aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas e o desenvolvimento de núcleos com ímãs de Nd-Fe-B com aplicação em máquinas elétricas. De acordo com a linha de pesquisa já realizada no GDER, foram estudadas as ligas sinterizadas de Ferro puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50%Ni, considerando que são analisadas as propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas das mesmas.

Na tabela 1, são apresentados os trabalhos realizados com máquinas elétricas no GDER.

Tabela 1- Trabalhos realizados com máquinas elétricas no GDER

Classificação	Características da Máquina	Autor
Máquina de Indução	Rotor de Fe2%P sinterizado com barras de cobre curto-circuitadas e ranhuras inclinadas e núcleo do estator Fe2%P	Philipe Pauletti
Motor Universal	Rotor e estator de Fe sinterizado	Roberto Luis Ribeiro da Cas
Servomotor	Estator e rotor de material magnético macio e rotor com ímãs permanentes	Jorge Alberto Lewis Esswein Junior
Motor de Corrente Contínua	Rotor de material magnético macio sinterizado	Franciele Peruchi
Máquina Síncrona	Rotor de Fe sinterizado com ímãs permanentes e polos salientes e estator de chapas tradicionais laminadas de aço	Luciano Lohmann Cerva
Máquina Síncrona	Estator de material magnético macio e ímãs permanentes	Felipe Ramos
Máquina Síncrona	Rotor de Fe sinterizado com ímãs permanentes e polos salientes e estator com ranhuras inclinadas.	Monir Göethel Borba

Fonte: Autor

A utilização de ímãs de Neodímio-Ferro-Boro em máquinas síncronas é recente. O Nd-Fe-B começou a ser utilizado em 1983. Pelo fato de apresentar maior indução remanente B_r , seu campo coercitivo H_c é comparável ao do Samário-Cobalto. Estes ímãs apresentam-se como materiais apropriados na utilização em máquinas elétricas de alto desempenho (CHÉDOT, 2004; MULTON, 2005).

Os aerogeradores consistem basicamente de um gerador ou máquina elétrica rotativa por indução ou síncrona, com um conjunto de pás acoplado ao eixo da máquina. Os núcleos magnéticos de máquinas elétricas rotativas (estatores e rotores), com raras exceções, são construídos, atualmente, a partir de finas lâminas metálicas (chapas) com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas, sendo submetido posteriormente a algum tratamento térmico. Nestes pacotes, as chapas adjacentes são isoladas eletricamente a partir de substâncias como óxidos. Núcleos magnéticos envolvidos por bobinas (enrolamentos), onde circulam correntes alternadas, geram um fluxo magnético também alternado. Por este motivo, estes 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 isoladas reduz parcialmente as correntes parasitas, diminuindo as perdas por corrente de Foucault (NASAR, 1987).

Contudo, utilizando-se os processos da metalurgia do pó, é possível construir os núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética (característicos dos aços magnéticos) e alta resistividade elétrica, o que reduz as correntes parasitas. Entretanto, é importante salientar que, o uso de materiais obtidos por MP em núcleos de máquinas elétricas rotativas, como em geradores síncronos, só aumenta o desempenho destas máquinas, se utilizados em somente algumas partes da máquina, como o rotor, ou em funcionamento em altas frequências. Nestas condições, blocos maciços obtidos por MP superam em desempenho o tradicional pacote de chapas laminadas.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo geral, desenvolver uma máquina síncrona trifásica, com o núcleo do rotor construído a partir da MP e o estator, construído a partir de chapas laminadas com uma inclinação de 10° . Com esta inclinação terá uma redução nas perdas por correntes parasitas. Os resultados apresentados irão servir como base para verificar a possível utilização deste núcleo em aerogeradores de pequeno porte.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta breve revisão, foram abordados assuntos relevantes, para uma melhor compreensão do trabalho, nas áreas de materiais magnéticos duros por metalurgia do pó e máquinas elétricas rotativas. Uma máquina síncrona caracteriza-se pela utilização de ímãs com alta densidade de energia e núcleo de ferro sinterizado.

2.1. Materiais Magnéticos por Metalurgia do Pó

Relativo à produção de materiais magnéticos, tanto magneticamente moles para aplicações em corrente contínua, como magneticamente duros para ímãs permanentes, a metalurgia do pó é largamente aplicada, pois possibilita obter peças com formas definitivas utilizando-se poucas operações de usinagem e retificação, e obtendo as propriedades magnéticas desejadas (CHIAVERINI, 2001).

Os materiais magneticamente moles e duros são caracterizados por sua curva de histerese. Esta curva é representada por um gráfico, cujos eixos correspondem ao campo magnético H em Oerstedes (1 oersted = 79,7 A/m) e a indução magnética B em Gauss.

A figura 1 mostra dois ciclos de histerese, sendo que o ciclo com largura maior representa um ímã permanente (*material magnético duro*), e o estreito representa um material *magnético macio*. A largura representa os valores do campo H necessário para desmagnetizar o material, ou seja, um material magnético duro necessita de mais campo H para ser desmagnetizado que um material magnético macio (WESCHENFELDER et al.,2012). A permeabilidade magnética e a força coerciva são duas características importantes que devem ser consideradas para a análise da curva de histerese.

A permeabilidade corresponde ao valor da indução magnética dividida pela intensidade do campo, conforme mostrado na equação 1:

$$\mu = B / H \quad (1)$$

na qual:

μ = permeabilidade magnética (T)

B = indução magnética (T)

H = campo magnético (G)

Com base nas características de permeabilidade e força coerciva, os materiais magnéticos podem ser divididos em dois grupos:

- materiais de alta permeabilidade e baixa força coerciva, ou materiais magneticamente moles;
- materiais de alta força coerciva, em que a permeabilidade não é uma característica importante, chamada de materiais magneticamente duros ou ímãs permanentes. As curvas BxH de ímãs comerciais são mostradas na figura 3. Os ímãs apresentados são composto de Nd-Fe-B compactado, ferrita de Ba, Nd-Fe-B em flocos, Samário-Cobalto, Bonded Neo injetado, Neodímio Sinterizado e Al-Ni-Co.

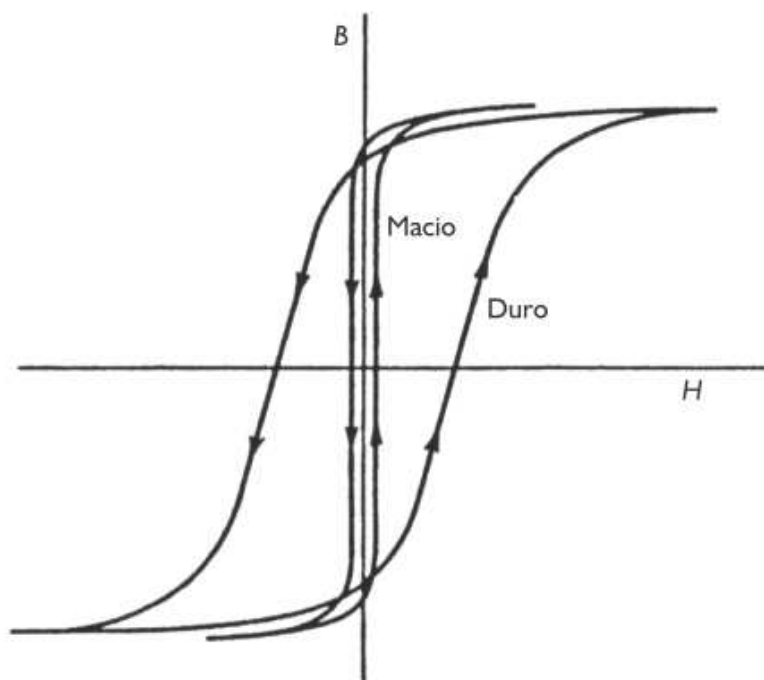


Figura 1- Ciclo de histerese para materiais macios e duros

Fonte: SCHAEFFER et al. (2012)

2.1.1. Materiais magnéticos duros

Os ímãs são materiais com campo magnético permanente e, portanto, atuando em objetos magnetizados ou magnetizáveis. Algumas das aplicações dos ímãs são em alto-falantes, motores, eletroválvulas e para muitos outros fins (LANDGRAF, 2009).

O que caracteriza um ímã é a sua capacidade de reter o magnetismo, ou seja, sua resistência a desmagnetizar mesmo quando lhe é aplicado um forte campo externo. Por isso, a propriedade fundamental de um ímã é seu campo coercitivo intrínseco, H_{ci} . Essa propriedade está

associada a uma característica intrínseca da substância magnética principal, conhecida como campo de anisotropia.

Um ímã ideal é um ímã anisotrópico. A figura 2 apresenta a curva $J \times H$ de um ímã ideal, quando aplica-se um campo magnético H muito intenso, no primeiro quadrante, o material é completamente magnetizado e J atinge o valor de saturação, J_s . O teste da perfeição do alinhamento ocorre quando o campo H é reduzido a zero e a polarização magnética não diminui: as partículas estão perfeitamente orientadas e tão perfeitamente magnetizadas que mesmo reduzindo o campo, a polarização magnética remanente é igual a de saturação. O teste seguinte, mais exigente, ocorre no segundo quadrante: se a microestrutura for perfeitamente isenta de defeitos, mesmo com a aplicação de um campo magnético contrário, a polarização magnética não diminui, ou seja, a curva $J \times H$ é horizontal. Quando o campo contrário atinge o valor crítico, o material se desmagnetiza (J cai a zero) e imediatamente magnetiza-se no sentido oposto. A remanência da curva $B \times H$ é igual à remanência da curva $J \times H$, pois como $B = \mu_0 H + J$, quando $H=0$, $B=J$. No início do segundo quadrante, como J é constante, B diminui linearmente com $\mu_0 H$. O campo coercivo H_c que é o valor de H quando $B=0$ tem, portanto, relação direta com o valor de J_s no ímã ideal (LANDGRAF, 2009).

No mundo, a técnica de fabricação mais utilizada para obtenção de ímãs é o processamento de materiais particulados, pelo processo da metalurgia do pó. Como a fase magnética é obrigatoriamente anisotrópica, ocorre à magnetização espontânea do material em uma única direção cristalina. Considerando que o material for moído a ponto de que cada partícula contenha um só cristal, sendo depositadas relativamente soltas em uma cavidade, quando forem submetidas a um campo magnético intenso sofrerão uma rotação, de maneira que tenham suas direções cristalinas de magnetização espontânea alinhadas na direção do campo externo aplicado. Esta técnica de orientação do material permite obter um altíssimo grau de paralelismo das direções cristalinas das partículas, maximizando a remanência (WESCHENFELDER et al., 2012)

Para fornecer resistência mecânica a esse material, o pó é compactado, cuidadosamente retirado da cavidade e levado a um forno de sinterização, no qual as partículas soldam-se umas às outras, mesmo abaixo do ponto de fusão. Essas duas etapas, a compactação e a sinterização,

pouco alteram o grau de orientação das partículas e mesmo assim produzem uma densificação (eliminação de poros) e um grande aumento da resistência mecânica (LANDGRAF, 2009).

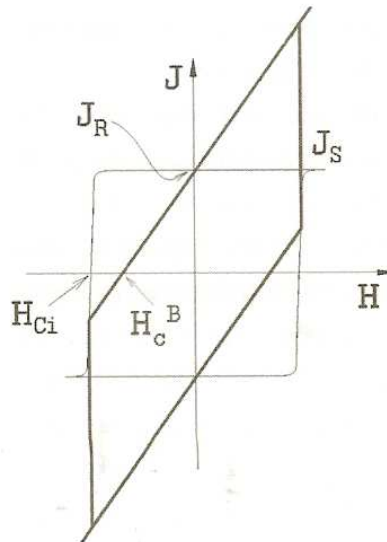


Figura 2- Curva JxH de um ímã ideal

Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009)

Os ímãs permanentes são essenciais por armazenar energia e por colocar esta energia à disposição por intermédio de um campo magnético estático. A escolha de um dado material para certa aplicação depende de vários fatores. Existe um balanço entre as propriedades magnéticas e os custos, de forma que nem sempre para uma dada aplicação o ímã permanente a ser utilizado será um material com propriedades excepcionais, se houver similar com custo reduzido. É feita uma importante distinção entre as propriedades magnéticas intrínsecas e extrínsecas dos ímãs permanentes. Propriedades intrínsecas são as propriedades da fase magnética principal de um ímã que são independentes da microestrutura da amostra. As propriedades intrínsecas são a ordem ferro ou ferrimagnética, a magnetização de saturação (M_s), a temperatura de Curie (T_c) a anisotropia magnética. Por outro lado, propriedades extrínsecas são aquelas criticamente dependentes da microestrutura da amostra e da orientação dos grãos, e incluem a indução remanente (B_r) e o campo coercivo (H_c). Para escolha do ímã, devem ser feitas avaliações de fatores como: temperatura de operação, efeitos de desmagnetização,

intensidade do campo de indução, características ambientais, espaço disponível para os vários movimentos possíveis, etc. (SCHAEFFER et al., 2012).

Segundo o Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009, "os ímãs hoje mais utilizados, são os ímãs cerâmicos de hexaferrato de estrôncio e bário e os superímãs de terras raras, que são fabricados por técnicas de processamento de materiais particulados: sinterização ou aglomeração com polímeros". Analisando o comportamento de um ímã do segundo quadrante da curva de histerese, demonstra como o magnetismo do material, medido pela indução magnética B , é modificado pela presença de um campo magnético contrário H . A qualidade de um ímã é indicada pela remanência (Br) e o campo coercitivo (H_c).

Pode-se notar, na figura 3, que o ímã sinterizado de Neodímio é o de maior valor de remanência, da ordem de 1,3 T. Esse valor pode ser entendido levando-se em consideração que a saturação magnética do composto de $Nd_2Fe_{14}B$ é 1,6 T, mas para obter um alto campo coercivo intrínseco é necessário ter um teor de neodímio maior que o estequiométrico, resultando na presença de uma fase intergranular não magnética, que reduz a saturação do material. Além disso, o ímã é fabricado por técnicas de metalurgia do pó, resultando em poros e perto de 1% de óxidos, que também são não magnéticos. Por fim, o alinhamento dos cristais não é perfeito, o que faz com que esta curva $J \times H$ não seja perfeitamente horizontal, no primeiro e segundo quadrantes. Caso a orientação desse ímã fosse perfeita, o seu campo coercivo seria $H_c B = Br/\mu_0 = 1,3/\mu_0 = 1,3 \text{ kA/m}$. A figura 3 mostra que esse ímã tem $H_c B = 950 \text{ kA/m}$, bastante próximo ao limite teórico (LANDGRAF, 2009).

O ímã de neodímio comporta-se melhor que o ímã cerâmico de ferrita de bário, como mostra a figura 3. Entretanto, o baixo custo da cerâmica justifica o aumento de tamanho dos componentes para obter as propriedades desejadas. É por isso que se utiliza amplamente no mercado esta família de ímãs (LANDGRAF, 2009).

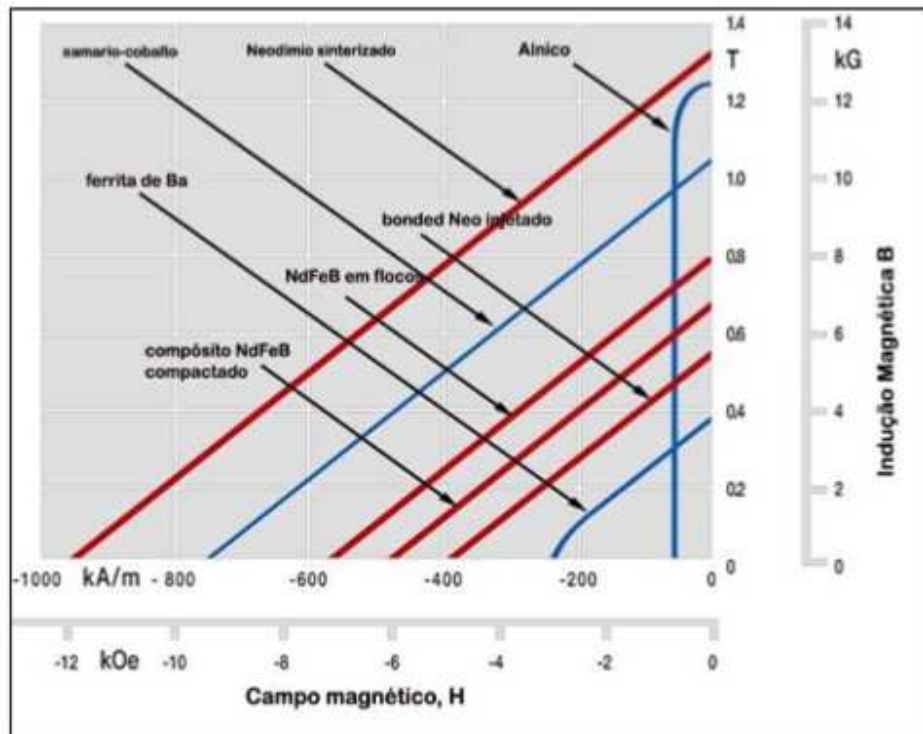


Figura 3- Curva BxH de ímãs comerciais

Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ (2009)

Em situações nas quais haja necessidade que o componente tenha pequenas dimensões, a flexibilidade geométrica e a capacidade de reduzir tempo de montagem por meio de integração das partes oferecidas por técnicas como a compactação ou a injeção de compósitos ímã-polímero possibilitam a utilização do uso de ímãs de neodímio. Uma técnica de baixo custo para produzir partículas de liga de Neodímio-Ferro-Boro com pequeno tamanho de grão é a solidificação por resfriamento rápido em equipamentos chamados *melt-spinners*. A figura 3 mostra que a remanência desse material está perto de 0,8 T, pois é isotrópico, ou seja, não há como orientar os grãos nos flocos produzidos. Como são compósitos com polímeros, a remanência cai um pouco mais, proporcionalmente a quantidade de polímeros necessária ao processo: tipicamente 20% em volume no caso de processamento por compactação, e 30% em volume no caso de injeção (LANDGRAF, 2009).

