

JOSÉ LEANDRO CASA NOVA ALMEIDA

PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE UM GERADOR
SÍNCRONO COM ROTOR DE ÍMÃS PERMANENTES INCLINADOS
AXIALMENTE PARA MICROCENTRAIS ELÉTRICAS
A PARTIR DE MOTOR DE INDUÇÃO

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia do Câmpus de
Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção
do título de Doutor em Engenharia
Mecânica na área de Transmissão e
Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Téofilo Miguel de Souza

Guaratinguetá – SP

2010

A447p

Almeida, José Leandro Casa Nova

Proposta de uma metodologia para obtenção de um gerador síncrono com rotor de ímãs permanentes inclinados axialmente para microcentrais elétricas a partir de motor de indução / José Leandro Casa Nova Almeida – Guaratinguetá : [s.n], 2010

106f. : il.

Bibliografia: f. 88-93

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Inácio Bianchi

1. Máquinas elétricas síncronas 2. Ímãs permanentes I. Título

CDU 621.313.32

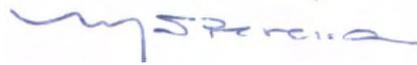
PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO COM ROTOR DE ÍMÃS PERMANENTES INCLINADOS AXIALMENTE PARA MICROCENTRAIS ELÉTRICAS A PARTIR DE MOTOR DE INDUÇÃO

JOSÉ LEANDRO CASA NOVA ALMEIDA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

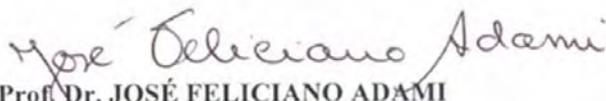
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador / Unesp-Feg



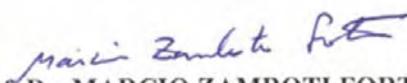
Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
Unesp-Feg



Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
Unesp-Feg



Prof. Dr. OSÍRIS CANGILIERI JUNIOR
PUC-PR



Prof. Dr. MARCIO ZAMBOTI FORTES
UFF-RJ

DADOS CURRICULARES

JOSÉ LEANDRO CASA NOVA ALMEIDA
(leandrocasanova@bol.com.br)

NASCIMENTO	11.09.1979 – MIGUEL PEREIRA / RJ
FILIAÇÃO	Mario Sérgio Campos de Almeida Maria Antônia Capute Casa Nova
1997/2002	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Severino Sombra Vassouras – RJ
2004/2007	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2007/2010	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2007/atual	Professor da Escola de Engenharia da Universidade Severino Sombra – Câmpus Vassouras – RJ.
2003/atual	Engenheiro Eletricista na Fábrica de Máquinas Bemfica – Paracambi – RJ.

De um modo especial, às minhas sobrinhas – Steffane e Vitória.
Com os seus sorrisos, me incentivaram. Espero que, no futuro,
elas usem o meu exemplo como motivação para o estudo.

Dedico este trabalho às pessoas que me ajudaram, não medindo
esforços, cujos nomes aparecem, com o devido respeito e
consideração, nos agradecimentos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço-lhe a vida, a inteligência, a família e os amigos;

Ao orientador, *Prof. Dr. Téofilo Miguel de Souza*, que jamais deixou de me incentivar. Sem sua direção, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível. Em alguns momentos, ele foi mais que um orientador, e sim, um grande exemplo;

Ao co-orientador, *Prof. Dr. Inácio Bianchi*, pela visão objetiva na orientação e na eliminação das dúvidas sobre máquinas elétricas;

Aos professores *Prof. Dr. Perrella, Prof. Dr. Petrônio, Prof. Dr. Carrocci, Prof. Dr. Oscar, Prof. Dr. Agnelo, Prof. Dr. José Luz e Prof. Dr. Pedro* os quais, ao longo do curso, fizeram a diferença, contribuindo de forma decisiva para a construção sólida de meu conhecimento e formação acadêmica;

A meus pais, *Mário Sérgio e Maria Antônia*. Apesar das dificuldades enfrentadas, sempre estimularam meus estudos, principalmente minha mãe;

À minha namorada, noiva e companheira, *Cíntia*, pela compreensão, amor e dedicação e a seu filho Caio;

Ao meu padastro, *Edson*, pela apoio, determinação e contribuição nos testes e avaliação do protótipo;

Ao meu irmão, *João Paulo*, por quem tenho e terei sempre grande admiração e orgulho;

Às minhas sobrinhas, *Steffane e Vitória*, pelo sorriso e carinho;

Às funcionárias da Biblioteca do Câmpus de Guaratinguetá, pela dedicação, presteza e, principalmente, pela vontade de ajudar. Em especial, à funcionária Ana Maria Ramos Antunes pelos livros encomendados e emprestados de outras Universidades;

Às secretárias da Pós-graduação, *Cristina, Regina, Juliana e Elisa*, e ao secretário, *Sidney*, pela dedicação e alegria no atendimento;

À WEG S/A, pela gentileza de ter cedido os dados construtivos do motor adquirido pela UNESP;

Aos funcionários da fábrica de máquinas Bemfica LTDA, Guaraci Antônio Leite, Luis Geraldo Souza e Silva, Rogério, Ernane, Sebastião Lili, João Mário, Edmundo, Hélio, Jhones, Paulo César Barbosa, pelo apoio nas adaptações realizadas na oficina da fábrica. Sem a especial ajuda deles não teria construído o protótipo;

Ao Sebastião Lili, pelos desenhos. Sempre esteve pronto a colaborar sem hesitação;

Ao amigo Guaraci Antonio Leite, pelas instruções e pela construção do protótipo. Seus conselhos fizeram a diferença;

Ao Rogério, pela usinagem, fresamento e seu empenho em fazer o melhor;

Ao Geraldo Luis Silva e Souza, pelo apoio no projeto mecânico;

Ao Paulo César Barbosa, pelo auxílio na compra dos materiais;

Ao Prof. Carlos Y. Shigue, pelo empréstimo do medidor de remanência do DEMAR – USP – Câmpus Lorena;

Ao Carlinhos, funcionário da Universidade Severino Sombra, pela ajuda;

Ao Prof. Falconi, pelas traduções;

Ao amigo e companheiro de viagem para a Universidade, Prof. José Thomaz de Carvalho, pelos conselhos;

À fábrica de máquinas Bemfica LTDA, especialmente ao engenheiro Carlo Costa, pela colaboração na liberação, no horário de trabalho, a fim de que eu pudesse fazer o Programa de Pós-Graduação, bem como à sua esposa Celeste, pelas palavras atenciosas.

"Uma palavra bem pronunciada pode economizar não só cem palavras, mas também cem pensamentos." (Henri Poincaré)

"Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina." (Cora Coralina)

ALMEIDA, JOSÉ LEANDRO C. N. **Proposta de uma Metodologia para obtenção de um Gerador Síncrono com Rotor de Ímãs Permanentes Inclinados Axialmente para Microcentrais Elétricas a partir de Motor de Indução**. 2010. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

RESUMO

As máquinas síncronas de ímãs permanentes têm a vantagem de não consumir energia para a criação do campo magnético no rotor. O propósito específico desta Tese é o projeto, a construção e a avaliação de uma máquina com grande número de polos, de enrolamentos concentrados, com ímãs permanentes inseridos no interior do rotor, com duas formas geométricas diferentes: um com ímãs alinhados e a outra com ímãs inclinados axialmente. As justificativas para este estudo foram a possibilidade de eliminação de multiplicadores mecânicos de velocidade e sistemas auxiliares de excitação em centrais geradoras de energia.

O projeto usou um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo de 250W de 12 polos. Partindo dos próprios dados construtivos do estator, calculou-se a densidade de fluxo magnético, especificando os ímãs permanentes de neodímio.

No desenvolvimento foi construído um novo rotor modular e simples. Posteriormente, a máquina foi avaliada em laboratório com o objetivo de verificar a quantidade e a qualidade da energia com a máquina atuando como gerador.

Por último, os resultados encontrados na avaliação da máquina funcionando como gerador com ímãs alinhados revelaram distorção harmônica total (DHT) 16%, capacidade de geração 475W a 221V – 60Hz e como aspecto desfavorável o alto torque de travamento. Com ímãs inclinados, DHT de 7 a 8%, capacidade de geração de 236W a 195V – 60Hz e baixo torque de travamento.

Este trabalho mostra que os ímãs inclinados modularmente são uma opção de máquinas elétricas com satisfatório desempenho da máquina como gerador de energia

com razoável qualidade no contexto de geração distribuída de pequena potência. Além das condições técnicas têm-se o baixo custo e a manutenção reduzida do gerador com ímãs inclinados em relação aos geradores síncronos convencionais.

PALAVRAS-CHAVE: Máquina síncrona de ímãs permanentes, inclinação dos ímãs permanentes, método analítico.

ALMEIDA, JOSÉ LEANDRO C. N. **Proposal of a Methodology for the Development of a Synchronous Generator with Skewed Permanent Magnets Rotor for Micro Electrical Powerplants.** 2010. 106 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

ABSTRACT

Synchronous machines of permanent magnets present the advantage of no power consumption for the creation of the magnetic field in the rotor. The specific purpose of this thesis is the project, its construction and the evaluation of a multi-pole of concentrated coils with permanent magnets inserted in the rotor by two different geometrical forms: aligned and skewed magnets. The vindications for this study were the possibility of eliminating both the mechanical speed reducers and the excitation energy systems in electrical powerplants.

The project used a three-phase induction motor (squirrel cage rotor type) of 250W and 12 poles. Starting from the original stator constructive data, we proceeded the calculi of the magnetic flux density to determine the remanent flux of the neodymium permanent magnets.

In the development of the work, a new simple and modular rotor was constructed. Subsequently, the machine was evaluated in a laboratory with the purpose of checking the quantity and quality of energy produced operating as a generator.