2.1.2. Materiais Magnéticos Macios

As pesquisas por materiais magnéticos macios com melhores características são motivadas pela possibilidade de redução nas dimensões dos equipamentos (máquinas elétricas, por exemplo) e diminuição de limitações no desempenho devido, por exemplo, à saturação e perdas magnéticas por histerese e Foucault (CREMONESI,2009).

Esses materiais são aplicados em peças polares, armaduras, núcleos de relés e circuitos impressos. Eles compreendem quatro tipos de composições: ferro puro, liga de ferro-silício com 3% de Si, ligas de ferro-fósforo contendo 0,45 a 0,75% de P e ligas de ferro níquel contendo 50% de Fe e 50% de Ni. Essas ligas são, geralmente, muito moles, de modo que são dificilmente produzidas pelos processos convencionais devido à dificuldade de sua usinagem (CHIAVERINI, 2001).

O ferro empregado na produção desses materiais deve ser muito puro, de origem eletrolítica ou atomizada.

Na sua grande maioria, os núcleos do estator e do rotor das máquinas elétricas são construídas com chapas de aço baixo carbono. Algumas máquinas de maior rendimento ainda são construídas com chapas de aço-silício, com um percentual de 1 a 3% de silício. O processo total para a confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, corte e tratamento para isolamento, empacotamento e fixação. No caso das chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste num 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, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes (RICHARDSON, 1982).

2.2. Aplicações da M/P em núcleos de máquinas elétricas rotativas

As máquinas elétricas e suas aplicações estão sofrendo profundas modificações em decorrência do avanço tecnológico dos materiais empregados.

Em relação ao controle de velocidade, as máquinas de corrente contínua, máquinas síncronas e de indução começaram a ter uma alteração referente à sua empregabilidade. Até o meio do século XX, as máquinas CC eram predominantemente utilizadas em aplicações que exigiam esta característica. Porém, com o avanço de novas topologias de conversores e técnicas de controle, este cenário mudou. Hoje existe uma grande aplicação com máquinas de indução e síncronas de ímãs permanentes e de relutância, tanto em potências de média e alta tensão. Como exemplos práticos podem ser citados o trem alemão (ICE) e o trem rápido francês (TGV).

Levando em consideração as propriedades magnéticas, os seguintes fatores são determinantes para o desempenho das máquinas elétricas: (DIAS et al., 2005)

- Elevada Permeabilidade Magnética: Quanto maior a permeabilidade magnética 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 o maior campo magnético possível (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;
- Elevada Indução de Saturação: 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, mesmo com o aumento do campo magnético, a indução magnética pouco se altera;
- Baixas Coercitividade e Retentividade: O ideal é a curva de histerese se aproximar de uma reta, ou seja, baixas coercitividade e retentividade. A área da curva de histerese representa as perdas por ciclo de histerese em um dispositivo eletromagnético alimentado com corrente alternada;
- Elevada Resistividade Elétrica: Todo dispositivo eletromagnético alimentado com corrente alternada apresenta tensões induzidas no núcleo de ferro do dispositivo. Esta tensão induz correntes no núcleo, conhecidas por correntes parasitas ou correntes de Foucault que são

responsáveis por uma apreciável perda nos núcleos destes dispositivos. Por este motivo, estes núcleos são construídos a partir de finas lâminas com espessura menor que o milímetro, isoladas eletricamente uma da outra. Isto limita e reduz as correntes induzidas, diminuindo as perdas por correntes parasitas. Outra forma de atenuar os efeitos das correntes parasitas, e em consequência as perdas, é desenvolver um material que, sem perder as características magnéticas, apresente alta resistividade elétrica.

Conforme se pode constatar, nos últimos anos as pesquisas se concentraram basicamente no desenvolvimento de novas topologias de conversores e novas técnicas de controle. Pode-se constatar, por exemplo, que as máquinas de indução sofreram poucos avanços em relação a sua topologia tradicional, sendo que a maioria dos acionamentos emprega ainda máquinas de fabricação normal. Com relação à máquina síncrona, constata-se um desenvolvimento de inúmeras novas variantes para princípios já há muito estabelecidos, tais como máquinas com ímãs, máquinas de relutância, máquinas a relutância chaveada, motores de passo e máquinas híbridas, as quais foram impulsionadas pelo desenvolvimento de novos tipos de ímãs à base de terras raras. O desenvolvimento e avanço destes novos tipos de máquinas também foram possíveis graças ao desenvolvimento de técnicas numéricas avançadas de projeto e análise, entre eles o método de elementos finitos. Estas novas variantes utilizam, entretanto, em sua grande maioria, materiais convencionais para as partes ferromagnéticas, ou seja, os núcleos do estator e do rotor ainda são formados a partir de chapas de aço laminadas. Existem poucos trabalhos publicados sobre a utilização de materiais novos nos núcleos magnéticos de máquinas. Dentro deste quadro, um dos maiores desafios para a engenharia dos materiais se constitui no desenvolvimento e na produção de materiais magnéticos mais baratos e com características adequadas para o regime de trabalho imposto pelas máquinas elétricas. Graças aos avanços tecnológicos dos últimos anos, a engenharia de materiais tornou possível não apenas a fabricação de ímãs permanentes de alto produto energético, mas também o desenvolvimento e fabricação de materiais magnéticos capazes de substituir os núcleos de estatores e rotores (PEREIRA, 2000).

As propriedades magnéticas e elétricas dos materiais obtidos por metalurgia do pó são influenciadas por vários fatores, sendo que aqueles considerados de maior importância no desenvolvimento de núcleos magnéticos de máquinas elétricas estão relacionados a seguir:

- Na maioria dos casos, a resistividade de um elemento metálico aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas impurezas provocam distorções no reticulado cristalino. Quanto maior as imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade. Por esta razão, uma resistividade maior em metais é obtida em ligas compostas de dois ou mais metais, nas mesmas proporções, ou em proporções próximas. Nestas condições, há uma interpenetração das redes cristalinas dos materiais presentes na liga (VAN VLACK, 1970).
- A adição de silício ao ferro, além de elevar a resistividade elétrica, aumenta também a permeabilidade magnética relativa máxima, diminuindo a coercitividade, contudo, leva a um decréscimo da indução de saturação (LALL et al., 1998).
- A maioria dos materiais metálicos ferrosos sinterizados possui resistividade elétrica maior do que materiais maciços de mesma composição química, devido, principalmente, à porosidade e à oxidação superficial das partículas. Portanto, é possível aumentar ainda mais a resistência elétrica total de peças metálicas sinterizadas, compactando com pressão menor, o que aumenta a porosidade do material, diminuindo, portanto, a densidade. A resistividade das ligas metálicas diminui com o aumento da densidade, independentemente do tipo de metal (LALL, 1992).
- Com o aumento da porosidade, há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade (JAMES et al., 1979).
- A resistividade elétrica para a maioria das ligas metálicas também é em função do tamanho de grão. Quanto menor o tamanho de grão, maior a quantidade de contornos de grãos, que também provocam distúrbios na rede cristalina, aumentando a resistividade. Entretanto, a diminuição do tamanho de grão causa um decréscimo da permeabilidade magnética e um aumento da coercitividade (LANDGRAF, 1989; ACESITA, 1993).
- As impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio também afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizadas (LALL et al., 1998).
- O aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética, mas aumenta também a coercitividade. Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização também alteram algumas propriedades físicas (LALL, 1992).

2.3. Máquinas elétricas síncronas trifásicas com ímãs permanentes

As máquinas elétricas trifásicas, bem como a maior parcela das máquinas elétricas, podem funcionar como motor ou gerador. Quando atuam como motor, convertem potência elétrica, a partir de uma fonte de energia elétrica, em 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, simplesmente, de máquinas elétricas (NASAR, 1987).

As máquinas rotativas trifásicas podem ser classificadas como síncronas ou assíncronas. Nos motores síncronos, a velocidade angular do eixo é constante e independe da carga acoplada ao eixo. O limite do uso, para determinados valores, é a potência nominal da máquina. Nos motores assíncronos, há uma queda da velocidade angular quando é acoplada carga no eixo (NASAR, 1987).

As máquinas trifásicas, considerando o seu aspecto construtivo, são constituídas fundamentalmente de duas partes:

- Estator: Parte fixa da máquina construída de chapas de aço laminadas, na qual são colocados os enrolamentos de armadura com alimentação trifásica, é gerada uma onda de indução magnética também conhecida por campo girante.
- Rotor: Parte girante da máquina construída de chapas de aço laminadas na qual, na maioria das vezes, estão presentes os enrolamentos de campo.

A diferença fundamental entre as máquinas trifásicas está na concepção do rotor. Os principais tipos de máquinas trifásicas, considerando o aspecto enrolamento de campo, são: (KOSOW, 2006; DIAS et al., 2005).

- Máquina síncrona convencional com alimentação de campo externa: os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua, que é conduzida através de anéis deslizantes e escovas. O inconveniente neste tipo de máquina é que esta necessita de uma fonte de tensão externa contínua ajustável. Entretanto, esta máquina funcionando como motor pode apresentar características capacitivas, possibilitando dessa forma a sua utilização para correção do fator de potência em

instalações elétricas. A defasagem com características capacitivas destes motores pode ser controlada pela corrente de campo fornecida por uma fonte de corrente contínua externa. Com relação à forma do rotor, conforme a figura 4, estes podem ter polos lisos ou polos salientes (DIAS et al., 2005).

A ação da corrente nos enrolamentos de campo, juntamente com o movimento do rotor, produz uma tensão induzida no estator. Caso a máquina esteja ligada ao sistema, irá circular corrente alternada pelos enrolamentos do estator. Esta corrente produz um fluxo de reação no próprio estator que tende a se opor ao fluxo magnético de excitação. A composição destes dois fluxos tem efeitos diferentes nos enrolamentos do estator e do rotor. O fluxo magnético de excitação, que é produzido pelo rotor, e o fluxo magnético de reação do estator têm magnitudes constantes e giram com a velocidade do rotor. Assim, a composição dos dois fluxos origina um fluxo resultante, que é estacionário com relação ao rotor, mas que gira com velocidade síncrona com relação ao estator.

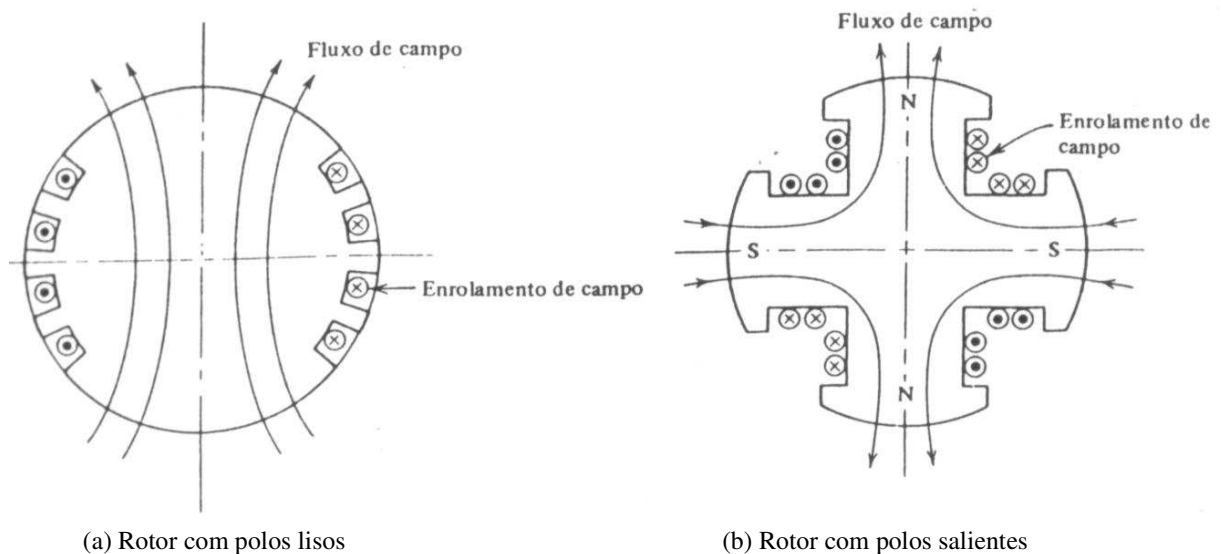


Figura 4- Distribuição de fluxo em um motor de indução síncrona com ímãs permanentes

Fonte: NASAR (1987)

- Máquina síncrona convencional com excitatriz interna: os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua a partir de um gerador interno também conhecido por

excitatriz, que está acoplado diretamente ao eixo da máquina. Neste tipo de máquina não há escovas, resultando dessa forma a redução das manutenções. O rotor pode ser de polos lisos ou polos salientes (DIAS et al., 2005).

- Máquina síncrona com ímã permanente: não há enrolamentos de campo, estes são substituídos por ímãs permanentes de alto valor energético. Também não possui escovas ou fonte de tensão contínua, reduzindo manutenções, aumentando o rendimento e tendo uma melhor relação torque/volume. Os ímãs são fixados, em alguns casos, tangencialmente na superfície dos polos do rotor ou axialmente na parte interna do rotor. Alguns possuem uma configuração híbrida (DIAS et al., 2005).

As máquinas síncronas com ímãs permanentes podem ser classificadas conforme a orientação da densidade de fluxo magnético de excitação no entreferro em dois principais tipos: radial e axial. A máquina de fluxo radial, mostrada na figura 5, possui a direção da densidade do fluxo de magnético perpendicular ao eixo do rotor. Os ímãs utilizados possuem magnetização com direção radial e estão localizados na superfície ou no interior do rotor. Estas máquinas apresentam rotores com diâmetros reduzidos e de baixa inércia, baixas perdas e têm o comprimento axial maior em relação ao seu diâmetro. São mais facilmente encontradas no mercado atualmente devido a sua robustez e fácil construção mecânica (BORBA, 2016).

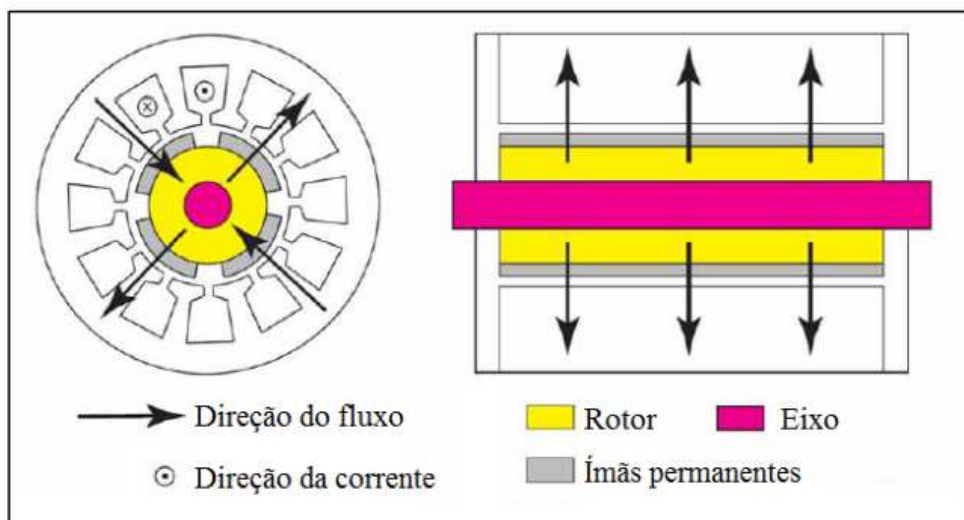


Figura 5-Máquina de Fluxo Radial
Fonte: MAIA (2011)

As máquinas de fluxo axial possuem a direção da densidade do fluxo de magnético de excitação no entreferro paralela ao eixo de rotação, e o entreferro está localizado em um plano perpendicular ao do eixo. A figura 6 mostra um desenho deste tipo de máquina. Os ímãs empregados nestas máquinas apresentam magnetização axial e são fixados em discos que, dependendo da configuração, podem ser girantes ou estacionários. Estas máquinas são caracterizadas por possuírem uma geometria semelhante a um disco, com diâmetro muito maior que se comprimento longitudinal. É uma excelente alternativa para aplicações que requerem alto torque em baixas velocidades (BORBA, 2016).