The results obtained in the evaluation of the motor operating as a generator equipped with aligned magnets were 16% of total harmonic distortion (THD), with a generating capacity of 475W at 221V – 60 Hz, though with an adverse aspect of needing a high inertial torque (cogging torque). The machine working with skewed magnets produced 7 and 8% of total harmonic distortion (THD), with a generating capacity of 236W at 195V – 60 Hz and a low cogging torque.

This work demonstrated that the modular skewed magnet is an option of electrical machines presenting satisfactory performance as a generator with a reasonable quality in the context of small distributed power generation. Besides the technical conditions, it should also be considered the low cost and reduced maintenance of skewed magnets in relation to the conventional synchronous generators.

KEYWORDS: Electrical machine, skewed permanent magnet machine, neodymium

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configurações para a redução do torque de travamento com (a) inclinação dos ímãs (b) diferentes comprimento de arco de circunferência dos ímãs (c) geometria do dente da ranhura do estator (d) desvio rotacional dos ímãs permanentes – Fonte: Bianchi (2002)	26
Figura 2 – Construção modular do rotor com ímãs na superfície – Fonte: Elosegui <i>et al</i> (2007).....	27
Figura 3 – Classificação básica das máquinas de ímãs permanentes – Fonte: Gieras <i>et al</i> (1997); Hendershot e Miller (1994)	33
Figura 4 – Vista em corte dos ímãs permanentes na superfície do rotor – Fonte: Gieras <i>et al</i> , 1997 e Hendershot e Miller (1994).....	34
Figura 5 – Vista em corte transversal dos ímãs permanentes no interior do rotor Fonte: Gieras <i>et al</i> (1997).....	35
Figura 6 – Vista em corte transversal dos ímãs permanentes embutidos no interior do rotor – distribuído simetricamente – Fonte: Gieras <i>et al</i> (1997)	35
Figura 7 – Vista em corte transversal dos ímãs permanentes embutidos no interior do rotor – distribuído assimetricamente – Fonte: Gieras <i>et al</i> (1997)	36
Figura 8 – Curva de magnetização: (1) laço de histerese, (2) curva original	37
Figura 9 – Rotor de polos salientes de um motor de relutância – Fonte: Ferraz (2002)	41
Figura 10 – Torque resultante para máquinas síncronas de polos salientes com $X_d > X_q$	41
Figura 11 – Bobinado de passo inteiro (a) e bobinado de passo fracionário (b)	42
Figura 12 – Rotor com os ímãs inclinados	44
Figura 13 – Fluxograma para a especificação dos ímãs.....	45
Figura 14 – Vista do estator e do rotor de 12 polos	46
Figura 15 – Vista planificada do esquema de enrolamento do motor de 12 polos.....	47
Figura 16 – Curva de magnetização típica do neodímio e seu ponto de operação.....	53
Figura 17 – Lacuna (entreferro) entre o estator e os ímãs do rotor.....	54
Figura 18 – Distribuição dos 12 polos de ímãs no rotor.....	57

Figura 19 – Rotor com os ímãs fixados com inclinação axial	59
Figura 20 – Relação dos números de módulos com o torque de travamento – Fonte: Bianchi (2002).....	61
Figura 21 – Perdas no ferro para diversos tipos de aço para fins elétricos (Perda anômala “Pa”, Perda por correntes parasitas “Pp”, Perda por histerese “Ph”) – Fonte: Landgraf (2008).....	63
Figura 22 – Projeto detalhado do eixo.....	64
Figura 23 – Desenho dos blocos do rotor sobre o eixo	65
Figura 24 – Eixo e rotor usinados	65
Figura 25 – Fresa em marcha (vista lateral e radial)	66
Figura 26 – Rotor com os canais alinhados	66
Figura 27 – Rotor com os canais inclinados	67
Figura 28 – Processo de fixação dos ímãs nos blocos.....	67
Figura 29 – Verificação do sentido de magnetização com a bússola.....	67
Figura 30 – Blocos prontos	68
Figura 31 – Protótipo com os ímãs alinhados	68
Figura 32 – Protótipo com os ímãs inclinados	68
Figura 33 – Montagem da bancada de teste do laboratório de máquinas elétricas.....	70
Figura 34 – Rotação <i>versus</i> tensão: sem carga para ímãs alinhados.....	71
Figura 35 – Formas de onda das tensões nas três fases do gerador com ímãs alinhados sem carga	72
Figura 36 – Formas de onda das tensões nas três fases do gerador com ímãs alinhados com carga de 475W	73
Figura 37 – Rotação <i>versus</i> tensão: sem carga para ímãs inclinados.....	73
Figura 38 – Formas das ondas das tensões do gerador com ímãs inclinados com fechamento das bobinas em triângulo sem carga.....	74
Figura 39 – Formas das ondas das tensões e correntes do gerador com ímãs inclinados com carga e com bobinas fechadas em triângulo.....	74
Figura 40 – Formas das ondas das tensões do gerador com ímãs inclinados com fechamento das bobinas em estrela sem carga.....	75

Figura 41 – Formas das ondas das tensões e correntes do gerador com ímãs inclinados com carga e com bobinas fechadas em estrela	75
Figura 42 – Curva tensão <i>versus</i> fator de potência do gerador com rotor de ímãs.....	78
Figura 43 – Análise comparativa entre as etapas com retorno de investimento por valor presente líquido	84
Figura 44 – Aparelho Lakeshore 421 – Fonte: Manual gaussmeter Lakeshore 421	95
Figura 45 – Ponta de prova – Fonte: Manual gaussmeter Lakeshore 421	95
Figura 46 – Simuladora de cargas na ponta do eixo do motor	97
Figura 47 – Torque <i>versus</i> corrente.....	99
Figura 48 – Rendimento <i>versus</i> torque.....	99
Figura 49 – Fator de potência <i>versus</i> torque.....	100
Figura 50 – Curva extrapolada com torque constante (rotor com ímãs inclinados) ...	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades básicas dos principais ímãs e do aço silício	37
Tabela 2 – Especificações técnicas do motor	46
Tabela 3 – Especificações do enrolamento do estator.....	47
Tabela 4 – Cálculo da densidade de fluxo do estator por polo e por fase	48
Tabela 5 – Especificações dos ímãs de neodímio	52
Tabela 6 – Determinação do entreferro	55
Tabela 7 – Variação do entreferro sobre os ímãs.....	56
Tabela 8 – Comparação entre ângulos de inclinação dos ímãs.....	60
Tabela 9 – Número de períodos da onda de torque de travamento.....	62
Tabela 10 – Ensaio do gerador com os ímãs alinhados e com carga	72
Tabela 11 – Ensaio do gerador com os ímãs inclinados sob carga em triângulo	76
Tabela 12 – Ensaio do gerador com carga resistiva em triângulo	77
Tabela 13 – Ensaio do gerador com carga indutiva em triângulo.....	77
Tabela 14 – Ensaio do gerador com carga capacitiva em triângulo.....	78
Tabela 15 – Custo de fabricação do protótipo	80
Tabela 16 – Custo dos geradores síncronos e sistemas auxiliares	81
Tabela 17 – Receita anual pela energia gerada e o retorno de investimento.....	82
Tabela 18 – Retorno de investimento pela análise por valor presente líquido.....	83
Tabela 19 – Faixas de ajustes e medição do campo magnético pelo aparelho Lakeshore	96
Tabela 20 – Resultado do ensaio do motor com rotor gaiola de esquilo	101
Tabela 21 – Resultado do ensaio do motor com rotor com ímãs inclinados.....	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	- Corrente alternada
B _r	- Remanência
cv	- Cavalo-vapor
CC	- Corrente contínua
H _c	- Força coercitiva
PC	- Coeficiente de permeância
PM	- Ímã permanente
VPL	- Valor presente líquido
UNESP	- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
IEE	- Instituto de Eletrotécnica e Energia
UFF	- Universidade Federal Fluminense
USP	- Universidade de São Paulo
ONS	- Operador Nacional do Sistema
SIN	- Sistema Interligado Nacional
PWM	- Modulação por largura de pulsos
IEEE	- Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
DHT	- Distorção harmônica total

LISTA DE SÍMBOLOS

A_g	Área do corte transversal por polo do entreferro	m^2
A_m	Área do corte transversal por polo do ímã	m^2
B_e	Remanência ou Indução magnética do estator	Wb/m^2
B_m	Remanência ou Indução magnética do ímãs	Wb/m^2
C_m	Comprimento total dos ímã por polo	m
C_ϕ	Fator de fluxo concentrado	<i>adimensional</i>
$D_{int\ est}$	Diâmetro interno do estator	m
e	Espessura do ímã	m
E_A	Tensão induzida pelo fluxo de excitação do rotor	V
f	Frequência	Hz
f_d	Fator de distribuição	<i>adimensional</i>
f_e	Fator de enrolamento ou passo	<i>adimensional</i>
FP	Fator de potência	<i>adimensional</i>
g	Entreferro	<i>adimensional</i>
g_{ferro}	Entreferro entre o estator e as bordas de ferro do rotor	m
H_c	Força Coercitiva	A/m
I	Corrente	A
n	Rotação	<i>rpm</i>
N_f	Número de espiras por fase	<i>adimensional</i>
N_t	Número de espiras totais	<i>adimensional</i>
N_g	Número de espiras por grupo	<i>adimensional</i>
L	Comprimento do estator	m
$L_{int\ est}$	Comprimento interno do estator	m
L_m	Largura do ímã	m
p	Polos	<i>adimensional</i>
P	Potência	W
q	Número de ranhuras por polo por fase	<i>adimensional</i>
Q	Ranhuras do estator	<i>adimensional</i>

R_A	Resistência de armadura	Ω
r_p	Passo polar em número de ranhuras	m
T_d	Torque resultante	$N.m$
T_{drel}	Torque de relutância	$N.m$
T_{dsyn}	Torque fundamental	$N.m$
T_e	Temperatura de trabalho do ímã	$^{\circ}C$
V_{ϕ}	Tensão aplicada aos terminais da máquina	V
X_d	Reatância de eixo direto	Ω
X_q	Reatância de eixo em quadratura	Ω
Y_p	Passo polar	m

LISTA DE SÍMBOLOS – LETRAS GREGAS

α	Coefficiente do arco polar	<i>adimensional</i>
β	Passo das ranhuras	<i>adimensional</i>
η	Rendimento	<i>adimensional</i>
ω_m	Velocidade angular	<i>rad/s</i>
δ	Ângulo de carga	<i>graus</i>
Φ	Densidade de fluxo do estator por polo por fase	<i>Wb</i>
Φ_m	Densidade de fluxo por polo do ímã	<i>Wb</i>
ρ	Resistividade	<i>$\Omega.m$</i>
$\theta_{inclinação}$	Ângulo de inclinação dos blocos dos ímãs	<i>graus</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	24
1.1 BREVE HISTÓRICO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS DE ÍMÃS PERMANENTES	24
1.2 MOTIVAÇÃO	27
1.3 JUSTIFICATIVAS	28
1.4 OBJETIVO DA PESQUISA.....	29
1.4.1 Objetivo geral	29
1.4.2 Objetivo específico	29
1.5 ESTRUTURA DA TESE.....	29
2. CONCEITOS PRELIMINARES DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	31
2.1 O ESTADO DA ARTE: AS MÁQUINAS DE ÍMÃS PERMANENTES	31
2.1.1 A classificação básica das máquinas de ímãs permanentes	32
2.1.2 As máquinas síncronas de ímãs permanentes	34
2.1.2.1 Superfície	34
2.1.2.2 Interior	34
2.1.2.3 Ímã oculto no rotor simetricamente	35
2.1.2.4 Ímã oculto no rotor assimetricamente	35
2.1.3 Aplicações	36
2.2 MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	36
2.2.1 Conceitos básicos sobre magnetismo	36
2.2.2 As ferritas	38
2.2.3 O neodímio	38
2.2.4 O alnico	39
2.2.5 O samário-cobalto.....	39
2.3 EFEITOS INDESEJÁVEIS NA TENSÃO E NO TORQUE PRODUZIDOS NAS MÁQUINAS SÍNCRONAS	39
2.3.1 A teoria das duas reatâncias de eixo direto e em quadratura	39

2.3.2 O efeito do enrolamento sobre a tensão e o torque	42
2.3.3 O efeito da inclinação dos ímãs para a redução dos harmônicos na tensão e no torque de travamento	43
3. METODOLOGIA PARA O PROJETO E A CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA DE ÍMÃS PERMANENTES NO INTERIOR DO ROTOR	44
3.1 CONDIÇÃO INICIAL PARA O PROJETO	44
3.2 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA O PROJETO	46
3.2.1 Cálculos da densidade de fluxo do estator	48
3.2.2 Determinação das dimensões e do tipo de ímãs permanentes	51
3.2.3 Entreferro	54
3.2.4 O ângulo de inclinação.....	56
3.3 A CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....	62
3.3.1 Escolha do material para o rotor.....	62
3.3.2 Usinagem, fresamento e fixação dos ímãs no rotor.....	63
3.3.2.1 Confecção do eixo.....	63
3.3.2.2 Confecção dos blocos que constituem o suporte dos ímãs no rotor	65
3.3.2.3 Abertura dos canais para a fixação dos ímãs no tambor do rotor.....	66
3.3.2.4 Deslocamento angular dos canais	66
3.3.2.5 Fixação dos ímãs	67
3.3.2.6 Montagem	68
4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROTÓTIPO	69
4.1 A MÁQUINA FUNCIONANDO COMO GERADOR.....	69
4.1.1 Ensaio como gerador	69
4.1.2 Os materiais para ensaio como gerador	70
4.1.3 Levantamento dos dados experimentais do gerador.....	70
4.1.3.1 Gerador com ímãs alinhados	71
4.1.3.2 Gerador com ímãs inclinados	73
4.1.3.3 A análise do gerador com ímãs inclinados para cargas lineares e não-lineares sob o aspecto de regulação de tensão.....	76
4.1.4 Resultados obtidos com o gerador.....	79

5. ANÁLISE ECONÔMICA DO PROTÓTIPO COM RELAÇÃO AOS GERADORES SÍNCRONOS CONVENCIONAIS	80
5.1 O CUSTO ESTIMADO DO PROTÓTIPO E DOS OUTROS DOIS GERADORES SÍNCRONOS.....	80
5.2 A ENERGIA COMERCIALIZADA E O RETORNO DO INVESTIMENTO ...	81
5.3 RESULTADOS DO RETORNO DE INVESTIMENTO	84
6. CONCLUSÕES.....	85
7. PESQUISAS FUTURAS.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
APÊNDICE A – DOCUMENTO COM DADOS FORNECIDOS PELA WEG ...	94
APÊNDICE B – MEDIDOR DE REMANÊNCIA	95
APÊNDICE C – ENSAIOS DO PROTÓTIPO COMO MOTOR.....	97
APÊNDICE D – ARTIGO E SEUS RESPECTIVOS ACEITES	104

1. INTRODUÇÃO

1.1 BREVE HISTÓRICO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS DE ÍMÃS PERMANENTES

Os motores de indução com rotor gaiola de esquilo têm sido os mais populares motores elétricos com um aumento expressivo ao longo do último século. Devido aos recentes progressos no campo da eletrônica de potência, a sua aplicação a acionamentos elétricos tem aumentado, possibilitando o uso desses motores em um grande leque de velocidades mantendo boa eficiência. As principais vantagens dos motores de indução de gaiola são: construção simples, fácil manutenção, sem comutação no rotor por anéis e escovas, preço baixo e alta confiabilidade.

Sob alguns aspectos o uso de máquinas de corrente alternada de ímãs permanentes tornou-se uma opção mais atraente do que máquinas de indução e os preços desses ímãs de terras raras também estão caindo, beneficiando a sua popularidade (GIERAS *et al*, 1997). Os ímãs permanentes de terras raras podem, não apenas, melhorar o desempenho, mas também a razão entre a potência de saída e o tamanho físico, o desempenho dinâmico, a redução nas perdas no ferro, o aumento no fator de potência e a confiabilidade (CHABBAN, 1994).

A utilização de ímãs permanentes na construção de máquinas elétricas traz os seguintes benefícios:

- não é absorvida energia elétrica para a criação do campo magnético, assim, não há perdas por excitação, o que significa aumento substancial na eficiência;
- maior torque ou potência de saída por volume do que quando se usam máquinas síncronas convencionais com excitação independente;
- simplificação da construção e da manutenção;
- redução de preços para alguns tipos de máquinas.

As máquinas de ímãs permanentes têm crescente popularidade graças a uma progressão de geometrias e projetos inovadores (STUMBERGER *et al*, 2006;

STUMBERGER *et al*, 2007; ENOKIZONO *et al*, 2007). Essas máquinas têm-se mostrado mais adequadas para o controle de posição, geração de energia para pequenas centrais descentralizadas, motores de alto rendimento aplicados em unidades industriais devido à sua excelente capacidade dinâmica, redução das perdas e alta relação torque/peso (HANITSCH, 1989). Os progressos registrados no domínio dos novos materiais magnéticos reincentivaram um grande desenvolvimento das máquinas síncronas a ímãs permanentes. Com os modernos materiais à base de terras raras, entre os quais se destacam os de samário-cobalto e os de neodímio-ferro-boro, o fluxo de excitação pode ser criado com grande coercitividade, através de magnetos com dimensão pequena. O elevado custo inicial dos ímãs permanentes de neodímio é um fator crucial na sua aplicação, mas pode ser ressarcido rapidamente em função do seu alto rendimento, levando-se em conta a economia de energia (ALNAEMI *et al*, 2006).

Jahns (1996) apresenta uma revisão no tipo de acionamento e técnicas na fabricação de motores de ímãs permanentes para a mitigação do torque pulsante, flutuações de torque e torque de travamento¹ e é relatada uma tendência no uso de formas de onda trapezoidal para o acionamento de motores com os ímãs permanentes dispostos sobre a superfície do rotor com os enrolamentos concentrados e no uso da forma de onda senoidal para enrolamentos distribuídos, finalmente, indicam-se as técnicas de fabricação como a melhor solução, sempre que possível, para a eliminação de torques indesejáveis, ao invés de depender do tipo de acionamento. Recentemente, os enrolamentos concentrados estão em evidência devido a menor perda no cobre e tamanho reduzido em comparação aos enrolamentos distribuídos (YAMADA, 2007).

Com relação a inclinação das barras de alumínio para os motores de indução com rotor gaiola de esquilo atuando como geradores, com excitação através de capacitores, Sawetsakulanond (2007) analisa a influência da variação do ângulo de inclinação das barras da gaiola de esquilo com 0°, 5° e 10° sobre os parâmetros elétricos em ensaios experimentais, respectivamente, 9%, 4,7% e 3,9% de distorção harmônica total (DHT) na forma de onda gerada sem carga, esses resultados demonstram que inclinando-se as barras de alumínio ocorre a redução do índice de DHT de tensão.

¹ Torque de travamento – Traduzido da língua inglesa de *cogging* torque, este fenômeno é semelhante ao eixo travado de um motor de passo.

Na máquina de ímãs permanentes distribuídos na superfície do rotor, Islam *et al* (2009) faz a correlação entre o efeito da combinação entre as ranhuras e os números de polos do rotor versus o ângulo de inclinação dos blocos de ímãs. O ótimo ângulo de inclinação dos ímãs permanentes, em formato de arco, é calculado segundo fórmulas analíticas (BIANCHI, 2002) e a construção, feita pelo fatiamento do rotor em três partes iguais, com o objetivo de facilitar a fabricação, sem interferir no desempenho. As análises, em elementos finitos, abordaram outras três técnicas para a mitigação do torque de travamento, sendo realizada a construção de quatro diferentes configurações contemplando além do ângulo de inclinação axial dos ímãs permanentes, diferentes comprimento de arco de circunferência para ímãs inseridos na superfície do mesmo rotor, a geometria do dente da ranhura do estator, e o desvio rotacional dos ímãs permanentes sobre a superfície do rotor ocasionando um efeito similar à inclinação, conforme Figura 1.