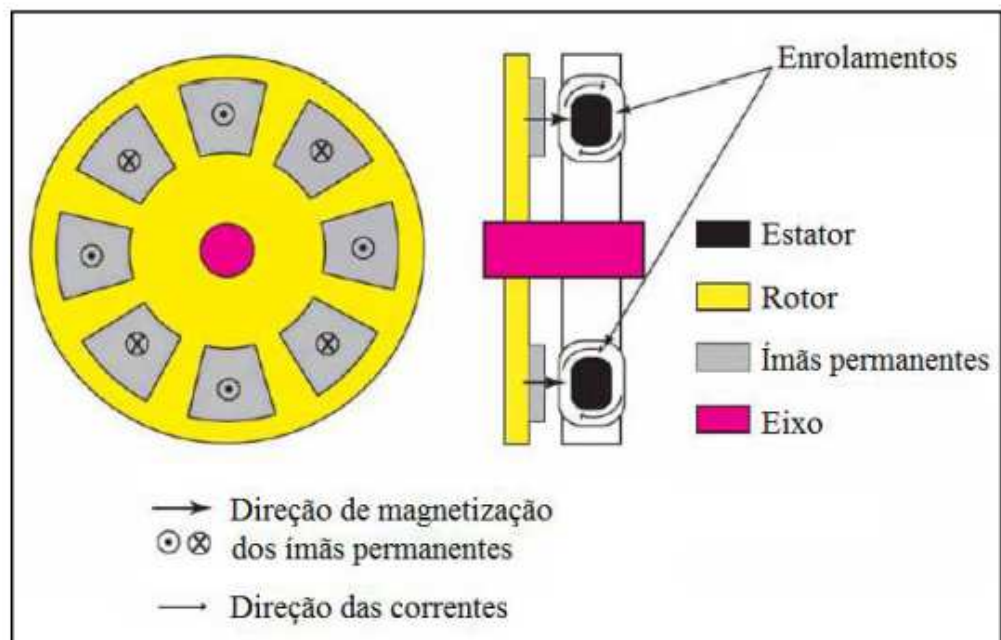


Figura 6- Máquina de Fluxo Axial

Fonte: MAIA (2011)

Existe um terceiro tipo de fluxo em máquinas com ímãs permanentes que é o fluxo transversal. Estas máquinas são menos conhecidas que as de fluxo radial e axial, mas vêm ganhando considerável atenção nos últimos anos, principalmente devido a sua possibilidade de aplicação em dispositivos aeroespaciais, tais como alternadores de velocidade variável e frequência constante. As máquinas de fluxo transversal têm como principais características o maior aproveitamento do fluxo magnético devido à forma como foi projetada, estrutura

eletromagnética complexa, enrolamentos anelares, baixo fator de potência, pequenas perdas nos enrolamentos, alta densidade de torque, entre outras. A vantagem das máquinas de fluxo transversal em relação às de fluxo axial e radial está na possibilidade de aumentar o espaço destinado ao enrolamento sem reduzir o espaço para o fluxo principal, o que colabora para a redução das perdas no cobre. A figura 7 apresenta um exemplo desta topologia (BORBA, 2016).

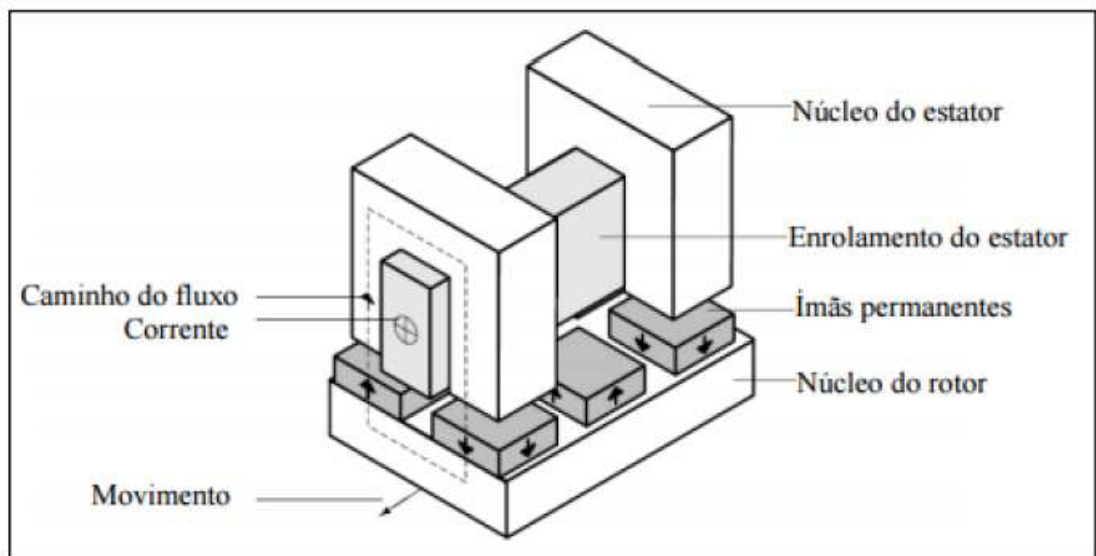


Figura 7 - Máquina de Fluxo Transversal

Fonte: VERDUM (2013)

O sistema de campo eletromagnético de uma máquina síncrona polifásica pode ser substituído por ímãs permanentes, em situações nas quais é necessário o controle da corrente de campo. Isto descarta grandes aplicações em máquinas envolvendo tensões constantes, nas quais o controle de fluxo de força reativo é importante. O uso de sistema de campo com ímã permanente é geralmente restrito a pequenas máquinas, para geradores, para as quais a variação da tensão nos terminais com corrente de carga não é importante ou, para ambos, motores e geradores, o fator de potência não é relevante. Máquinas síncronas com ímãs permanentes podem ser operadas mais eficientemente que as máquinas síncronas convencionais equivalentes, com um fator de potência maior que a máquina de indução de mesma relação e tamanho de armadura. Geradores com ímãs permanentes de alta velocidade encontram muitas aplicações no segmento aeroespacial, pelo fato de possuírem alta relação potência/peso (torque/volume) (GRAY, 1989).

Quando utilizados materiais magnéticos, a probabilidade de perda da magnetização permanente em serviço é grande, a menos que sejam tomadas precauções com o método de operação ou construção, de seleção dos materiais magnéticos empregados. O efeito da reação de armadura no campo radial do sistema de polo principal é completamente desmagnetizado se uma máquina geradora está com carga indutiva ou é sujeita a um curto circuito. As distribuições no entreferro dos componentes radiais do campo de armadura e enrolamento de campo estão em fase oposta, e este campo resultante predomina no direcionamento do fluxo nos materiais magnéticos que limitam o entreferro. Quando a máquina funciona como motor ou gerador, e o limite de torque de velocidade síncrona é excedido, o campo de armadura gira a uma velocidade de deslizamento em relação à estrutura do ímã permanente e conseqüentemente exerce uma influência de magnetização e desmagnetização no ímã permanente. Pode-se considerar como ponto normal de operação de um sistema de ímã permanente incorporando um entreferro, a interseção da linha de entreferro com a linha de recuo, sendo a última localizada no segundo quadrante do plano $B \times H$ e fixado a uma extremidade da característica de desmagnetização do material de ímã permanente. A aplicação de uma fonte adicional de f.m.m. que alternadamente magnetiza e desmagnetiza efetivamente troca a posição da constante de inclinação da linha do entreferro para a direita e esquerda da origem do plano B/H , respectivamente. A desmagnetização da rede ocorre se o limite da linha essencialmente linear é excedido e o ponto de interseção move-se para a parte com inclinação abrupta da curva de desmagnetização. A remoção da modulação f.m.m. coloca o ponto de operação na linha de interseção do entreferro como uma nova linha de recuo, produzindo um menor valor de densidade de fluxo do ímã B_m (GRAY, 1989).

Na desmontagem da máquina deve-se utilizar um sistema de proteção, caso seja realizada a operação sem o uso de um protetor para curto-circuito, os polos dos ímãs permanentes podem iniciar a perda de magnetismo remanente, pela mudança da inclinação da linha de entreferro (GRAY, 1989).

Ambas as situações podem ser evitadas, pelo uso de um material de ímã permanente cuja característica de desmagnetização, dentro do elemento do segundo quadrante do principal laço de histerese, se aproxima do ideal de uma rampa uniforme do valor mínimo teórico de μ_0 . Os materiais de terras raras de cobalto apresentam estas condições com um valor alto de remanência

e um correspondentemente valor alto de força coercitiva. As ferritas mais baratas têm esta característica de linha reta, com valores mais baixos de remanência e força coercitiva (GRAY, 1989).

Uma desvantagem inerente do motor síncrono é que este não tem partida própria, na falta de uma fonte de alimentação com frequência constante. O motor “Line Start Permanent Magnet” (LSPM) emprega um enrolamento tipo gaiola adjacente ao entreferro, no lado que leva o sistema de polo de campo. Isto permite aproximar-se da velocidade síncrona como um motor de indução, quando o enrolamento de armadura no lado oposto do entreferro é energizado. Se o campo é gerado por um eletroímã, a corrente de excitação não deve ser fornecida até o rotor atingir uma velocidade muito próxima da síncrona. Se ímãs permanentes são empregados, embora seus campos irão alternadamente ajudar e se opor aos enrolamentos de campo de armadura, o rotor avança sequencialmente em passos de uma posição de repouso para a próxima. A influência do campo de armadura pode ser reduzida pelo arranjo das ranhuras, núcleos laminados que apóiam a gaiola, fornecendo a blindagem magnética para os ímãs permanentes durante a aceleração. Durante a sincronização atual, o efeito de blindagem da gaiola está muito reduzido e os ímãs são sujeitos à influência da máxima desmagnetização (GRAY, 1989).

A figura 8(a) mostra uma característica típica de torque / velocidade para uma partida de um motor síncrono rodando acima da velocidade síncrona. A gaiola do rotor de uma máquina com estator alimentado é responsável pelo torque do motor de indução que age na direção do campo girante sincronizado, iniciado por uma corrente que circula nos condutores do estator. Os enrolamentos do estator, porém, têm induzido dentro disto um componente de f.e.m. e corrente devido ao movimento relativo entre estator e o rotor com campo de ímã permanente, que produz um efeito de frenagem. Fornecido o mínimo de torque, quando a aceleração exceder o torque de carga e a máquina vai sincronizar e conseqüentemente irá girar com um ângulo de carga δ cuja dependência do torque de carga é indicada na figura 8(b).

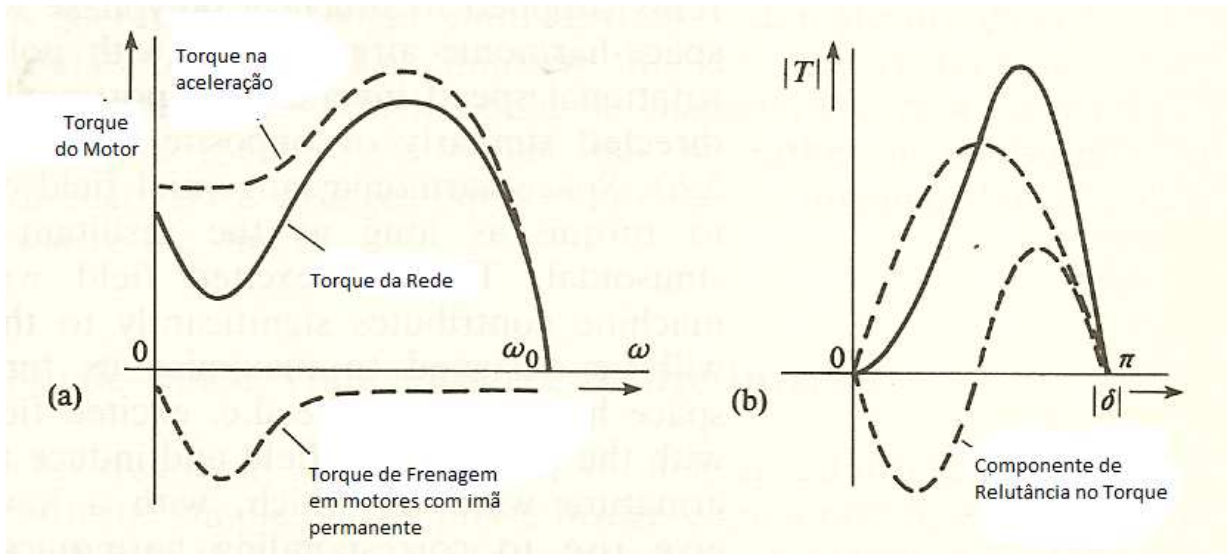


Fig. 8- (a) Característica Torque / Velocidade para partida de um motor de indução síncrono
 (b) ângulo característico de torque / carga após a sincronização

Fonte: GRAY (1989)

2.4. Aerogeradores

Os aerogeradores são equipamentos que têm como objetivo converter a energia cinética do vento em energia elétrica. Atualmente, os aerogeradores são utilizados em sua grande maioria para a produção de energia elétrica. Seu princípio de funcionamento está baseado na conversão eletromecânica de energia, decorrente do acionamento de um gerador elétrico conectado à turbina eólica. Com as evoluções ocorridas no campo das máquinas elétricas, os geradores passaram a ser fundamentais no processo de geração de energia. A integração do gerador com o sistema eólico deve receber grande atenção, pelo fato do gerador lidar com as variações na velocidade do vento e no torque de entrada, exigência de frequência e tensão constante na energia produzida e, principalmente, necessita ter alta confiabilidade, pois muitas vezes o isolamento geográfico do aerogerador dificulta a instalação, operação e manutenções. Para que isto ocorra, o aerogerador é composto basicamente pelas pás, cubo, eixo, caixa, gerador elétrico, nacelle, torre e pelos sistemas de conexão e controle, como é mostrado na figura 9:

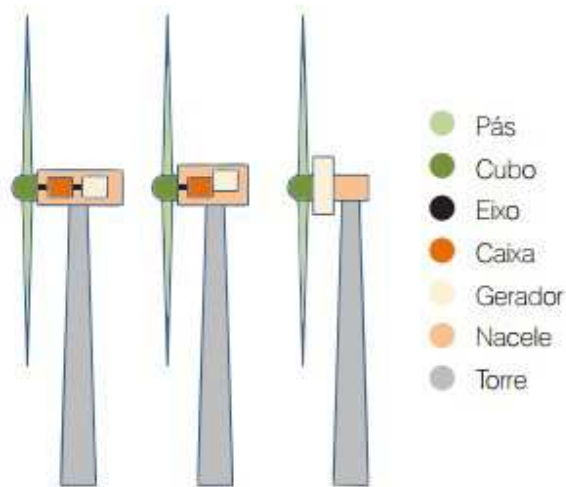


Figura 9 - Componentes básicos de um aerogerador de eixo horizontal
 Fonte: AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (2014)

Na figura 10, tem-se um esquema de funcionamento de um aerogerador:

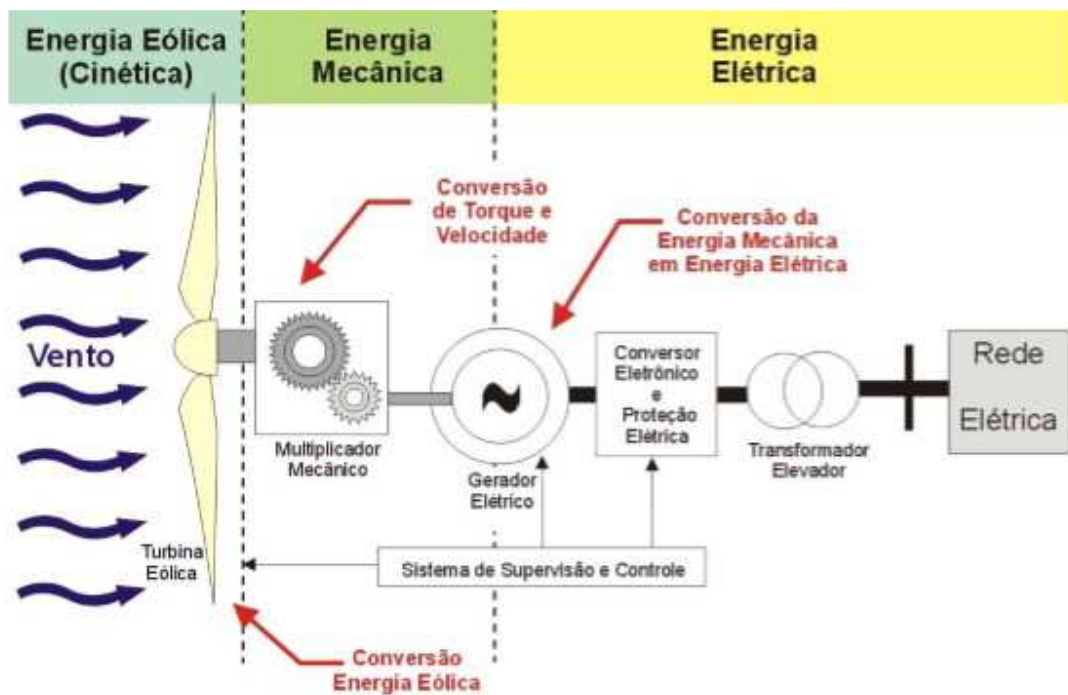


Figura 10 – Esquema Geral de Funcionamento de um Aerogerador

Fonte: PAVINATTO (2005)

Diferentes tecnologias de aerogeradores têm sido desenvolvidas nas últimas décadas. Dependendo da tecnologia, pode haver componentes e/ou subcomponentes específicos, bem como pode haver diferenças em sua disposição no aerogerador. As diferentes tecnologias de aerogerador podem ser classificadas segundo os seguintes critérios: (UPWIND, 2007).

a) Velocidade de rotação: velocidade fixa (VF); velocidade variável limitada (VVL); velocidade variável (VV);

b) Regulagem de força ou mecanismo de controle: controle estol (*stall*); controle de estol ativo; controle de passo (*pitch*);

c) Trem de acionamento (*drive train*): com caixa de engrenagem (multiplicadora); sem caixa de engrenagem (acionamento direto);

d) Tipo de gerador: gerador de indução (assíncrono) com rotor de gaiola (*squirrel cage induction generator* – SCIG); gerador de indução com rotor ventilado (*wound rotor induction generator* – WRIG); gerador de indução duplamente excitado (*doubly fed induction generator* – DFIG); gerador síncrono de excitatriz com ímãs permanentes (*permanent magnet synchronous generator* – PMSG); gerador síncrono excitado eletricamente – com enrolamento de campo (*electrically excited synchronous generator* – EESG). O gerador síncrono chama-se alternador, e o gerador assíncrono se designa indução. O nome síncrono se deve ao fato de a máquina operar com uma velocidade de rotação constante sincronizada com a frequência da tensão elétrica alternada aplicada aos seus terminais, ou seja, devido ao movimento igual de rotação entre o campo girante e o rotor (sincronismo entre campo do estator e rotor). Os geradores assíncronos rodam com uma velocidade superior à velocidade de sincronismo, existindo escorregamento do rotor em relação ao campo girante. A máquina assíncrona não necessita de excitatriz. Conforme o conceito de velocidade de rotação, diferentes combinações de mecanismos de controle, acionamento e tipo de gerador foram desenvolvidos.

As figuras de 11 a 19 apresentam os principais tipos de aerogeradores com as suas topologias de forma esquemática:

- Gerador de indução com rotor de gaiola (squirrel cage induction generator – SCIG)

A topologia dominante nos anos 80 e 90 ficou conhecida como “conceito dinamarquês”: velocidade fixa, controle estol, caixa de engrenagem de múltiplo estágio e gerador de indução com rotor de gaiola (SCIG) conectado diretamente à rede através de um transformador. A figura 11 apresenta esta topologia de forma esquemática.

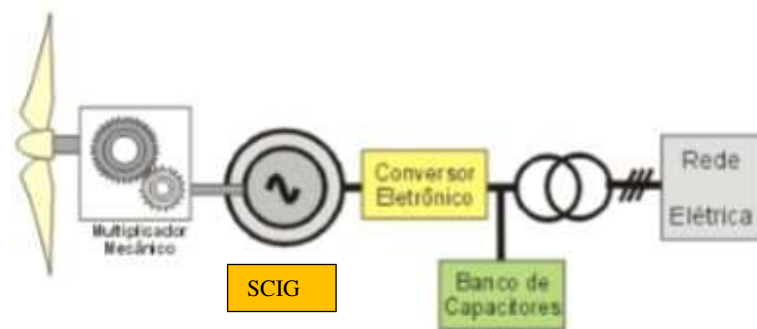


Figura 11- Esquema de um gerador do tipo SCIG

Fonte: AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (2014)

Este sistema evoluiu posteriormente para um sistema de duas velocidades utilizando um gerador SCIG com pólo mutável. Obteve-se assim maior eficiência das pás e redução de ruído a baixas velocidades. Este conceito tem sido usado pela Vestas, Made (atualmente Gamesa) e Nordex. Geralmente o número de pólos dos aerogeradores comerciais deste tipo é de dois ou três pares, requerendo uma caixa de engrenagem de três estágios. Não há conexão elétrica entre o estator e o rotor. A introdução do controle de estol ativo permitiu a virada da pá, melhorando a eficiência de extração de potência da máquina (o passo da pá do rotor é girado na direção do estol e não na direção da posição de embandeiramento – menor sustentação – como é feito em sistemas de passo normais). Este sistema tem sido usado pela Siemens e Vestas. O controle de passo vira as pás no sentido contrário do mecanismo de estol ativo e necessita de acionamento mais potente, com algumas desvantagens para o caso de aerogeradores de grande porte.

- Gerador de indução com rotor ventilado (wound rotor induction generator-WRIG)

Nos anos 90 a Vestas passou a adotar o conceito de velocidade limitada conhecido como OptiSlip. Este conceito utiliza um conversor eletrônico de potência para controlar a resistência do

rotor (slip) e um gerador de indução com rotor ventilado (WRIG), similar ao SCIG. Fabricantes como Vestas e Suzlon utilizam este conceito, esquematizado na figura 12.

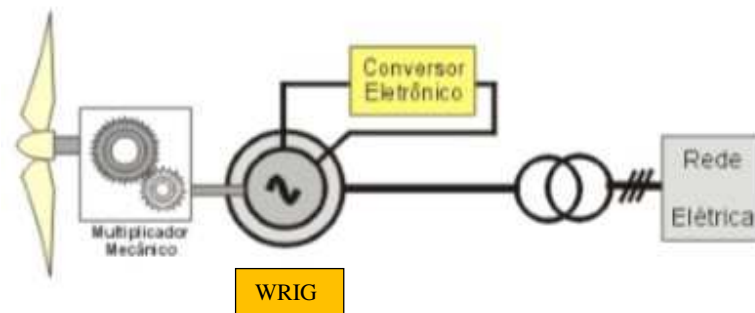


Figura 12- Esquema de um gerador do tipo WRIG

Fonte: AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (2014)

A partir dos anos 90, os aerogeradores de capacidade maior que 1,5 MW passaram a utilizar o conceito de velocidade variável proporcionando maior qualidade de geração de energia, entre outros benefícios. Um aerogerador com sistema de velocidade variável geralmente utiliza mecanismo de controle de passo, caixa de engrenagem multiestágio, e conversor eletrônico de potência. São possíveis diferentes conceitos de gerador: DFIG, SCIG e PMSG.

- Gerador de indução duplamente excitado (doubly fed induction generator – DFIG)

O gerador de indução duplamente excitado (DFIG) é o tipo geralmente utilizado para aerogeradores de grande porte. O princípio básico de operação é similar ao SCIG, porém a potência ativa do rotor pode ser controlada pela corrente do conversor paralelo ao rotor, conforme esquema da figura 13.

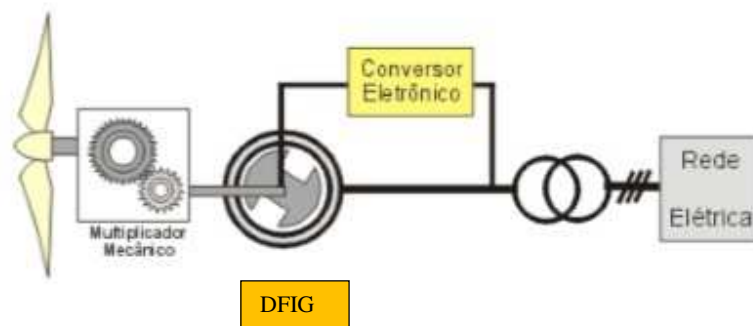


Figura 13- Esquema de um gerador do tipo DFIG

Fonte: AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (2014)

O sistema com gerador SCIG precisou ser modificado, com a introdução de um conversor de potência para permitir a operação com velocidade variável. Comparativamente ao conceito dinamarquês, este sistema tem a desvantagem de maior custo, associado ao elevado custo do conversor de larga escala (full scale converter). A Siemens utiliza este conceito, esquematizado na figura 14, em alguns modelos comerciais.

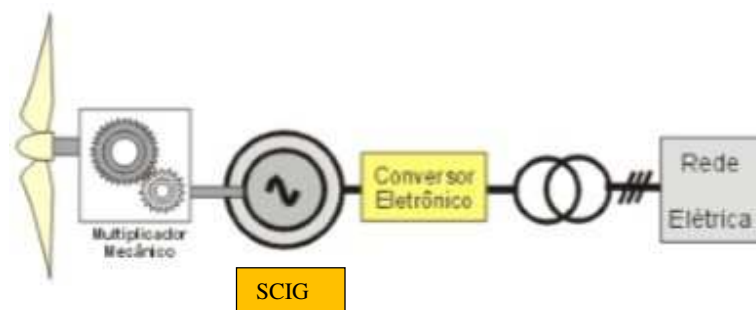


Figura 14-Esquema de um gerador do tipo SCIG com conversor de larga escala

Fonte: AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (2014)

- Gerador síncrono de excitatriz com ímãs permanentes (permanent magnet synchronous generator – PMSG)

Uma alternativa ao tipo DFIG é o gerador síncrono de excitatriz com ímãs permanentes (PMSG) e com conversor de larga escala. O custo dos componentes eletrônicos é menor e não

são utilizadas escovas. Esta tecnologia tem sido usada pela Gamesa (Made), GE e Clipper, e é representada esquematicamente na figura 15.

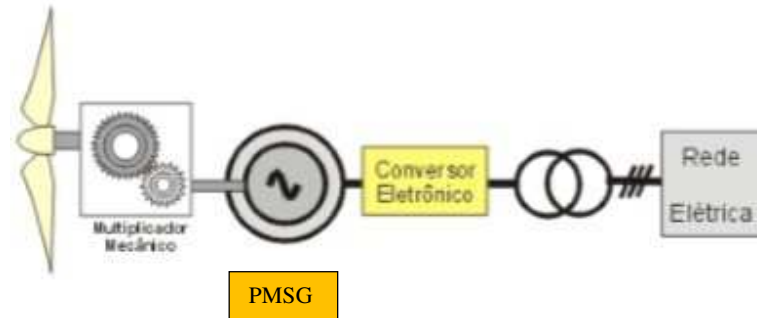


Figura 15- Esquema de um gerador do tipo PMSG com conversor de larga escala
 Fonte: AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (2014)

A partir de 1991, aerogeradores com acionamento direto (sem caixa de engrenagem) começaram a surgir como forma de reduzir as falhas associadas à caixa de engrenagem e minimizar problemas de manutenção. A principal diferença entre os geradores com e sem caixa de engrenagem é a velocidade de rotação do gerador. O gerador de acionamento direto gira a baixa velocidade porque o rotor do gerador está conectado diretamente ao cubo do rotor das pás, sendo necessária então a produção de uma taxa de torque elevada. Como consequência, o gerador de acionamento direto é geralmente mais pesado que o com caixa de engrenagem. Para maior eficiência e diminuição de peso de partes ativas, os geradores de acionamento direto são projetados com diâmetro maior e menor passo de pólo, conforme figura 16.

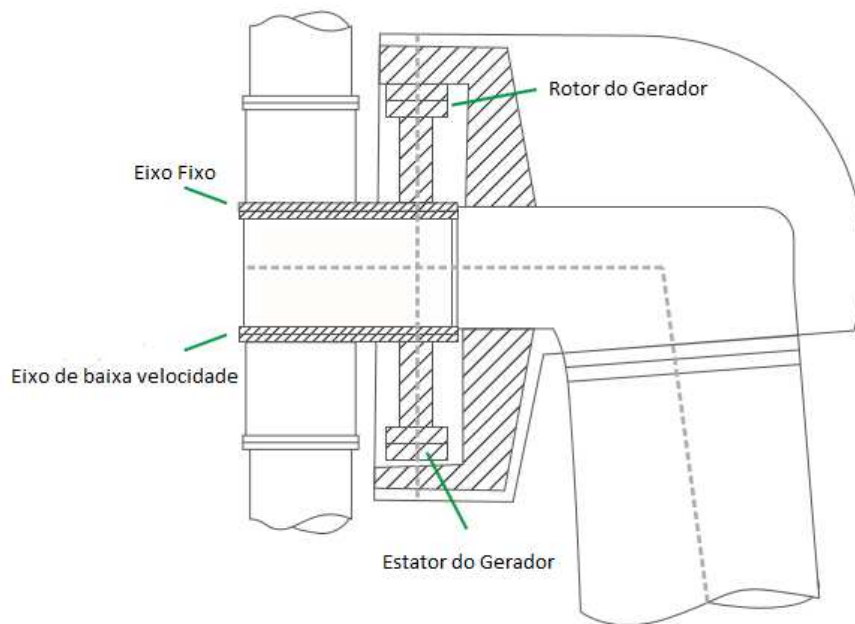


Figura 16- Esquema de um gerador do tipo Acionamento Direto Síncrono.

Fonte: AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (2014)

Há dois conceitos principais de gerador no mercado sem a utilização de caixa de engrenagem: o tipo EESG e o tipo PMSG.

- Gerador síncrono excitado eletricamente – com enrolamento de campo (electrically excited synchronous generator - EESG)

O tipo EESG, gerador síncrono excitado eletricamente com enrolamento de campo, é o mais comumente utilizado pelos fabricantes com tecnologia sem caixa de engrenagem. É construído com um sistema com enrolamento de campo e não requer o uso de ímãs permanentes, os quais agregariam um custo adicional significativo ao gerador. Por outro lado, o custo do conversor necessário é considerável, pois requer componentes eletrônicos mais caros e necessita de refrigeração intensiva. Este conceito, esquematizado na figura 17, é utilizado pela Enercon/Wobben, que o denomina de gerador anelar (annular generator).

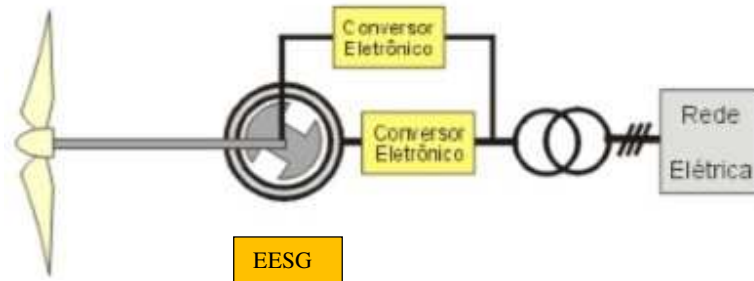


Figura 17- Esquema de um gerador de acionamento direto do tipo EESG
 Fonte: AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (2014)

Recentemente, o uso de geradores do tipo PMSG tem se tornado mais atrativo pela melhoria de desempenho e diminuição dos custos dos ímãs e outros componentes eletrônicos. Empresas como WEG (tecnologia Northern) e IMPSA (tecnologia Vensys) utilizam este conceito, representado esquematicamente na figura 18.