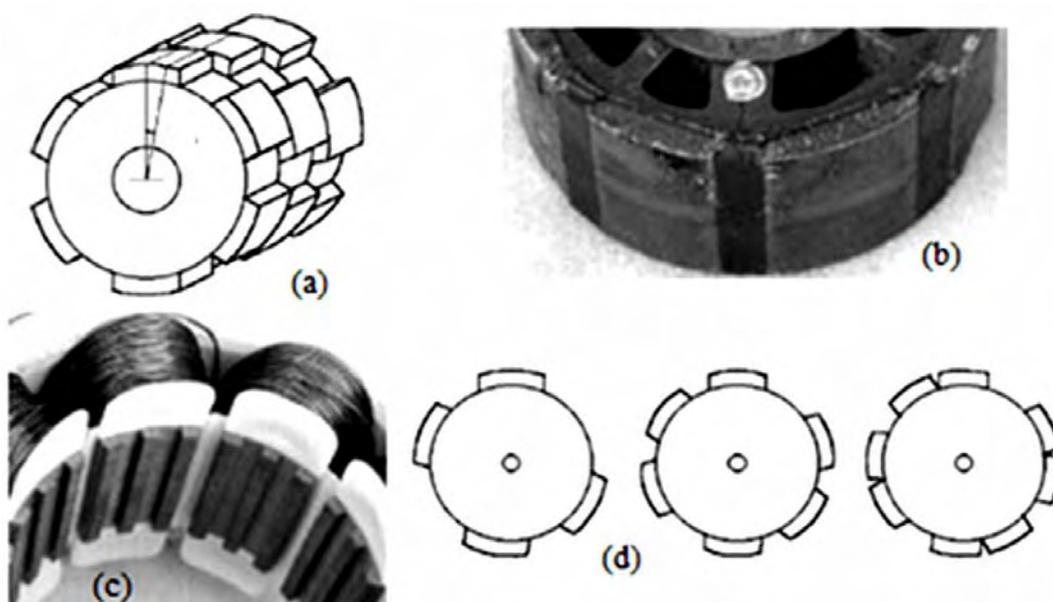


Figura 1 – Configurações para a redução do torque de travamento com (a) inclinação dos ímãs (b) diferentes comprimento de arco de circunferência dos ímãs (c) geometria do dente da ranhura do estator (d) desvio rotacional dos ímãs permanentes – Fonte: Bianchi (2002)

A Figura 2 apresenta uma máquina síncrona de relutância com ímãs permanentes de neodímio, colados na superfície do rotor de construção modular por intermédio do fatiamento do rotor em três partes iguais, possibilitando a inclinação dos ímãs e a redução do seu custo. Foi construído, portanto, um novo rotor, mantendo os dados construtivos de estator de um motor assíncrono de quatro polos e potência de 750W. O método analítico, desenvolvido por Elosegui (2007), especifica os ímãs permanentes, mas não é abordado o ângulo de inclinação dos ímãs permanentes.



Figura 2 – Construção modular do rotor com ímãs na superfície – Fonte: Elosegui *et al* (2007)

Os resultados satisfatórios de Bianchi (2002) e Elosegui (2007), sinalizam a possibilidade para o desenvolvimento de um modelo analítico para a especificação dos ímãs permanentes retangulares, abrangendo a técnica de inclinação axial dos ímãs permanentes, com boa probabilidade de sucesso.

1.2 MOTIVAÇÃO

De acordo com trabalho realizado anteriormente (ALMEIDA, 2007) no qual se fez avaliação do desempenho de uma microcentral hidrelétrica do Centro de Energias Renováveis, no câmpus da UNESP em Guaratinguetá, os resultados revelaram uma capacidade de geração de energia de boa qualidade, menores, contudo, 2,7 a 3,7 vezes do que os cálculos teóricos previam. Concluiu-se que o problema é justificado pelo fato do baixo rendimento da turbina, do gerador e do acoplamento por polias e correias entre a turbina Pelton e o gerador. Esse último equipamento é confeccionado

artesanalmente com seu rotor de ímãs permanentes de ferrita, sendo uma máquina de baixo rendimento.

Segundo Guo *et al* (2001), os pequenos motores elétricos monofásicos de corrente alternada de ímãs permanentes aplicados em acionamentos domésticos, em geral, apresentam baixa eficiência entre 30 e 50 %, e seus estudos apresentam uma máquina de alto desempenho com os custos de manufatura reduzidos, isto leva a crer que existe a possibilidade de se desenvolver um gerador melhor do que foi utilizado nos estudos anteriormente. Nesse contexto, os estudos motivaram o desenvolvimento de um gerador de bom rendimento e boa relação potência/peso, com o objetivo geral do aumento da capacidade de geração das microcentrais hidrelétricas onde se tenham pequenos potenciais tais como pequenas quedas ou baixa vazão d'água em riachos. Podendo-se estender o uso deste tipo de máquina em diversas outras aplicações, tais como parques eólicos de pequeno porte e grupos geradores com motores a combustão.

1.3 JUSTIFICATIVAS

O estudo consistirá na obtenção de um gerador síncrono de 12 polos a partir de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo e para tal é construído um novo rotor com ímãs permanentes.

A aplicação do gerador com grande número de pólos permitirá a eliminação do multiplicador de rotação para o acoplamento entre a turbina e o gerador, com a intenção de aumentar o rendimento global nas micro centrais hidrelétricas e nas estações de geração de energia eólica.

Os geradores de rotor com ímãs permanentes têm um fluxo magnético fixo, constante e sem escovas, portanto, sua escolha é justificada pela eliminação dos sistemas de excitação e conseqüentemente a redução na manutenção. Segundo Eskander (2002) um outro benefício adquirido pelo uso dos geradores de rotor com ímãs permanentes é o custo adequado para a sua aquisição.

1.4 OBJETIVO DA PESQUISA

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral consistirá em converter um motor de indução trifásico gaiola de esquilo, 12 polos e 250W ($\frac{1}{3}$ CV), numa máquina síncrona com um novo rotor recoberto com ímãs permanentes de neodímio.

1.4.2 Objetivo específico

Primeiramente apresentar uma revisão sobre máquinas de ímãs permanentes, principalmente as máquinas síncronas de ímãs permanentes. Posteriormente, os formulários e a metodologia para a realização do projeto de modificação do motor de indução trifásico. É dada atenção especial para a construção do protótipo como os materiais usados e a tecnologia aplicada para facilitar a montagem. Por último, o protótipo é avaliado experimentalmente no laboratório e é feita uma análise econômica preliminar do empreendimento.

Pretende-se realizar um projeto (método analítico) sem auxílio de ferramentas computacionais avançadas, e a construção simplificada e modular com duas formas geométricas para o rotor, um com blocos de ímãs permanentes alinhados e outro com os blocos de ímãs inclinados axialmente.

Com a configuração descrita, almeja-se identificar e quantificar a influência da inclinação dos ímãs inseridos no interior do rotor para enrolamentos concentrados numa máquina com grande número de polos.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

O objetivo do capítulo 2 é apresentar uma revisão bibliográfica sobre máquinas de ímãs permanentes. Esses fundamentos revisam os conceitos sobre as máquinas síncronas de ímãs permanentes, e apresentam uma abordagem geral sobre máquinas de ímãs permanentes como classificação, configurações, tipos de máquinas, descrição dos

tipos de máquinas síncronas e aplicações. O capítulo também apresenta os materiais magnéticos mais usados em máquinas elétricas como ferrita, neodímio, alnico e samário-cobalto. Por último, faz-se uma introdução sobre os efeitos indesejáveis na tensão e no torque, produzidos nas máquinas síncronas, advindos da forma construtiva do tambor do rotor e do tipo de enrolamento empregado no estator.

O capítulo 3 divide-se no projeto e na construção do protótipo. No projeto, toda a metodologia é apresentada com formulários analíticos, citações, delimitações, gráficos, tabelas e as razões técnicas pelas quais foram decididos os caminhos pela escolha da construção de duas configurações para rotores com ímãs permanentes com fluxo radial, inseridos no interior e com os blocos de ímãs alinhados e inclinados axialmente. É apresentado o processo de fabricação do protótipo. O procedimento aplicado visa estender a construção dessa máquina, no futuro, em larga escala e a custos adequados para os empreendedores.

O capítulo 4 trata da avaliação experimental do protótipo em laboratório. Na avaliação do protótipo atuando como gerador, realizaram-se ensaios dinâmicos e estáticos, descrevendo o procedimento de avaliação e os materiais utilizados para cada etapa. Sobre a máquina atuando como gerador analisou-se a qualidade e a quantidade da energia gerada, com os blocos de ímãs alinhados e inclinados, medições do nível de distorções harmônicas sem e com cargas lineares e não-lineares, nos fechamentos das bobinas em estrela e em triângulo.

O capítulo 5 destina-se à avaliação econômica para viabilizar a fabricação do protótipo com os materiais, a mão de obra e o retorno de investimento pela energia gerada em relação a outros dois geradores síncronos convencionais de diferentes fabricantes. Por fim, apresenta-se a conclusão no capítulo 6 e propostas para pesquisas futuras no capítulo 7.

2. CONCEITOS PRELIMINARES DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

2.1 O ESTADO DA ARTE: AS MÁQUINAS DE ÍMÃS PERMANENTES

As aplicações das máquinas síncronas de ímãs permanentes estão aumentando exponencialmente devido à redução significativa no custo dos materiais magnéticos e à descoberta de novos materiais com melhores características (ELOSEGUI, 2007), como o neodímio, o alnico e o samário-cobalto. Nos geradores de energia elétrica, a excitação por intermédio de ímãs permanentes tem sido usada em substituição à excitação em corrente contínua (CC), através de escovas, com o propósito de redução de custos e aumento da vida útil.

Os principais tipos de máquinas com ímãs permanentes são os motores de passo, as máquinas síncronas e as máquinas de corrente contínua. As diversas configurações de máquina apresentam grande variedade de orientação do fluxo magnético e dependem do tipo de ímã permanente, ímãs permanentes inseridos no rotor ou estator, trifásico, bifásico ou monofásico e ampla faixa de rotação (KALOKIRIS *et al*, 2007). Os ímãs inseridos no rotor apresentam diferentes geometrias com ímãs fixados na superfície e ou no interior do tambor do rotor, com fluxo magnético radial ou axial, com ímãs de formato curvilíneo, reto ou inclinado, e até mesmo com ímãs distribuídos simétrica ou assimetricamente no tambor do rotor.

As máquinas de ímãs permanentes encontram ampla gama de aplicações em diversos domínios, tais como os equipamentos domésticos, automóveis, transporte, equipamento aeronáutico, ferramentas elétricas, brinquedos, equipamentos de som e equipamentos de saúde que vão de potências desde microwatts até megawatts (COEY, 2002).

Apesar de serem muito promissoras, essas máquinas têm apresentado muitos desafios para chegar a seu estágio atual, em termos de custos, ondulação de torque, ruído, vibrações e a redução da confiabilidade devido ao grande número de componentes (HWANG *et al*, 2004).

Neste capítulo faz-se uma revisão da literatura sobre máquinas de ímãs permanentes. Serão discutidos os quatro principais ímãs, as diversas aplicações e as razões para a escolha das máquinas de ímãs permanentes, uma breve teoria sobre magnetismo e uma introdução sobre os efeitos indesejáveis na tensão e no torque produzidos nas máquinas síncronas.

2.1.1 A classificação básica das máquinas de ímãs permanentes

A Figura 3 apresenta a distribuição das configurações para os três principais tipos de máquinas de ímãs permanentes (GIERAS *et al*, 1997; HENDERSHOT e MILLER, 1994):

- motores de passo;
- motores de corrente contínua;
- máquinas síncronas de corrente alternada.

Dentre as configurações, a Figura 3 tem o intuito de situar a configuração proposta pelo estudo no universo tecnológico das máquinas de ímãs permanentes que é de uma máquina síncrona de ímãs permanentes, radial e com os ímãs alojados no interior do tambor do rotor.

O universo tecnológico das máquinas de ímãs permanentes apresentam diferentes configurações e não só variam quanto a forma construtiva, mas também com o tipo de acionamento aplicado. Em muitos casos, a escolha pela configuração depende do tipo de aplicação.

Salienta-se o fato de que os motores de passo de relutância não podem ser classificados como máquinas de ímãs permanentes. Sobretudo, sua apresentação é para a complementação de todas as categorias dos motores de passo e, principalmente um entendimento mais aprimorado do motor híbrido, que é um misto das duas configurações.

2.1.2 As máquinas síncronas de ímãs permanentes

As máquinas síncronas de ímãs permanentes são a proposta do estudo. Então, dar-se-á especial atenção as formas geométricas com que os ímãs são dispostos no rotor. Assim, não serão abordadas outras configurações da Figura 3, máquinas CC e motores de passo.

2.1.2.1 Superfície

Os ímãs na superfície do rotor são magnetizados radial ou circularmente, apresentados na Figura 4. Em geral, os ímãs na superfície recobrem toda a circunferência dos rotores e tais ímãs possuem forma geométrica cilíndrica. As reatâncias síncronas de eixo direto e de eixo em quadratura são praticamente iguais e constantes.

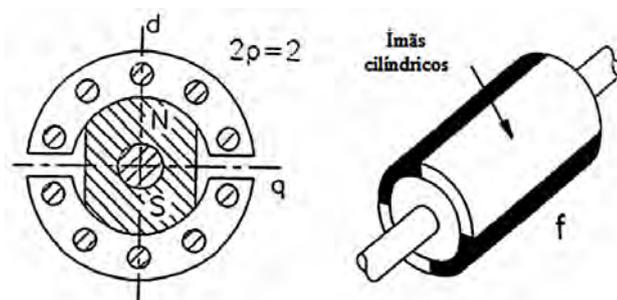


Figura 4 – Vista em corte dos ímãs permanentes na superfície do rotor – Fonte: Gieras *et al*, 1997 e Hendershot e Miller (1994)

2.1.2.2 Interior

Os ímãs inseridos no corpo externo do rotor chamam-se interior e são magnetizados radialmente e seus polos são alternados, conforme Figura 5. A reatância síncrona em eixo direto, em alguns casos, é menor do que no eixo em quadratura. O ímã está muito bem protegido contra forças centrífugas. Essa é uma concepção recomendável para motores de alta velocidade. Em geral, a tensão induzida por esse

tipo de configuração é inferior à dos ímãs na superfície dos rotores. O rotor poderá ser construído de aço silício laminado ou aço rígido (GIERAS *et al*, 1997).

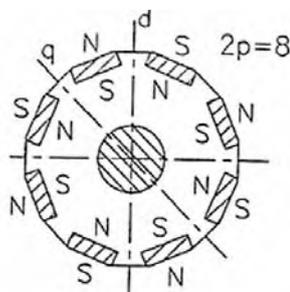


Figura 5 – Vista em corte transversal dos ímãs permanentes no interior do rotor Fonte: Gieras *et al* (1997)

2.1.2.3 Ímã oculto no rotor simetricamente

Os ímãs são fixados profundamente no interior do rotor, distribuídos de forma simétrica com fluxo axial ou radial em relação ao eixo do rotor, conforme a Figura 6. No tipo de configuração com fluxo axial, o fluxo magnético por polo é estabilizado por duas peças de ímãs, obtendo-se um fluxo resultante na direção radial (CHABU *et al*, 2005).

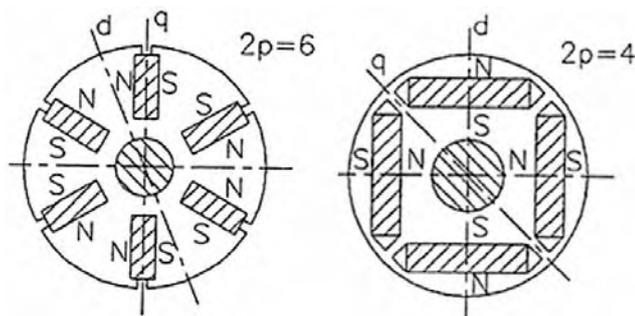


Figura 6 – Vista em corte transversal dos ímãs permanentes embutidos no interior do rotor – distribuído simetricamente – Fonte: Gieras *et al* (1997)

2.1.2.4 Ímã oculto no rotor assimetricamente

Os ímãs são localizados profundamente no interior do rotor, distribuídos de forma assimétrica, conforme a Figura 7.

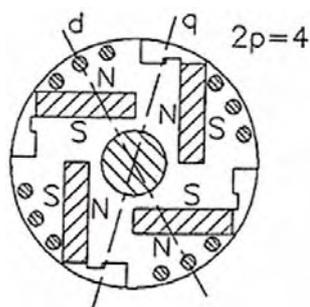


Figura 7 – Vista em corte transversal dos ímãs permanentes embutidos no interior do rotor – distribuído assimetricamente – Fonte: Gieras *et al* (1997)

2.1.3 Aplicações

As máquinas de ímãs permanentes cobrem uma grande variedade de aplicações (COEY, 2002 e LESTER, 1986), a partir de motores de passo para relógios, equipamentos para uso residencial, acionamentos periféricos em veículos, ferramentas para unidades industriais, grandes motores síncronos e geração distribuída.

É preciso compreender o tipo de aplicação para a correta seleção do tipo de máquina e sua forma construtiva. Dependendo das particularidades da aplicação, citam-se o torque alto ou baixo, velocidade baixa, média ou alta, precisão, movimentos repetitivos, variações bruscas da carga e faixa de potência. Em geral, para todas as aplicações são necessários alta confiabilidade, alto rendimento, tamanho da máquina, relação custo e benefício adequado, além de manter a qualidade dos processos e serviços.

2.2 MATERIAIS MAGNÉTICOS

2.2.1 Conceitos básicos sobre magnetismo

A curva de magnetização típica de um material ferromagnético é apresentada pela Figura 8. Os conceitos básicos são relatados e por fim é apresentada a Tabela 1, comparando os quatro principais ímãs permanentes e o aço silício.

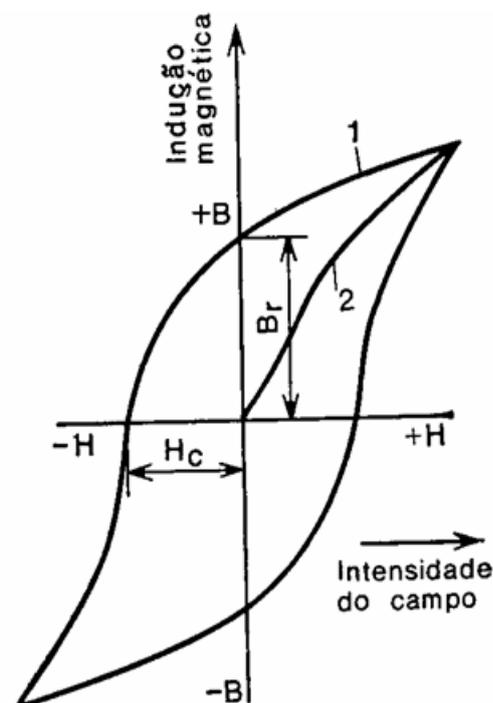


Figura 8 – Curva de magnetização: (1) laço de histerese, (2) curva original

Os parâmetros importantes para os materiais magnéticos são: a remanência (B_r) que é a indução magnética que se conserva no corpo magnetizado, depois de anulada a intensidade do campo aplicado, a força coercitiva (H_c) que é a intensidade de campo que tem de ser aplicada para a desmagnetização de um material magnético e a temperatura de *curie* ($^{\circ}\text{C}$) que é a temperatura na qual o domínio magnético é destruído, isto é, a temperatura de desmagnetização.