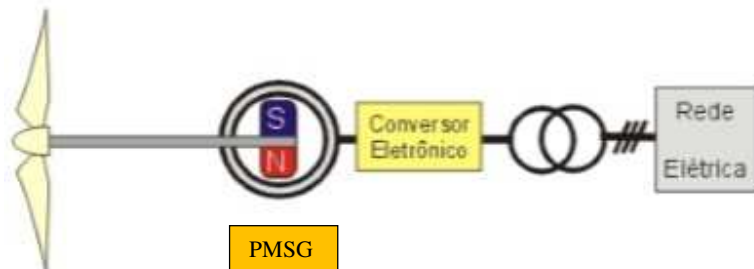


Figura 18-Esquema de um gerador de acionamento direto do tipo PMSG
 Fonte: AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (2014)

Há ainda sistemas com utilização do conceito de velocidade variável, com gerador de ímãs permanentes e caixa de engrenagem planetária de estágio único. Este conceito, apresentado na figura 19, foi introduzido pela Multibrind e é também utilizado pela WinWind.

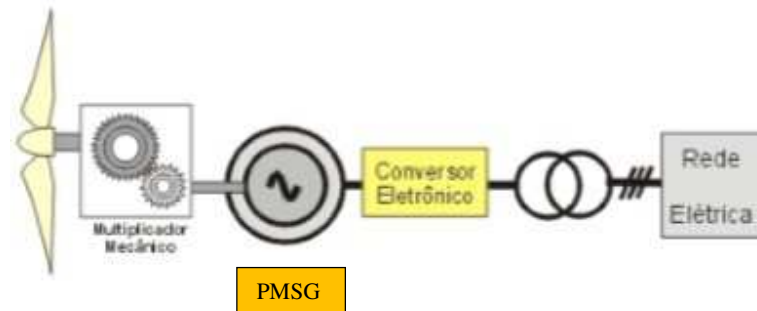


Figura 19- Esquema de um gerador do tipo PMSG com caixa de engrenagem de estágio único

Fonte: AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (2014)

Outra variação é o conceito apresentado pela DeWind, com utilização de caixa de engrenagem de dois estágios, hidrodinâmica. Vários outros conceitos estão sendo desenvolvidos, tais como: gerador de indução linear, geradores de relutância comutada e geradores de indução sem escovas (brushless doubly fed induction generators – BDFIGs), mas que ainda não são comercializados de forma ampla no mercado.

2.5. FEMM 4.2

Para realizar a simulação computacional, foi utilizado o *software* denominado de Método dos Elementos Finitos Magnéticos (FEMM 4.2). O FEMM 4.2 é um método computacional sobre problemas de solução na teoria de campo (força, deformação, eletrostática, eletromagnética, temperatura, velocidade, etc.). Ele é um método aproximado de resolução com um sistema de equações diferenciais parciais (equações diferenciais de condução de calor, corrente elétrica, indução eletromagnética, etc.). É reconhecido entre os métodos numéricos pela sua versatilidade e eficiência para resolução de questões relativas à temperatura, campo eletromagnético, etc. A diferença básica comparada com outros métodos numéricos é que as funções de colocação são escolhidas não para a área investigada inteira, mas para a subárea de dimensões finais - elementos finitos. Neste caso, os elementos finitos são dimensões finitas de linha, área ou volume (MEEKER, 2015).

Por intermédio 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 do motor e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho (MEEKER, 2015).

A idéia principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada um com uma geometria simples, no caso o triângulo. A vantagem de dividir a área inicial em pequenos elementos é que a partir de uma área conhecida torna-se o problema mais fácil de resolver. Por meio do processo de discretização, é formado um problema de álgebra linear com milhares de variáveis, o que seria impossível de resolver sem o auxílio de processadores, os quais por intermédio de algoritmos são capazes de resolver o problema em pouco tempo (LEWIS et al., 2008).

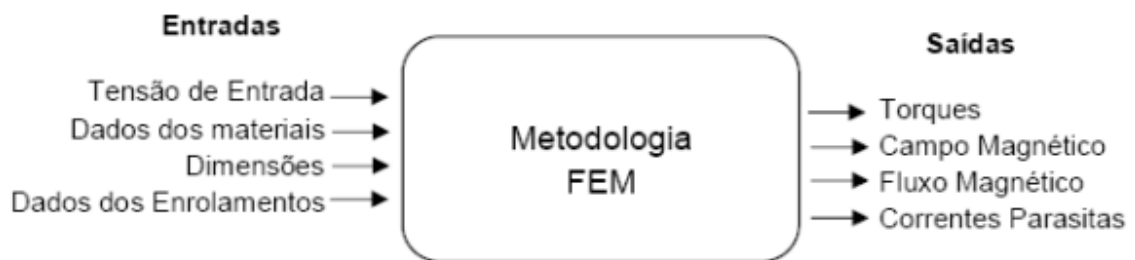


Figura 20- Variáveis de entrada e saída na FEM para materiais magnéticos

O FEM é um conjunto de programas para resolver problemas de baixa frequência eletromagnética em planos bidimensionais com simetria axial. O *software* é dividido em três partes:

Interactive Shell – múltipla interface com pré e pós processamento para os vários tipos de problema. Contém uma interface CAD (*Computer Aided Design*) para definição das propriedades do material e as condições de limite.

Trinagle.exe – modifica a região a ser solucionada em um número grande de triângulos, operação fundamental para a aplicação da metodologia de elementos finitos.

Solvers – algoritmo para solução de problemas magnéticos e eletrostáticos. Cada *solver* utiliza os dados configurados que descrevem o problema para resolver as equações diferenciais de Maxwell obtendo os valores de campo desejado (LEWIS et al., 2008).

Para a simulação da máquina proposta, foram inseridos no FEMM 4.2 os dados de rotação nominal, o número de polos, a potência, a corrente nominal, o número de espiras e o comprimento das chapas, as características do bobinamento e a curva de magnetização do material do núcleo do rotor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi elaborado um fluxo de trabalho para realizar o desenvolvimento da máquina, cujas etapas estão demonstradas na figura 21.

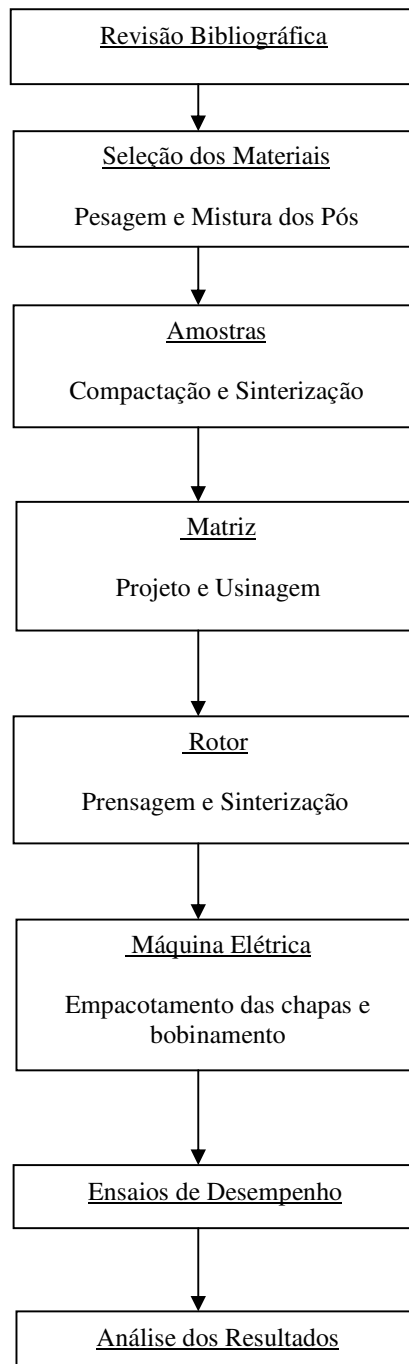


Figura 21- Fluxo do desenvolvimento da Máquina

3.1. Máquina elétrica de referência

A máquina elétrica de referência trata-se do projeto desenvolvido no GDER cujas características são de um motor de indução trifásico de alto rendimento, fabricado pela empresa Eberle (atual Grupo Voges), com quatro polos e 7,5 kW, com todos os componentes originais (carcaça, estator, eixo e rolamentos). Neste trabalho desenvolvido foram readequados e projetados o rotor e os ímãs. As alterações que ocorreram no rotor resultaram em um novo elemento com as seguintes características: (CERVA, 2014)

- Diâmetro do rotor do motor: $\varphi_{rmi} = 137,20$ mm
- Comprimento do núcleo do rotor do motor: $l_{rmi} = 150$ mm
- Diâmetro do eixo: $\varphi_{eixo} = 49,80$ mm
- Diâmetro da cavidade da matriz: $\varphi_{cm} = 124,1$ mm

Concebido o rotor determinou-se o dimensionamento dos ímãs, desta forma especificando o comprimento, espessura e raio de curvatura. Os valores determinados são os seguintes:

- Espessura do ímã: $e_{ímãs} = 6,55$ mm
- Comprimento do ímã: $l_{ímãs} = 150$ mm
- Raio de curvatura do ímã: $Rc_{ímãs} = 62,05$ mm

3.2. Corpos de Prova

O material utilizado, para fabricação do núcleo, foi adquirido da Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificação do fabricante, o pó de ferro utilizado foi o ASC 100.29, com 99,4% da granulometria entre $45 \mu\text{m}$ e $150 \mu\text{m}$.

Foram apresentados os desenhos dos corpos de prova, na forma de anel e cilindro desenvolvidos no GDER (CERVA, 2014).

3.2.1. Matrizes dos Corpos de Prova

A construção das matrizes é necessária para realizar a avaliação das propriedades físicas dos materiais. A geometria da matriz direciona para qual ensaio deva ser realizado no corpo de prova.

- a) Corpo de prova na forma de cilindro: foi aplicado nos ensaios de dureza e obtenção da curva de escoamento e metalografia. Nas figuras 22 e 23 são apresentados o projeto dimensional da matriz e suas imagens.

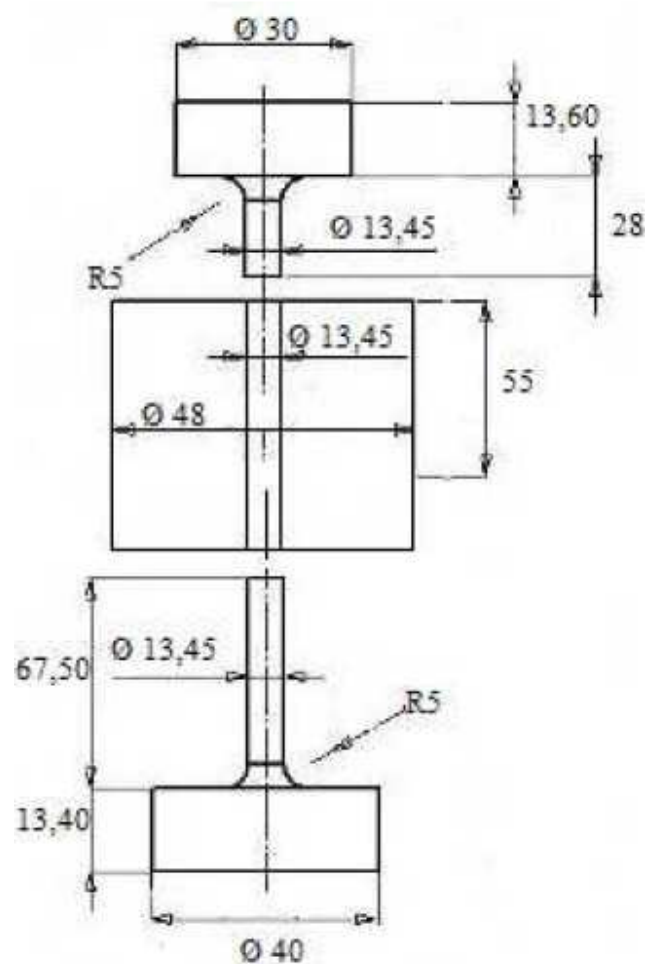


Figura 22- Desenho dimensional da matriz dos corpos de prova na forma cilíndrica.

Fonte: CERVA (2014)



Figura 23- Matriz dos corpos de prova na forma cilíndrica.

Fonte: CERVA (2014)

- b) Corpo de prova na forma de barra com comprimento maior que a área da seção transversal: foi utilizado para obtenção dos valores de resistividade elétrica, mostrado nas figuras 24 e 25.

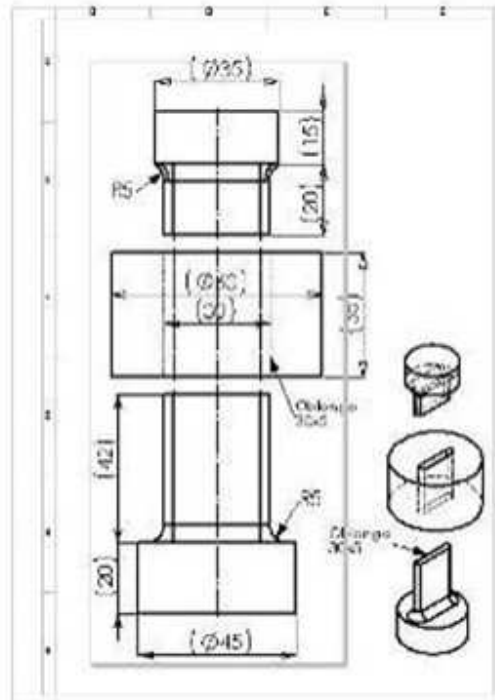


Figura 24- Desenho dimensional da matriz dos corpos de prova na forma de barra.

Fonte: CERVA (2014)

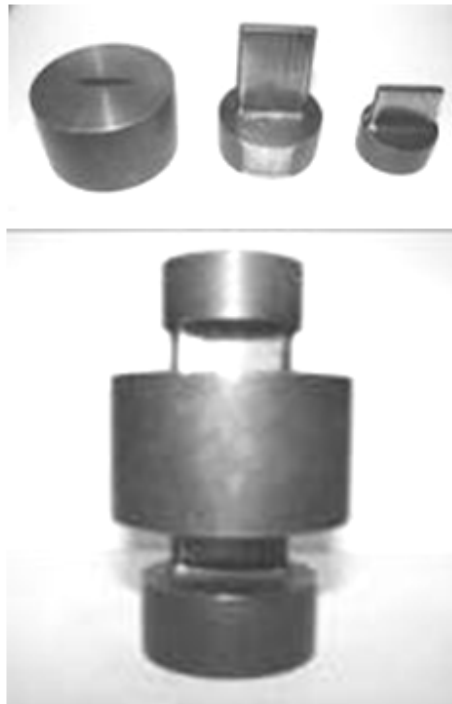


Figura 25- Matriz dos corpos de prova na forma de barra.

Fonte: CERVA (2014)

- c) Corpo de prova na forma de anel: aplicado para medir as perdas magnéticas totais por unidade de massa e para obtenção da curva de histerese, apresentado nas figuras 26 e 27.

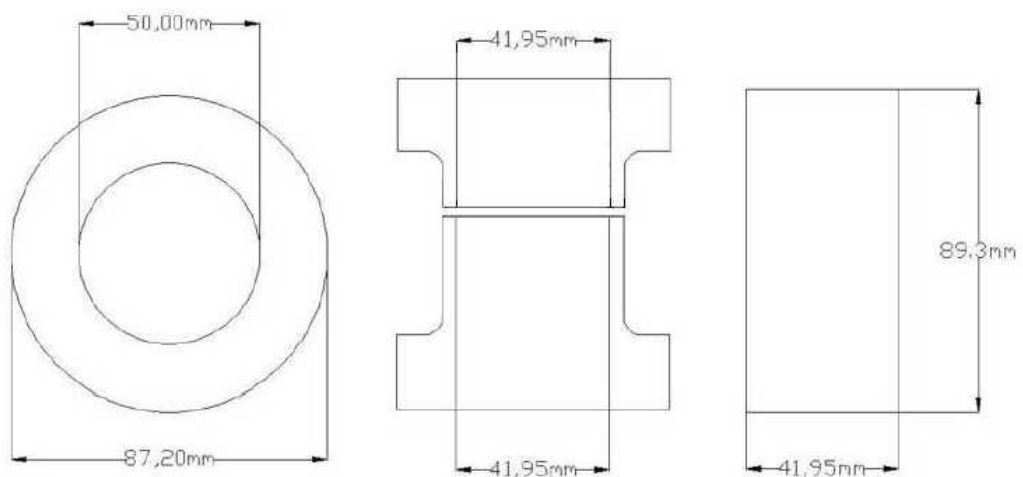


Figura 26- Desenho dimensional da matriz dos corpos de prova na forma de anel.

Fonte: CERVA (2014)



Figura 27- Matriz dos corpos de prova na forma de anel.

Fonte: CERVA (2014)

3.2.2. Compactação e Sinterização dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram compactados a uma pressão de 600 MPa.