Tabela 1 – Propriedades básicas dos principais ímãs e do aço silício

Propriedades	Unidades	Ferritas anisotrópicas	Neodímio	Alnico	Samário-cobalto	Aço silício
Remanência (B_r)	Tesla	0,35 a 0,43	1,0 a 1,3	0,6 a 1,35	0,7 a 1,05	1,75 a 1,95
Força Coercitiva (H_c)	kA/m	180 a 400	800 a 1900	40 a 130	800 a 1500	< 0,05
Resistividade (ρ)	$\mu\Omega\text{cm}$	> 10.000	150	47	86	25 a 45
Temperatura máxima de trabalho	$^{\circ}\text{C}$	400	80 a 200	500 a 550	250 a 350	-
Temperatura de <i>curie</i>	$^{\circ}\text{C}$	450	310 a 350	850	700 a 800	-
Massa específica	kg/m^3	4900	7400	7300	8200	7650

Fonte: Hendershot e Miller (1994); Acesita (2010); Fitzgerald (2006)

2.2.2 As ferritas

As ferritas de bário e estrôncio foram desenvolvidas com maior intensidade na década de 1950. Os ímãs de ferritas são também chamados de ímãs cerâmicos. A ferrita tem maior força coercitiva do que os ímãs de alnico, mas, ao mesmo tempo, tem menor remanência magnética, coeficientes de temperatura relativamente elevados, ou seja, o coeficiente de temperatura B_r é $0,20\%/^{\circ}\text{C}$ e o coeficiente de temperatura H_c é de $0,27\%/^{\circ}\text{C}$. A temperatura máxima de serviço é de 400°C . As principais vantagens das ferritas são o baixo custo e a alta resistência elétrica, significando menores perdas por volume de ímã. Os ímãs de ferrita são mais econômicos em motores de potência fracionária e podem mostrar uma vantagem econômica sobre alnico em pequenas potências. As ferritas de bário são comumente usadas em pequenos motores CC para automóveis (ventiladores, limpadores de pára-brisas e bombas) e brinquedos elétricos. As ferritas de estrôncio têm maior força coercitiva do que ferritas de bário (GIERAS *et al*, 1997).

2.2.3 O neodímio

Com a descoberta de uma segunda geração de ímãs de neodímio (Nd) tem sido alcançado um progresso no que diz respeito à redução dos custos. O Nd é muito mais abundante do que elemento de terras raras samário (Sm). Ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB), que são atualmente produzidas em quantidades cada vez maiores, têm melhores propriedades magnéticas do que os ímãs de samário-cobalto (SmCo), mas infelizmente não resistem às altas temperaturas. A curva de desmagnetização, especialmente a força coerciva, é fortemente dependente da temperatura. O coeficiente de temperatura de B_r é de $0,095$ a $0,15\%/^{\circ}\text{C}$ e o coeficiente de temperatura de H_c é de $0,40$ para $0,70\%/^{\circ}\text{C}$. A máxima temperatura de serviço é de 80 a 200°C e temperatura de Curie é 310°C . O NdFeB, em geral, é suscetível à corrosão.

As últimas séries dos ímãs de NdFeB têm melhor estabilidade térmica e oferecem melhor resistência à corrosão. A resina ou revestimento metálico também são empregados para ajudar a proteção dos ímãs em ambientes agressivos.

2.2.4 O alnico

Os ímãs de alnico são constituídos de alumínio, níquel, cobalto e ferro. As principais vantagens do alnico são a sua elevada remanência magnética e os baixos coeficientes de temperatura. O coeficiente de temperatura de B_r é de $0,02\%/^{\circ}\text{C}$ e a temperatura máxima de serviço é de 550°C . A força coercitiva é muito baixa, portanto, é muito fácil não só para magnetizar, mas também para desmagnetizar o alnico. O alnico foi recentemente utilizado em máquinas de corrente contínua do tipo disco com entreferro relativamente grande. Os ímãs de alnico são resistentes à corrosão e têm sido utilizados, em geral, em pequenos motores como os tacogeradores. Os ímãs de alnico dominaram a indústria desde meados dos anos 1940 até 1970 (GIERAS *et al*, 1997).

2.2.5 O samário-cobalto

A primeira geração das ligas de terras-raras é baseada na composição de samário (Sm) e cobalto (Co), foi produzida comercialmente no início dos anos 1970. Os ímãs de SmCo têm a vantagem de possuir altos valores de remanência magnética, elevada força coercitiva e baixo coeficiente de temperatura. O coeficiente de temperatura da B_r é de $0,03$ a $0,045\%/^{\circ}\text{C}$ e o coeficiente de temperatura do H_c é de $0,14$ a $0,40\%/^{\circ}\text{C}$. A temperatura máxima de serviço é de 250 a 350°C . É bem adequado para a construção de motores com baixo volume e, conseqüentemente, alta potência. O custo é o único inconveniente, pois, o samário e o cobalto, são relativamente caros.

2.3 EFEITOS INDESEJÁVEIS NA TENSÃO E NO TORQUE PRODUZIDOS NAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

2.3.1 A teoria das duas reatâncias de eixo direto e em quadratura

A existência das reatâncias de eixo direto (X_d) e em quadratura (X_q) tem influência no torque e na tensão gerada da máquina síncrona. A equação (1) é a

fórmula analítica que representa está influência no torque e a equação (2) na tensão gerada (CHAPMAN, 1999), quando X_d é diferente de X_q .

$$T_d = \frac{3V_\phi E_A}{\omega_m X_d} \text{sen } \delta + \frac{3V_\phi^2}{2\omega_m} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \text{sen } 2\delta \quad (1)$$

$$V_\phi = E_A - (R_A I_A + X_d I_d + X_q I_q) \quad (2)$$

sendo,

T_d = Torque resultante [N.m]

E_A = Tensão induzida pelo fluxo de excitação do rotor (sem a reação da armadura) [V]

V_ϕ = Tensão aplicada aos terminais da máquina [V]

ω_m = Rotação [rad/s]

δ = Ângulo de carga entre V_ϕ e E_A , varia de $0^\circ \leq \delta \leq 180^\circ$ (posicionamento do rotor em relação ao campo girante) [graus elétricos]

X_d = Reatância de eixo direto [Ω]

X_q = Reatância de eixo em quadratura [Ω]

R_A = Resistência da armadura [Ω]

I_A = Corrente da armadura [A]

I_d = Corrente da reatância de eixo direto [A]

I_q = Corrente da reatância de eixo em quadratura [A]

As reatâncias de eixo direto (X_d) e em quadratura (X_q) estão relacionadas à forma construtiva do rotor das máquinas síncronas, podendo ser rotores de polos salientes e polos cilíndricos (lisos ou não-salientes). De um modo geral, os rotores de polos cilíndricos têm os valores das reatâncias iguais e constantes, como por exemplo, as máquinas de ímãs permanentes inseridos na superfície do rotor, conforme a Figura 4. Já os rotores de polos salientes têm como exemplos os geradores síncronos de grande porte e os motores de relutância. Esses, por sua vez, têm uma saliência, ou melhor, um espaço físico entre os polos chamados de interpolar, conforme a Figura 9.

Uma grandeza de eixo direto é uma grandeza cujo efeito magnetizante está centrado nos eixos dos polos do campo e uma grandeza de eixo em quadratura é quando o efeito magnético está centrado no espaço interpolar, isto é, posição do rotor onde ocorre um aumento do entreferro (FITZGERALD, 2006).

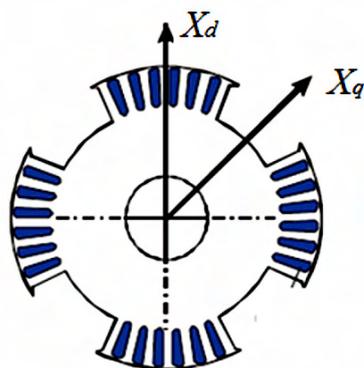


Figura 9 – Rotor de polos salientes de um motor de relutância – Fonte: Ferraz (2002)

A Figura 10 exemplifica a forma de onda de torque em relação ao ângulo de carga resultante (3), de acordo com a interação da forma de onda de torque fundamental (1), no centro dos polos “eixo direto”, com a forma de onda de torque de relutância (2) de segunda ordem, proveniente da composição da saliência dos polos “eixo em quadratura” e uma contribuição parcial e pequena dos polos.

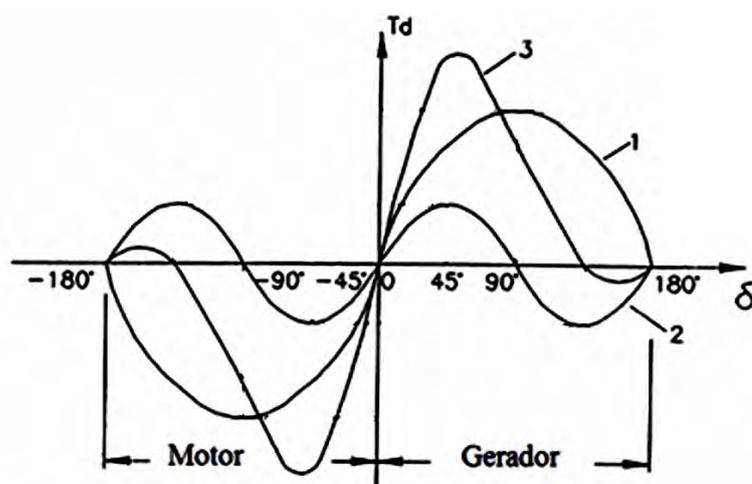


Figura 10 – Torque resultante para máquinas síncronas de polos salientes com $X_d > X_q$

Fonte: Chapman (1999)

Os efeitos destas ondas resultantes dos polos salientes, criadas devido aos altos valores de relutância, produzem um torque resultante maior e distorções harmônicas na tensão gerada.

Se X_d for igual a X_q a equação (1) reduz-se para a equação (3), onde T_{dsyn} é o torque fundamental.

$$T_{dsyn} = \frac{3V_\phi E_A}{\omega_m X_d} \text{sen } \delta \quad (3)$$

A equação (4) representa o torque de relutância T_{drel} .

$$T_{drel} = \frac{3V_\phi^2}{2\omega_m} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \text{sen } 2\delta \quad (4)$$

A equação (1) é resultante da soma das equações (3) e (4).

2.3.2 O efeito do enrolamento sobre a tensão e o torque

Os enrolamentos das máquinas síncronas classificam-se em concentrados e em distribuídos.

Quando o número de ranhuras por fase e por polo for unitário diz-se que o enrolamento é concentrado, mas quando o número de ranhuras for maior do que um, então, o enrolamento é considerado distribuído. Os enrolamentos distribuídos podem apresentar bobinados de passo inteiro ou de passo fracionário, conforme Figura 11.

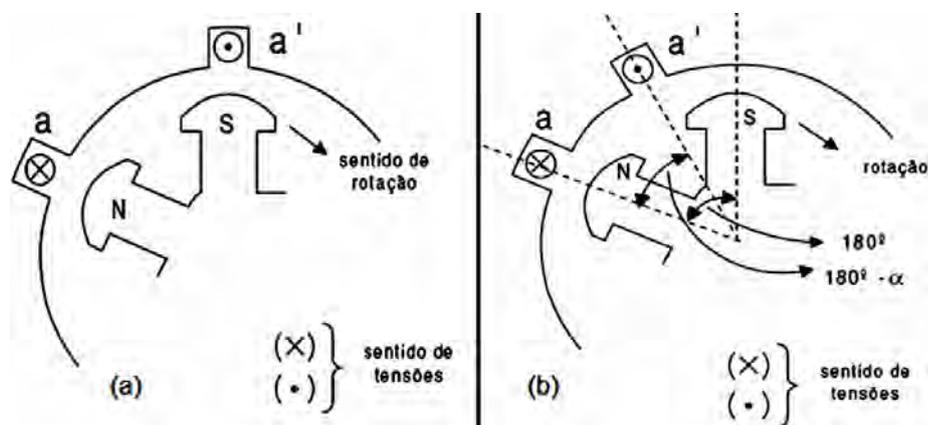


Figura 11 – Bobinado de passo inteiro (a) e bobinado de passo fracionário (b)

O bobinado de passo inteiro é determinado quando um lado de uma bobina está sob o centro de um polo norte e o outro lado dessa bobina está em posição equivalente sob o centro de um polo sul adjacente. O passo polar ou vão de cada bobina é de 180° elétricos. Neste tipo de bobinamento, os lados da bobina de qualquer ranhura pertencem à mesma fase e a direção da corrente tem o mesmo sentido, o que não acontece nos casos de enrolamentos com passo fracionários.

No bobinado fracionário a distância entre os dois lados da mesma bobina é menor (ou maior) do que um passo inteiro, portanto, a bobina ocupa um espaço polar menor (ou maior) do que 180° elétricos. Este efeito de se distribuir e fracionar o enrolamento em muitas ranhuras permite projetá-lo de modo a reduzir os harmônicos ímpares na forma de onda da tensão gerada e seus efeitos indesejáveis.

2.3.3 O efeito da inclinação dos ímãs para a redução dos harmônicos na tensão e no torque de travamento

As formas de se atenuar os efeitos harmônicos na tensão gerada e da influência pela diferença entre X_d e X_q no torque produzido, são inclinar as ranhuras do estator ou do rotor, modificar a geometria do dente da ranhura do estator, aumentar a relação entre as ranhuras e o número de polos e redistribuir os enrolamentos do estator.

No estudo deste trabalho, aplica-se a técnica de inclinação axial dos ímãs permanentes no tambor do rotor, mantendo as características do enrolamento concentrado, acarretando aproximadamente numa igualdade entre os valores X_d e X_q , conseqüentemente minimizando os efeitos indesejáveis na tensão e nos torques, ao mesmo tempo em que se obtém um efeito equivalente ao fracionamento e distribuição das espiras.

3. METODOLOGIA PARA O PROJETO E A CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA DE ÍMÃS PERMANENTES NO INTERIOR DO ROTOR

3.1 CONDIÇÃO INICIAL PARA O PROJETO

A máquina síncrona com ímãs permanentes no interior do rotor foi projetada a partir de um motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo. Utiliza-se o mesmo estator e, assim, projeta-se o rotor com ímãs permanentes que tenham a mesma densidade de fluxo magnético por polo e por fase que o estator.

Este capítulo relata o método analítico usado para a especificação dos ímãs contemplando suas dimensões, tipo de ímã, número de polos, sentido de magnetização e forma construtiva do rotor.

O rotor é construído com possibilidade de montar modularmente duas formas geométricas: uma com os blocos de ímãs de neodímio alinhados e outra com os blocos inclinados em relação ao eixo conforme a Figura 12.

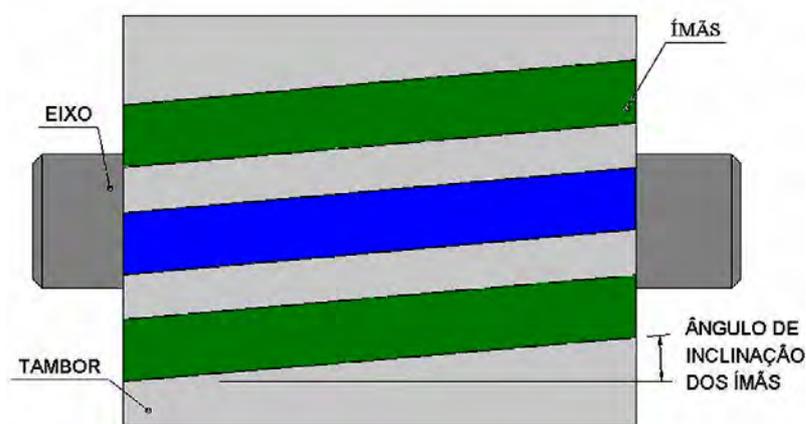


Figura 12 – Rotor com os ímãs inclinados

No final do capítulo são apresentadas todas as etapas de fabricação, desde a especificação dos tipos de materiais usados até os detalhes de usinagem.

O fluxograma da Figura 13 apresenta todas as etapas a serem seguidas para a correta especificação dos ímãs.

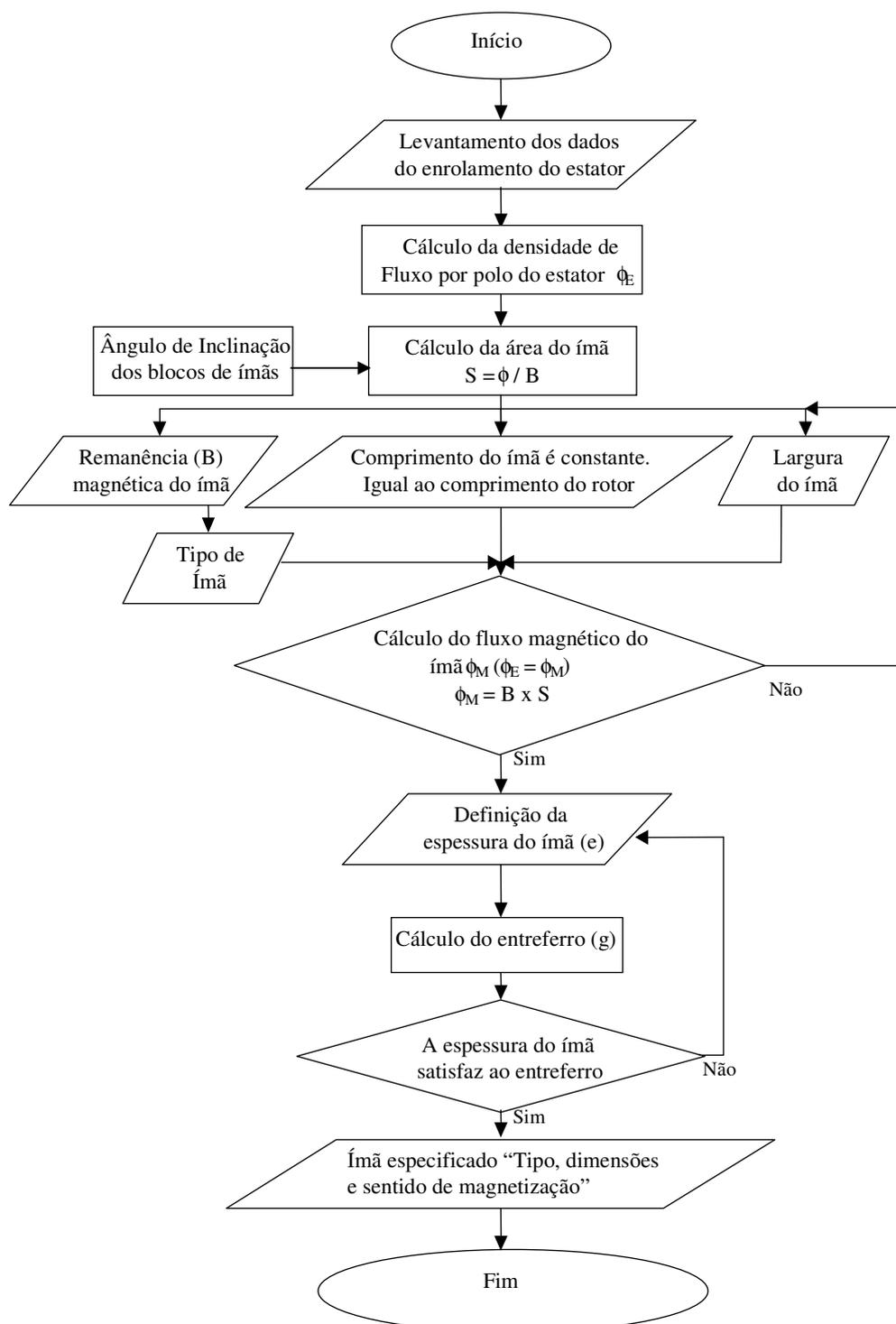


Figura 13 – Fluxograma para a especificação dos ímãs

3.2 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA O PROJETO

O projeto baseia-se no desenvolvimento do método e sua imediata aplicação para a transformação do motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo, fornecido pela empresa WEG, fabricante de motores elétricos, apresentado na Figura 14, e suas características técnicas constituem os dados das Tabelas 2 e 3 e a Figura 15.