O cálculo da pressão é definido a partir da área de cavidade da matriz, portanto é preciso observar o desenho dimensional das matrizes. Para as matrizes dos corpos de prova na forma de cilindro e barras, mostradas na figura 28, deve-se levar em consideração a área total da cavidade. Entretanto, para a matriz dos corpos de prova na forma de anel, mostrada na figura 29, deve-se subtrair a área do pino macho, uma vez que este preencherá uma parte da cavidade da matriz.

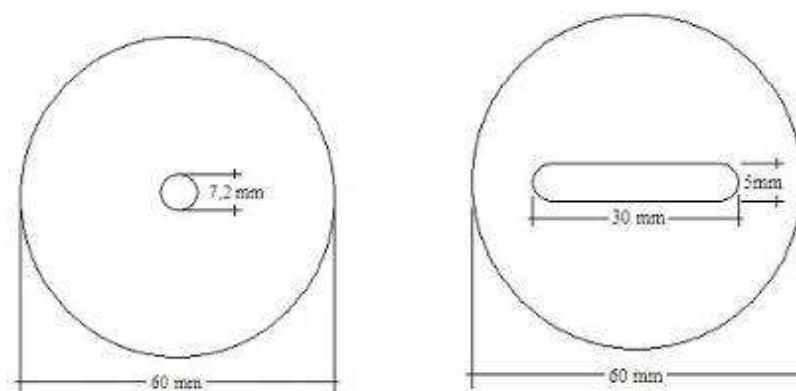


Figura 28 - Geometria da cavidade das matrizes dos corpos de prova na forma de cilindro e de barras

Fonte: CERVA (2014)

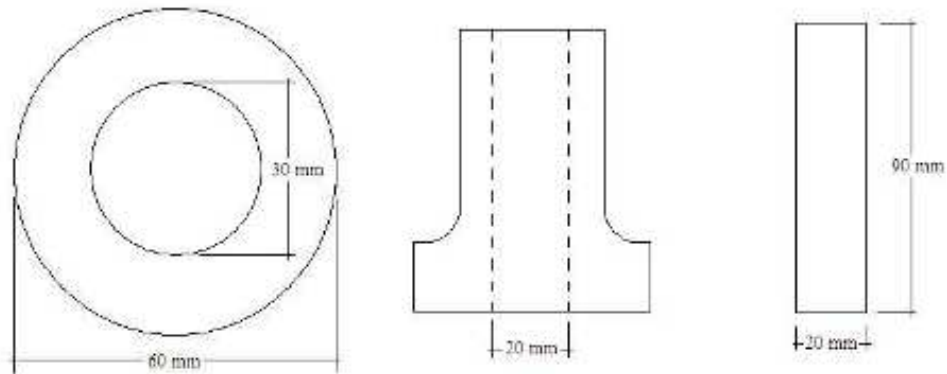


Figura 29 - Geometria da cavidade e pino macho da matriz dos corpos de prova na forma de anel

Fonte: CERVA (2014)

Retirando-se as cotas das matrizes, pode-se calcular a área que será preenchida com pó:

Forma de cilindro:

$$A_c = \pi \cdot r_c^2 = 3,14 \cdot 0,362^2 = 0,41 \text{ cm}^2$$

Forma de barras:

$$A_b = (c_b - \Phi_b) \cdot l_b + \pi \cdot r_b^2$$

$$A_b = (3 - 0,5) \cdot 0,5 + 3,14 \cdot 0,25^2 = 1,45 \text{ cm}^2$$

Forma de Anel:

$$A_a = \pi \cdot r_{ea}^2 - \pi \cdot r_{ia}^2$$

$$A_a = 3,14 \cdot 1,5^2 - \pi \cdot 1^2 = 3,93 \text{ cm}^2$$

As pressões de compactação dos corpos de prova estão relacionadas na tabela 2:

Tabela 2 – Pressão de compactação dos corpos de prova

Forma	Área [cm ²]	Força [ton]
Cilindro	0,41	2,46
Barra	1,45	8,70
Anel	3,93	23,58

Fonte: CERVA (2014)

As compactações dos corpos de prova na forma de cilindros e barras foram realizadas em uma máquina universal de ensaios mecânicos marca KRATOS, com capacidade de 100 kN.

As compactações dos corpos de prova na forma de anel foram realizadas em uma prensa mecânica marca EKA, com capacidade de 400 kN.

A sinterização foi realizada em forno tubular tipo mufla, Para uma boa sinterização, utiliza-se uma taxa de aquecimento de 15°C por minuto, até a temperatura de 500°C na qual as peças permanecem por 40 minutos para retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir a temperatura é elevada para 1.120°C, quando ocorre de fato a sinterização, permanecendo nesta temperatura por 40 minutos. Após, as peças permanecem no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente. A figura 30 mostra a relação de temperatura e tempo decorrido no processo de sinterização.

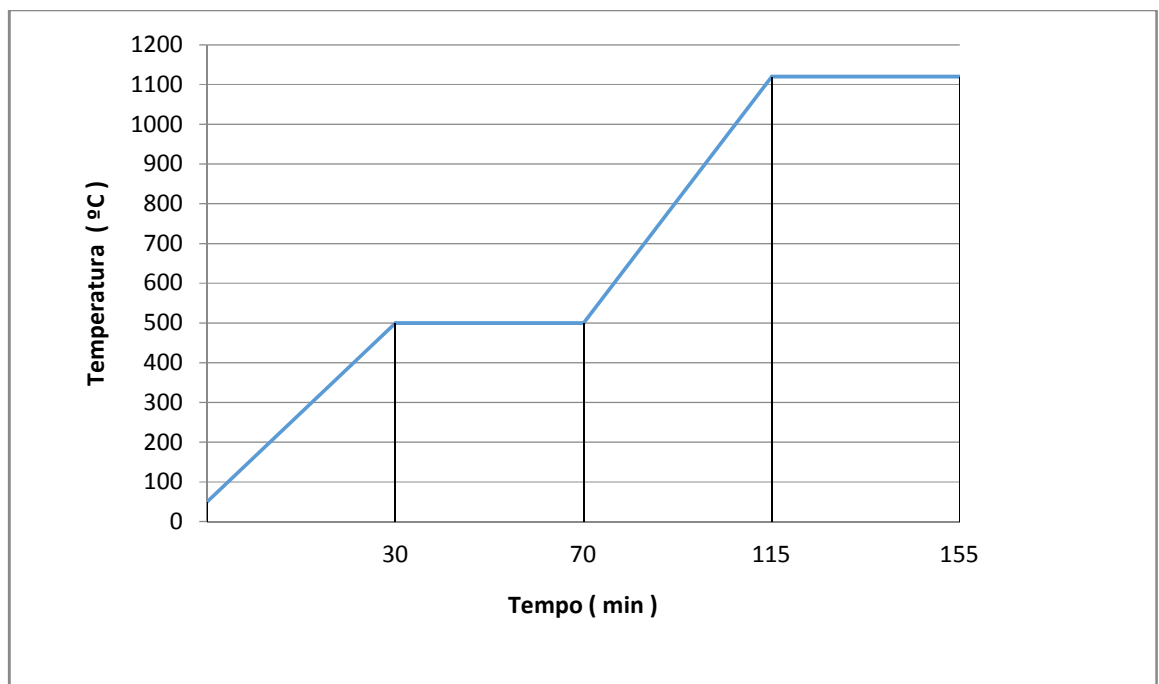


Figura 30 – Temperatura e tempo de sinterização

3.3. Máquina elétrica proposta

A máquina elétrica proposta foi elaborada a partir do motor de indução modelo VTOP, do Grupo Voges algumas diferenças em relação à máquina de referência, destacam-se a utilização de materiais de baixa perda magnética, alta condutividade elétrica, sistema de isolamento com excelente rigidez dielétrica, aprimoramento do sistema de ventilação proporcionando uma melhor distribuição de fluxo de ar sobre a máquina e melhorando a relação fluxo de ar/ruído, entre outros aspectos (VOGES MOTORES, 2010).

Dentre as principais especificações da máquina, na tabela 3 são apresentadas algumas características:

Tabela 3 – Características Gerais da Máquina de Referência

Características	Valores
Modelo	VTOP
Carcaça	132S
Forma Construtiva	B34D
Frequência [Hz]	60
Número de Polos	4
Tensão [V]	220
Potência [kW]	7,5
Escorregamento [%]	2,2

Fonte: VOGES MOTORES (2015)

A carcaça que irá receber as chapas e bobinagem é apresentada na figura 31. Esta carcaça é da empresa VOGES, modelo 132S.



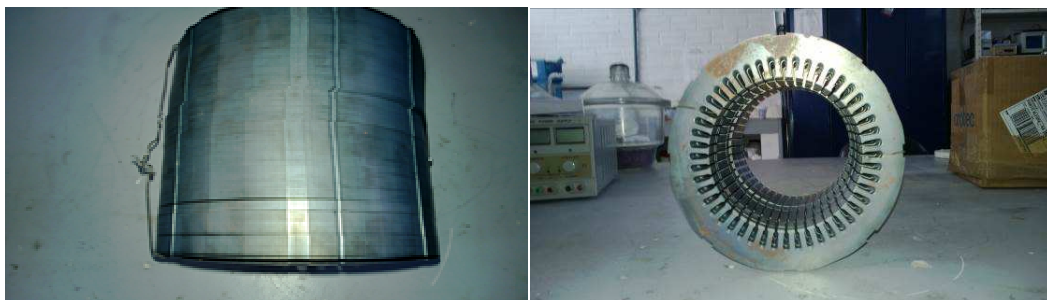
Figura 31 – Carcaça do modelo 132S

A montagem do pacote de chapas obedeceu às especificações apresentadas na tabela 4:

Tabela 4- Especificações do Pacote de chapas

Especificações	Valores
Número de Ranhuras	48
Tamanho do Pacote de Chapas [mm]	148
Número de Chapas	320
Inclinação	10°

O pacote de chapas utilizado aparece na figura 32.



(a) vista superior

(b) vista frontal

Figura 32-Pacote de chapas

O empilhamento das chapas e inclinação é realizado através de um guia central, no formato de meia lua, conectado à carcaça para garantir a inclinação de 10 graus. A inclinação embora reduza ligeiramente o valor eficaz da tensão induzida, é eficaz na redução do seu

conteúdo harmônico e da relutância parasita. Foram adicionados “guias chatos” de chapa, durante o processo, nos rasgos das chapas. Após a montagem do pacote, foi realizada a prensagem do núcleo de chapas e fixados através dos guias cujo resultado é mostrado na figura 33.



Figura 33- Carcaça com o pacote de chapas

Após a montagem das chapas foi realizada a bobinagem, cuja tabela 5 apresenta as especificações:

Tabela 5- Especificações da Máquina Proposta

Especificações	Valores
Ligação	2Y
Nº de Espira/Bobina	16
Bobinas/Grupo	2
Grupos/Fase	4
Nº de Bobinas	12
Passo	1:10:12
Nº de Fios Paralelos	3
Fio Nu (mm)	2x0,81+ 0,91(2x20 +1x19AWG)
Isolação	H
Camada	Única
Massa do cobre (kg)	4,20
Tensão	220/127 V

Na figura 34 é apresentada a máquina elétrica com estator.



Figura 34– Máquina com estator

Os ímãs são compostos de NdFeB (neodímio ferro boro) com revestimento de níquel, para proteção a corrosão. Os ímãs utilizados nesse projeto foram adquiridos comercialmente, pela ampla variedade de formas e tamanhos dos mesmos disponíveis no mercado.

A espessura do ímã é de 6,55 mm, sendo o seu raio de curvatura igual à metade do diâmetro da cavidade da matriz que é de 62,05 mm e o comprimento de 150 mm. São demonstradas na figura 35 as cotas dos ímãs.

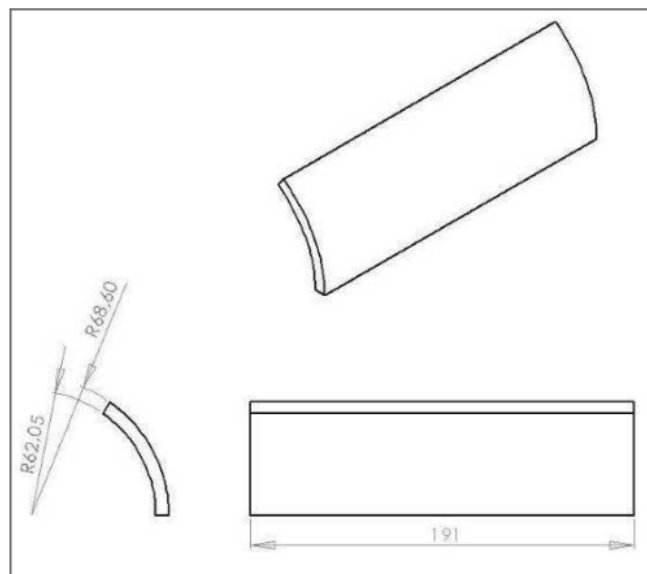


Figura 35- Cota dos ímãs

O rotor utilizado para a montagem final da máquina é mostrado na figura 36:



Figura 36-Rotor com ímãs permanentes

Fonte: CERVA (2014)

3.4. Bancada de Testes

O desempenho da máquina foi avaliado pela utilização de uma bancada de testes, localizada no laboratório do GDER. Os parâmetros necessários a serem medidos são torque, tensão, corrente e frequência. Devido ao fato de a máquina ser utilizada como um gerador foi necessário a utilização de um motor de indução, cujo controle de velocidade foi realizado através do inversor de frequência.

De acordo com as características da máquina, no caso como gerador, foram realizados os seguintes ensaios:

- a) características de tensão x rpm em vazio com variação de velocidade até 1800 rpm e valor da tensão gerada;
- b) características do gerador com carga resistiva, com medição da potência de saída.

A carga aplicada é do tipo resistivo com um valor total de 360 W.

Foram utilizadas seis faixas de rotação entre 300 rpm a 1800 rpm.

Na figura 37 é apresentada a configuração desta bancada e os instrumentos e equipamentos utilizados.

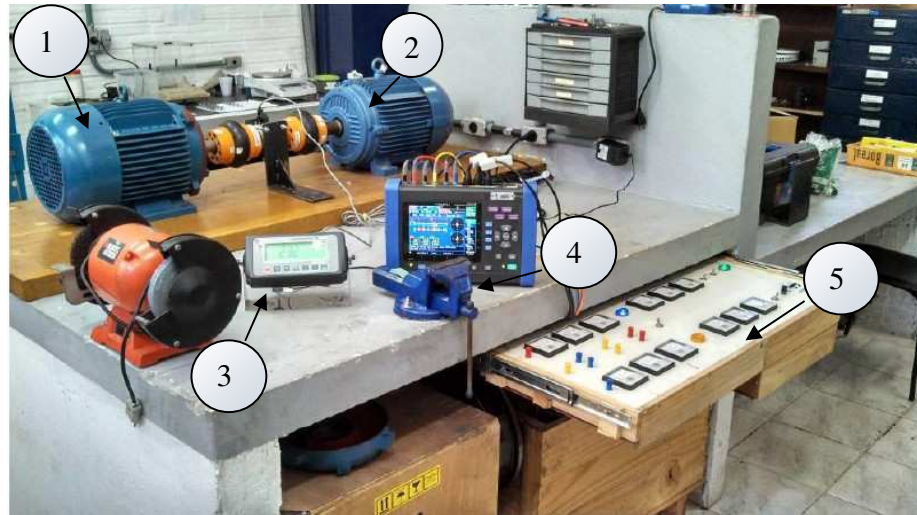


Figura 37- Bancada de testes

- 1) Máquina Síncrona
- 2) Motor de Indução WEG de 7,5 kW acionado pelo inversor de frequência WEG - modelo CFW08
- 3) Sensor de Torque MK - modelo MMK-5030
- 4) Analisador de Energia HIOKI – modelo PW 3198
- 5) Instrumentos de medição analógicos

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios de desempenho foram realizados visando o levantamento de informações quantitativas das quais o desempenho da máquina possa ser avaliado. Foi colocada uma carga resistiva de 360 W, com a utilização de lâmpadas incandescentes.

Pelo fato o gerador foi testado a vazio, apresentou uma distorção de sinal pela influência bastante significativa, relativo às harmônicas do inversor de frequência, os resultados apresentados são todos com o gerador em carga.

Variando a velocidade da máquina, foram utilizados os seguintes valores de rpm: 300, 400, 450, 540 considerando que para a finalidade de aplicação, este gerador atua com baixa rotação. Como referência de resultado, também foi testada com a rotação nominal de 1800 rpm. Os dados obtidos, através dos ensaios de desempenho, são apresentados na tabela 6, considerando que os resultados de tensão, corrente e potência são valores médios.

Para evitar o efeito de desalinhamento junto ao acoplamento foi utilizado o sistema de alinhamento a laser da SKA, modelo TKSA 41, no conjunto motor-gerador.

Os resultados, apresentados na tabela 6, demonstram a relação que com o aumento da rotação, os valores de tensão, corrente e potência também crescem, caracterizando o fornecimento da potência de saída, lembrando que o valor de carga é fixo. O valor de torque, também acompanha o sistema, diminuindo com o aumento da velocidade de rotação.

Os resultados apresentados de tensão, corrente e potência, são valores médios.

Tabela 6- Resultados do Teste de Desempenho

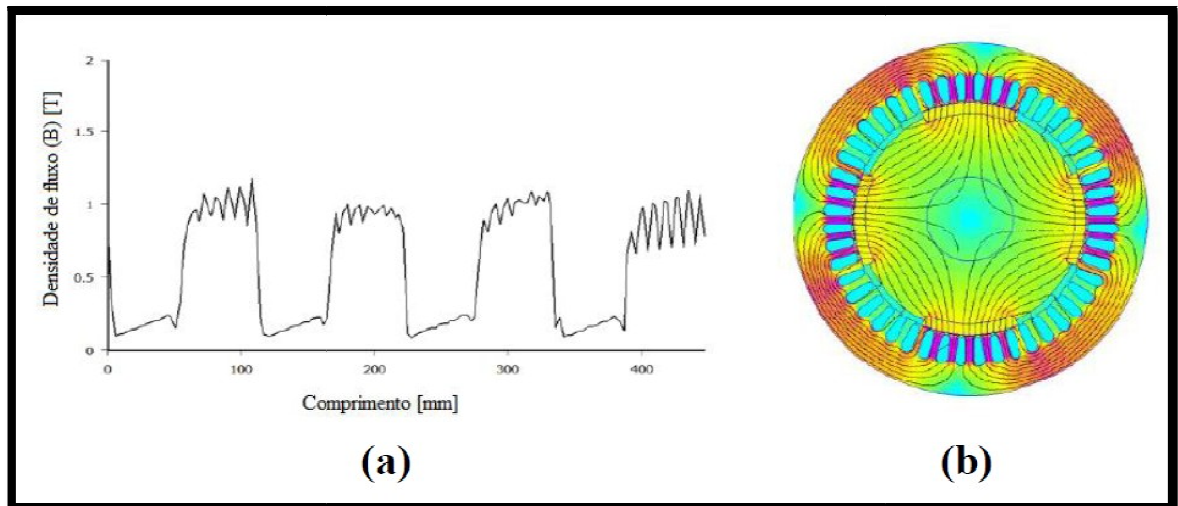
<i>Rotação (rpm)</i>	<i>Torque (N/m)</i>	<i>V rms (V)</i>	<i>I rms (A)</i>	<i>P (W)</i>
300	6,2	44,14	4,22	107,33
400	6,0	57,97	4,78	159,66
450	5,0	67,07	5,13	198,33
540	4,7	80,85	5,64	263,33
1800	4,0	135,47	7,38	577,66

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as considerações dos resultados do FEMM 4.2 e ensaios de bancada.

5.1. Resultados da Simulação Computacional

Na simulação com a ferramenta FEMM 4.2, foram consideradas três configurações de material no rotor, ou seja, rotor a partir de chapas M15 (aço silício), rotor a partir da liga sinterizada Fe-2%P e ferro puro sinterizado. Salienta-se que o material sinterizado mais adequado a ser utilizado foi a liga Fe-2%P. O estator, em todas as configurações, é de núcleo de chapas M15. Como o núcleo do rotor foi compactado em blocos e posteriormente usinado, um material com dureza elevada tornaria tal ação inviável. Contudo, devido à dureza da mesma, esta foi descartada. O ferro puro sinterizado apresentou propriedades magnéticas e elétricas inferiores, mas com baixa dureza. A simulação na máquina elétrica utilizando o estator com chapas M15 e núcleo de Fe puro sinterizado é apresentada na figura 38. Pode-se observar à esquerda a amplitude, em módulo, da indução de entreferro, e à direita, as linhas de fluxo magnético geradas no plano longitudinal da máquina.



(a) densidade de fluxo de entreferro

(b) linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina

Figura 38– Simulação da máquina com rotor de ferro puro sinterizado

A indução magnética de entreferro apresenta valores máximos entre 1,0 e 1,25 T para alimentação, não variando muito entre os dois 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; FITZGERALD, KINGSLEY JR., & UMANS, 1990). A partir da simulação obteve-se também o valor do torque resultante e amplitude média de indução de entreferro apresentada na tabela 7.

Tabela 7 – Grandezas elétricas e magnéticas obtidas a partir da simulação

Tipo de Rotor	Indução de Entreferro [T]	Torque [N.m]
Fe puro	1,17	33,66

Analisando, a tabela 7, o rotor nos itens indução no entreferro e torque, terá um comportamento similar a uma máquina com rotor de chapas tradicional. Desta forma o resultado da simulação computacional indica um rendimento próximo a uma máquina síncrona convencional aço silício de 7,5 kW.

5.2. Ensaio de Desempenho da Máquina

Nos ensaios de desempenho são enfocadas as características elétricas da máquina, com testes de tensão gerada, características de tensão x rpm, valores do gerador com carga resistiva e potência de saída. De acordo com os dados obtidos nos resultados experimentais, são apresentadas as relações rotação x potência e rotação x torque. Na figura 39 é demonstrado a relação rotação x potência.

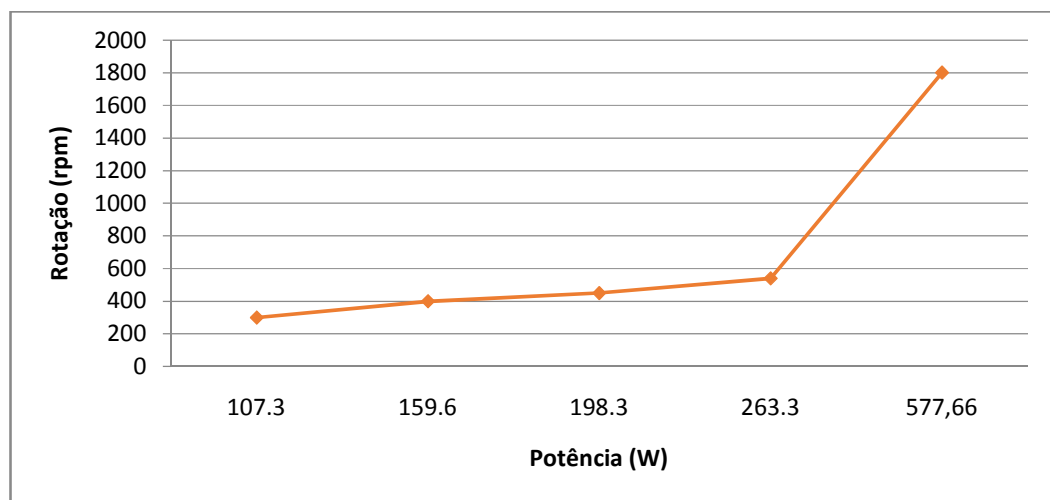


Figura 39 – Relação Rotação x Potência

Na figura 40 é apresentada a relação rotação x torque.

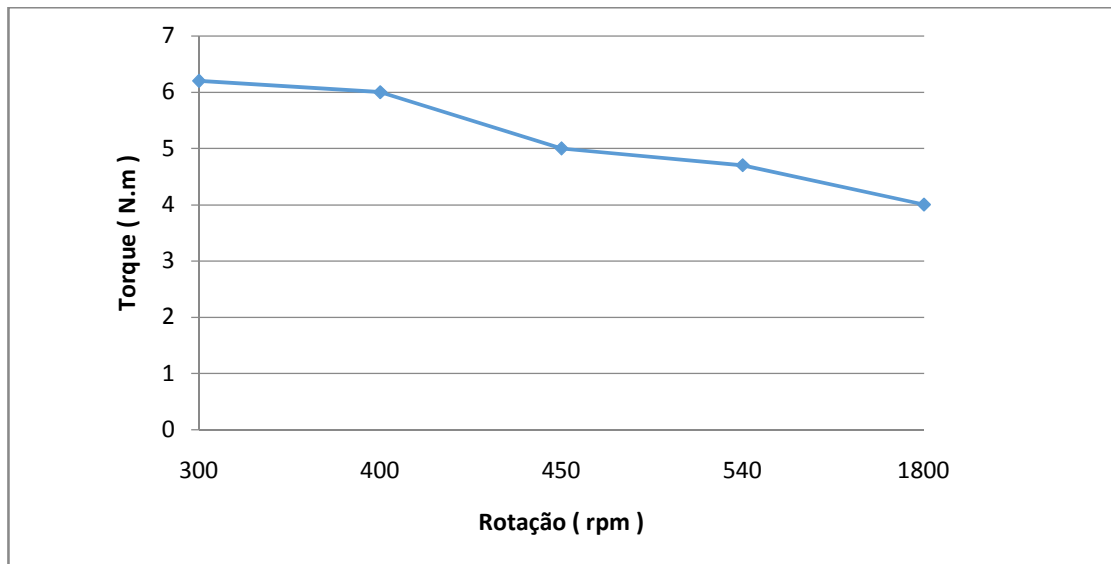


Figura 40 – Relação Rotação x Torque

Em um primeiro momento o valor de torque é maior, porém ao elevarmos a rotação, superando a inércia do sistema, o mesmo diminui. A energia mecânica em uma máquina síncrona é aplicada ao eixo, portanto quando elevamos a rotação temos um valor menor de torque.

Constatamos o acréscimo na potencia elétrica fornecida, demonstrando a efetividade da máquina.

Foi indicado pelo analisador de energia um valor muito alto de DTH (Distorção total de harmônicas) ocasionando formas de onda distorcidas. Esse tipo de deformação geralmente é imposta por dispositivos que apresentam uma relação não linear entre tensão e corrente como, por exemplo, transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação. Outros elementos não lineares são as cargas eletrônicas que produzem descontinuidades na corrente devido ao chaveamento dos conversores. Neste caso, existe a interferência do inversor de frequência. A presença de harmônicas é sinônimo de uma onda de tensão ou de corrente deformada. A deformação da onda de tensão ou de corrente significa que temos uma distorção na qualidade da energia fornecida.

Estes resultados estão demonstrados através das figuras 41 a 45.

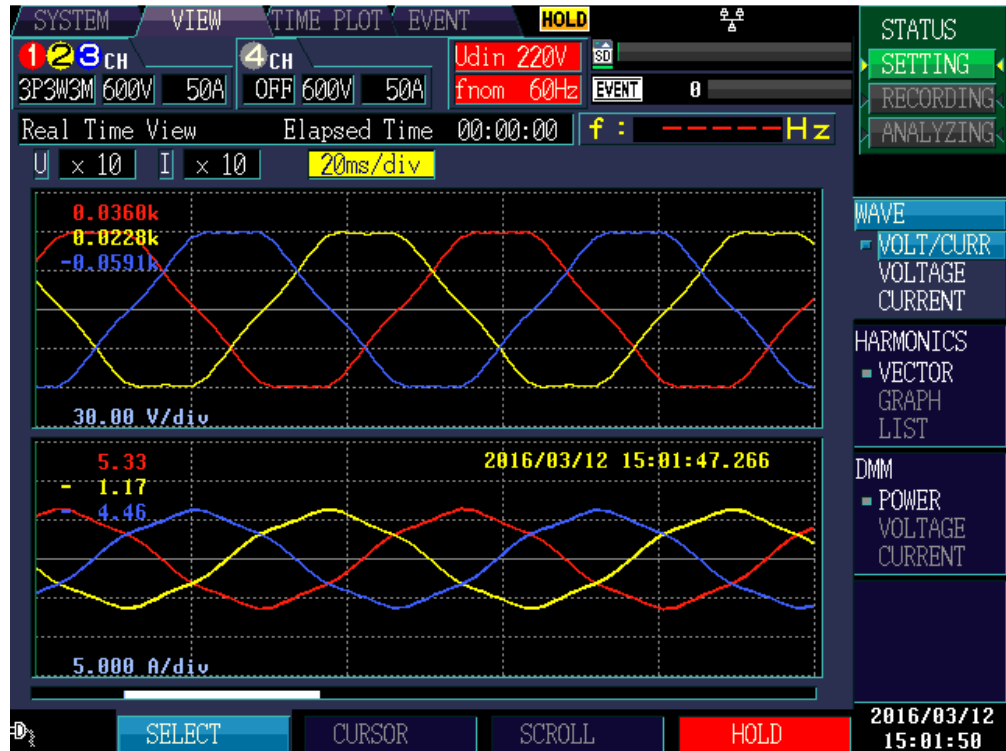


Figura 41- Formas de onda da tensão e corrente para 300 rpm

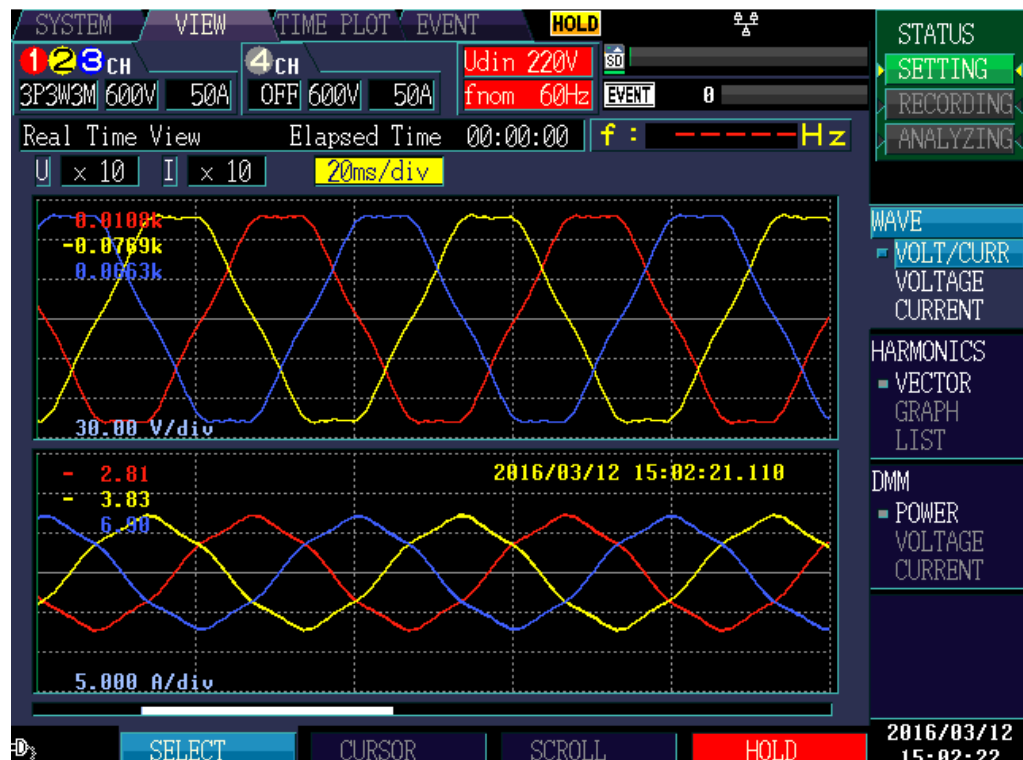


Figura 42- Formas de onda da tensão e corrente para 400 rpm

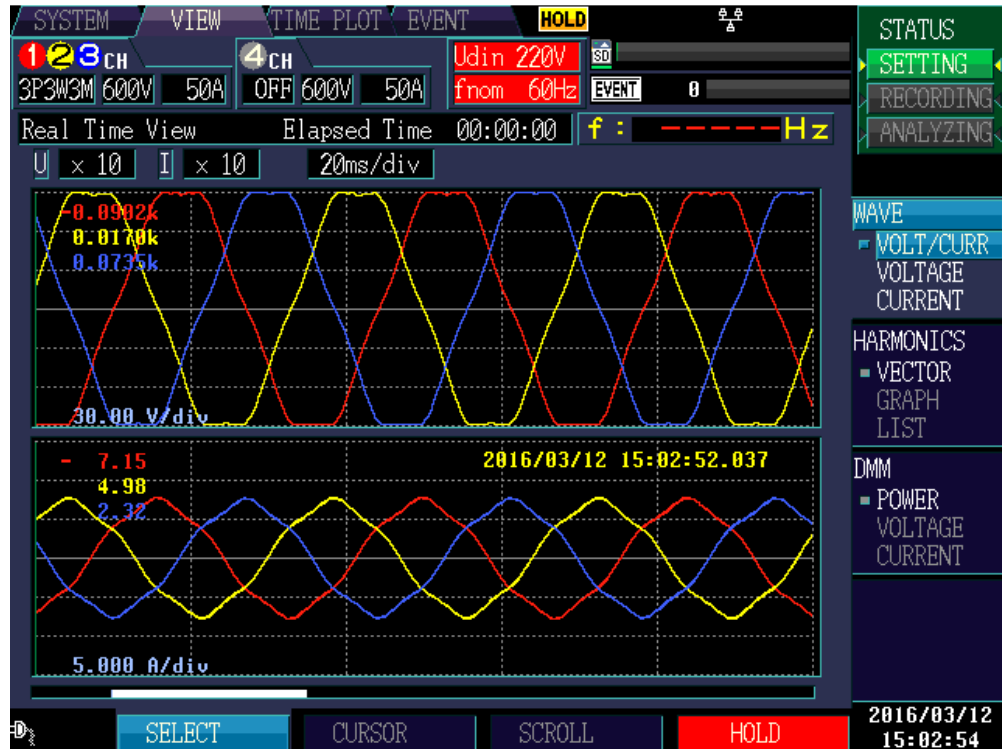


Figura 43- Formas de onda da tensão e corrente para 450 rpm

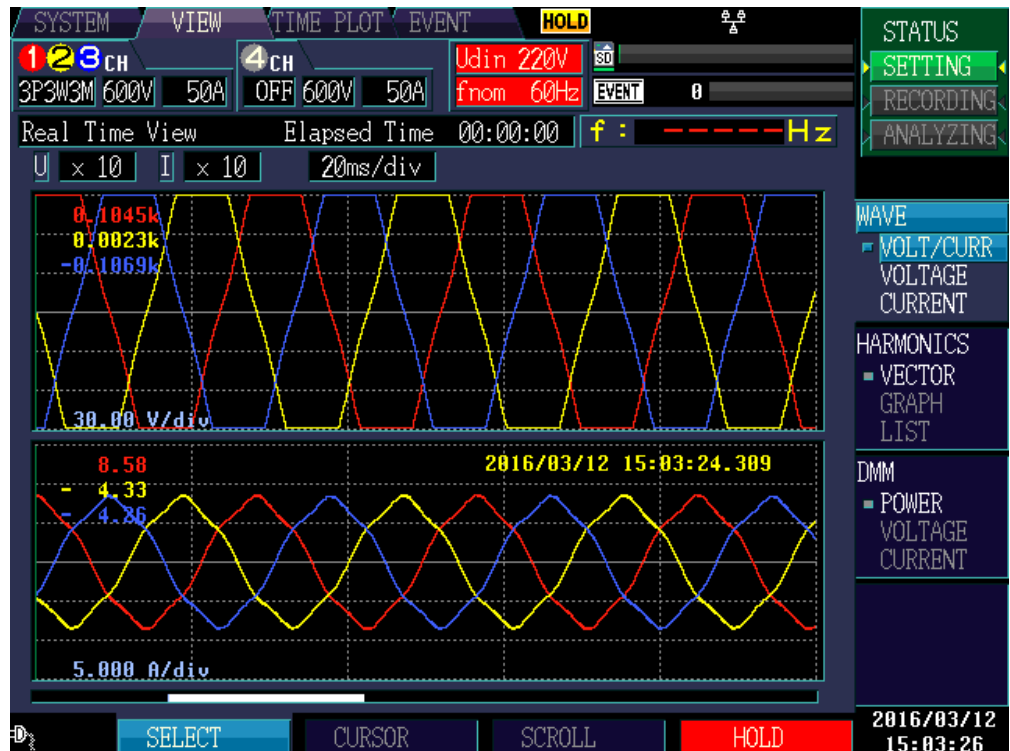


Figura 44- Formas de onda da tensão e corrente para 540 rpm

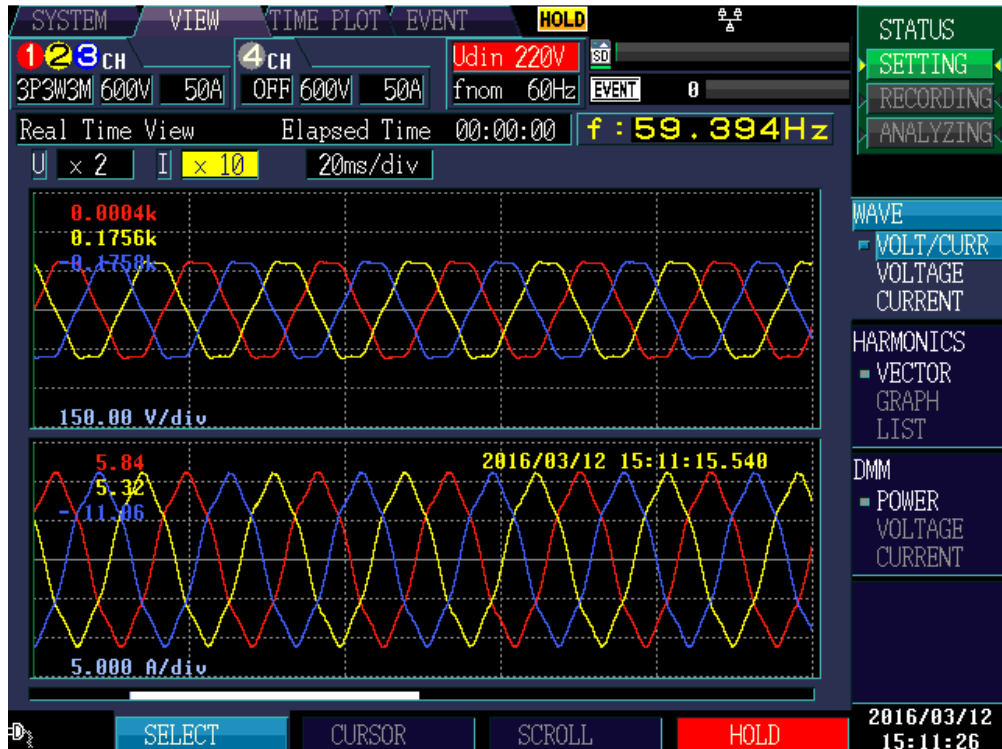


Figura 45- Formas de onda da tensão e corrente para 1800 rpm

Através das imagens fica evidente que as harmônicas geradas, implicam em um alto grau de distorção do sinal. Essa influência poderia ser pela carga, porém por ser resistiva e desta forma linear, não foi o fator que ocasionou este resultado.

Este resultado pode ser ocasionado por diversos fatores, porém neste caso, pelo fato de ter acoplado somente uma carga resistiva de baixo valor, a interferência é ocasionada pelo inversor de frequência, desta forma é necessário, em um primeiro momento, a colocação de um filtro para reduzirmos esta interferência.

6. CONCLUSÃO

Ficou comprovada a eficácia do núcleo do ferro sinterizado, na aplicação de máquinas elétricas, ratificando a viabilidade destes compósitos. De acordo com os dados coletados, a utilização do estator com ranhuras inclinadas em 10° não foi suficiente para diminuir a influência de harmônicas na máquina. Portanto parâmetros como a geometria da ranhura do estator, a relação entre ranhuras e número de polos e uma redistribuição dos enrolamentos do estator devem ser recalculados, para obter uma maior eficácia dos resultados,

A influência do inversor de frequência, sobre a máquina, é bastante significativa, pois os valores de DTH apresentados ficaram bem acima do recomendado pelas normas técnicas. Este fator também contribui para ocasionar o aquecimento da máquina, que interfere diretamente no seu rendimento e desempenho, o teste em vazio ou com valores de carga resistiva baixa. Um filtro supressor é necessário na bancada de testes, para eliminar as interferências externas.

O núcleo sinterizado de Nd-Fe-B, quanto aos resultados de simulação e desempenho, apresentou valores compatíveis a potência e tensão geradas, de uma máquina convencional de 7,5kW.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com o trabalho realizado, são sugeridos alguns pontos como:

- o desenvolvimento de protótipos de aerogeradores no segmento de 1 kW a 10 kW, com a utilização de novas configurações de ímãs e geometrias do rotor e estator, a relação entre ranhuras e número de polos e redistribuição dos enrolamentos do estator. Existe, nesta faixa de potência, um grande nicho de mercado, tornando promissor o investimento em pesquisas;
- elaborar ou adotar um procedimento de testes para geradores, desta forma podem ser realizadas comparações com outros protótipos ou equipamentos comerciais;
- reestruturar a bancada de testes, fazendo com que na mesma possam ser realizados os testes de diversos protótipos de diferentes capacidades e especificações técnicas. Enfatizando a necessidade de colocação de um filtro supressor de ruídos;
- o estudo e uso de pós metálicos microencapsulados;
- utilização e análise de peças obtidas por injeção de pós metálicos, sinterforjamento e tixoforjamento. A técnica de sinterforjamento consiste em compactar o pó em uma pré forma, alcançando uma densidade relativa em torno a 75 %, sinterizar em atmosfera inerte e, rapidamente, transferir a peça para uma prensa de forjamento, obtendo-se, assim, a forma final do produto com praticamente 100 % de densidade relativa. O tixoforjamento, ou forjamento semi-sólido, é uma nova tecnologia que permite fabricar a peça com dimensões próxima à do produto final com um só golpe, empregando pequenas forças e com propriedades mecânicas elevadas.

8. REFERÊNCIAS

ACESITA, **Aços Elétricos – Grão não Orientado**. Artigo de Circulação Interna, 1993.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil**. 2014.

BORBA, Monir G. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona trifásica com núcleo do rotor produzido a partir da metalurgia do pó e ímãs de neodímio – ferro – boro para aplicação em aerogeradores**. 2016. 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CERVA, Luciano Lohmann. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona com ímãs permanentes e núcleo sinterizado utilizada em aerogerador**. 2014. 100 p. Tese (Doutorado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CHÉDOT, L. **Contribution au Dimensionnement Electromagnetique d'une Machine Synchrone Autopilotee à Aimants Insérés**. Tese de Doutorado, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004

CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do Pó**. 4 ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001.

DIAS, Moisés de Mattos. **Construção de uma máquina síncrona de relutância rotor trifásica com de material magnético macio sinterizado**. 1999. 107 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

DIAS, Moises de Mattos.; DIAS, Arão de Mattos.; CÉZAR, José Lesina.; VERNEY, José Carlos K.; SCHAEFFER, Lírio. **Motores síncronos Trifásicos com Ímãs Permanentes**, Revista Tecnologia, v. 6, n. 2, p. 107-127. 2005.

EISSWEIN JUNIOR, Jorge Alberto Lewis. **Desenvolvimento de Compósitos Magnéticos Macios Utilizados em Núcleos de Máquinas Elétricas**. 2009. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

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

GRAY, Clifford. B. **Electrical Machines and Drive Systems**. Longman Sc & Tech, p. 343-347, 1989.

GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A Metalurgia do Pó Alternativa Econômica com Menor Impacto Ambiental**. 1 ed. Metallum Eventos Técnicos, 2009.

JAMES, B. A., WILLIAMS, G. **Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron**. Powder Metallurgy, v.22, n.2, p. 75-85, 1979.

KOSOW, Irving Lionel. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Editora Globo: 2006.

LALL, C. **Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding**, Princeton, NJ. Metal Powder Industries Federation, p.11, 1992.

LALL, C. **The Effect Sintering Temperature and Atmosphere on the Soft Magnetic Properties of P/M Materials**, Advances in Powder Metallurgy, v.3, 1992

LALL, C; BAUM L.W. High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding, **Modern Developments in P/M**. v.18, p. 363- 389, 1998.

LANDGRAF, Fernando José Gomes, PLAUT, R.L. **Efeito do Tamanho de Grão na, Permeabilidade Magnética Máxima da Liga Ferro 47,5% Níquel**, Metalurgia – ABM, v.45, n.380, p. 677-681, 1989.

LEWIS, Jorge Alberto Eisswein ,DIAS, Moisés de Mattos, CERVA, Luciano Lohmann, BARBOZA, Juliano Soares, SCHAEFFER, Lírio. **Estudo comparativo de ligas magnéticas**

através de simulação por elementos finitos. Congresso Brasileiro de Ciências dos Materiais, 2008.

MEEKER, David. **Finite Element Method Magnetism version 4.2.** Users Manual, 2015.

MULTON, Bernard. **Application des Aimants aux Machines Électriques.** Notas de Aulas. Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2005.

NASAR, Syed Abu. **Handbook of Electric Machines.** McGraw-Hill, 1987, 216p.

PAVINATTO, Eduardo Fiorini **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica.** Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ. 2005.

PEREIRA, Luiz Antônio. **Aplicação de Materiais Sinterizados em Máquinas Elétricas.** Trabalho de Publicação Interna. Depto Eng. Elétrica. PUCRS. 2000

RAMOS, Felipe Guimarães. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona trifásica com ímãs Nd-Fe-B e núcleo do estator a partir de Fe₂P sinterizado aplicado em aerogerador 1kW.** 2015. 63 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RICHARDSON, Donald V. **Rotating Electric Machinery and Transformer Technology.** Virginia-USA, Reston Publishing Company, Inc., 1982.

SCHAEFFER, Lirio; PAULETTI, Philippe; BITTENCOURT, Sérgio D.; PELEGRINI, Leandro; ITO, Diogo K.; WESCHENFELDER, Franciele. **Situação atual e perspectivas da produção de ímãs permanentes e reservas de terras raras: Brasil x Mundo.** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v.9, n4, p 309-315, 2012

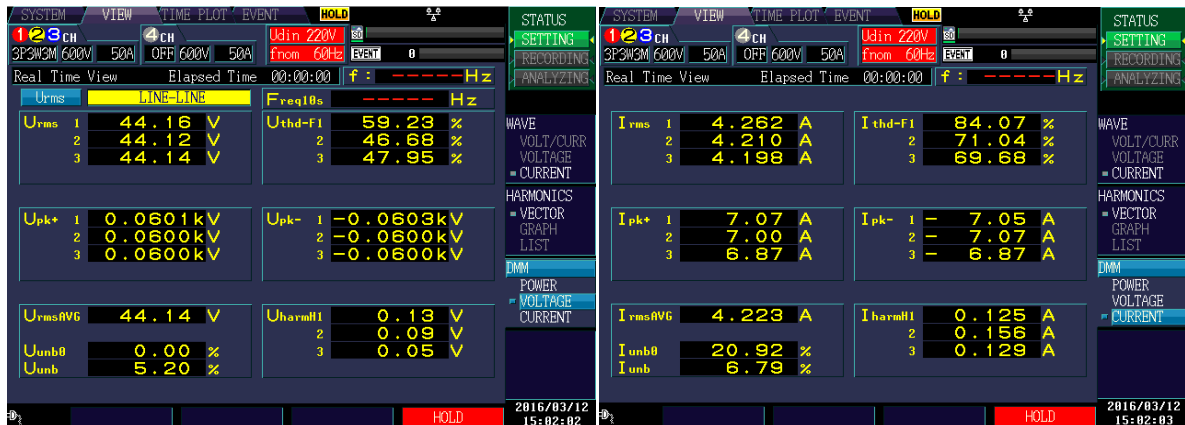
SHOKROLLAHI, H; JANKHORBAN, K. **Soft magnetic composite materials (SMCs).** Journal of Materials Processing Technology, p.1-12, 2007.

UPWIND. **Concept report on generator topologies, mechanical & electromagnetic optimization.** 2007.

VLACK, Lawrence H. Van. **Princípio de Ciência dos Materiais**, S. Paulo, Edgard Blücher Ltda,1970.

VERDUM, Valdirene. **Projeto de aerogerador com segurança inerente para aplicação urbana**. 2013. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

APÊNDICE A – RESULTADOS DE TENSÃO E CORRENTE COM CARGA



a) Valores de tensão para 300 rpm

b) Valores de corrente para 300 rpm



c) Valores de tensão para 400 rpm

d) Valores de corrente para 400 rpm



e) Valores de tensão para 450 rpm



f) Valores de corrente para 450 rpm



g) Valores de tensão para 540 rpm



h) Valores de corrente para 540 rpm



i) Valores de tensão para 1800 rpm



j) Valores de corrente para 1800 rpm

APÊNDICE B – RESULTADOS DE POTÊNCIA COM CARGA



a) Valores de potência para 300 rpm

b) Valores de Potência para 400 rpm



c) Valores de Potência para 450 rpm

d) Valores de Potência para 540 rpm



e) Valores de Potência para 1800 rpm