Há duas possibilidades para o projeto, um modo é determinar os ímãs com base nos dados construtivos do estator e o outro é especificar, primeiramente, os ímãs do rotor para posteriormente recalculer os enrolamentos do estator e os demais dados construtivos (TEIXEIRA, 2006).



Figura 14 – Vista do estator e do rotor de 12 polos

Tabela 2 – Especificações técnicas do motor

Dados de placa do motor de indução	Símbolos	Valores	Unidade
Potência	P	250	W
Carcaça		90L	
Rotação	n	560	rpm
Número de polos	p	12	
Rendimento	η	0,41	
Fator de Potência	$\cos \Phi$	0,43	
Tensões	V	220/380/440/760	V
Corrente nominal	I	3,72/2,15/1,86/ -	A

Fonte: WEG (2008)

Tabela 3 – Especificações do enrolamento do estator

Dados construtivos do enrolamento	Símbolos	Valores	Unidade
Número de espiras por fase	Nf	1176	
Número de espiras por grupo (bobinas)		196	
Diâmetro do fio		0,35	mm
Número de ranhuras do estator	Q	36	ranhuras
Diâmetro interno do estator	D _{int est}	92,5	mm
Comprimento interno do estator	L _{int est}	120	mm
Passo da bobina		3	ranhuras
Grupos por fase		6	
Bobinas por grupos		1	
Ligação		Série	
Número de fases	m	3	

Fonte: WEG (2008)

A Figura 15 apresenta as ligações do enrolamento concentrado do estator do protótipo para a configuração 12 polos. O fio azul que vai da ranhura 1 para a ranhura 4 é a representação planificada de uma bobina, determinando desse modo o passo polar, assim a cada três ranhuras inicia-se ou termina uma bobina.

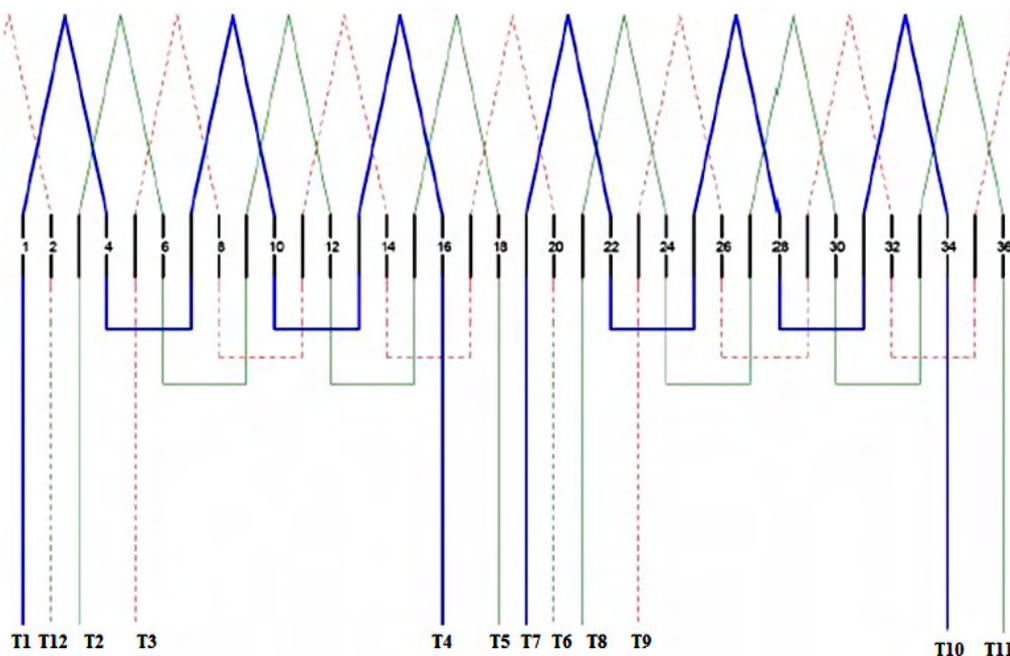


Figura 15 – Vista planificada do esquema de enrolamento do motor de 12 polos

Fonte: WEG (2008)

Segundo Kosow (1996), os enrolamentos concentrados têm inúmeras desvantagens em virtude do uso ineficiente de toda a periferia interna do núcleo do estator e torna-se, então, necessário o uso de ranhuras extremamente profundas onde os enrolamentos estão concentrados, aumentando a dispersão e a reatância do estator. Finalmente, um fator favorável é a baixa relação ferro-cobre. Por fim, os enrolamentos distribuídos reduzem os harmônicos, pois distribuem eficientemente as ranhuras em volta da periferia interna do estator (CISTELECAN, 2007).

3.2.1 Cálculos da densidade de fluxo do estator

De acordo com os dados relativos à construção do bobinamento do estator, foi calculada a densidade de fluxo por polo e por fase. Apresenta-se na Tabela 4, o valor da densidade que é importante para a especificação das dimensões e do tipo de ímã que constituirá o rotor.

Tabela 4 – Cálculo da densidade de fluxo do estator por polo e por fase

Principais Cálculos	Símbolos	Valores	Unidade
Densidade de fluxo do estator por polo por fase	Φ	70232,4	linhas
Passo polar	Y_p	2,42	cm
Remanência magnética do estator	B_e	3797	linhas/cm ²
Fator de distribuição	f_d	1	
Fator de enrolamento ou passo	f_e	1	
Número de espiras por fase	N_f	1176	
Número de espiras totais	N_t	3528	
Número de espiras por grupo	N_g	3	
Tensão aplicada a cada base do bobinamento do estator	V	220	V
Número de ranhuras por polo por fase	q	1	
Passo das ranhuras	β	60° E	
Passo polar em número de ranhuras	r_p	3	

A densidade de fluxo do estator por polo e por fase (MUÑOZ, 1987) foi calculada pelas equações (5) e (6).

$$\Phi = \left(\frac{2}{\pi} \right) Y_p L_{int\ est} B_e \quad (5)$$

$$Y_p = \left[\frac{D_{int\ est} \pi}{p} \right] \quad (6)$$

Sendo,

Φ = densidade de fluxo do estator por polo por fase [linhas]

Y_p = passo polar [cm]

$L_{int\ est}$ = comprimento interno do estator [cm]

B_e = remanência magnética do estator [linhas/cm²]

$D_{int\ est}$ = diâmetro interno estator [cm]

p = número de polos

Segundo Muñoz (1987), a remanência magnética do estator (B_e) varia entre 3000 a 6000 linhas por cm², mas geralmente para cálculos, adotam-se 4500 linhas por cm². De acordo com a fabricante de motores WEG, a remanência inicial é de 5000 linhas por cm².

Os cálculos para a densidade de fluxo pela equação (5) foram corrigidos e verificados, de acordo com Muñoz (1987), pelas equações (7), (8) e (9).

$$\Phi = \left(\frac{V f_d 10^8}{4,44 f f_e N_f} \right) \quad (7)$$

$$f_e = \text{sen} \left(\frac{180^0}{2} \right) \quad (8)$$

Sendo,

V = tensão [V]

f_d = fator de distribuição

f_e = fator de enrolamento

f = frequência [Hz]

N_f = número de espiras por fase

O ângulo de 180° elétricos na fórmula do fator de enrolamento é admitido quando o passo da bobina for igual ao passo polar em número de ranhuras.

$$f_d = \frac{\text{sen}\left(\frac{q \beta}{2}\right)}{q \text{sen}\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (9)$$

As equações (10), (11) e (12) complementam a equação (9).

$$q = \frac{Q}{m p} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{180^\circ E}{r_p} \quad (11)$$

$$r_p = \frac{Q}{p} \quad (12)$$

Sendo,

q = número de ranhuras por polo por fase

β = passo da ranhura determinado em graus elétricos [$^\circ E$]

Q = número de ranhura

m = número de fases

p = número de polos

r_p = passo polar em número de ranhuras

3.2.2 Determinação das dimensões e do tipo de ímãs permanentes

A equação (13) determina a densidade de fluxo magnético por polo do ímã (Φ_m) e é a multiplicação entre a remanência magnética (B_m) e a área (S) do ímã. Neste protótipo, admite-se a densidade de fluxo por polo e por fase do estator (Φ) com valor igual à densidade de fluxo magnética por polo do ímã (Φ_m). Deste modo, o projetista deverá encontrar no comércio um ímã que atenda aos cálculos da equação (13).

$$S = \frac{\Phi_m}{B_m} \quad (13)$$

A área é a medida da largura (L_m) pelo comprimento (C_m) total dos ímãs por polo, conforme a equação (14). Neste tipo de projeto, o comprimento do ímã é a medida do comprimento do pacote do rotor que é um valor pré-fixado. Foi preciso determinar somente a largura do ímã e a remanência magnética.

$$S = L_m C_m \quad (14)$$

A remanência magnética do ímã (B_m) é um valor dado pelo fornecedor que dependerá do seu tipo, de suas dimensões e da temperatura de trabalho.

O projetista optará entre os ímãs permanentes de neodímio ou de ferrita. A ferrita é a opção economicamente mais vantajosa, porém tais ímãs possuem baixos valores de remanência. Os ímãs permanentes de alnico e samário-cobalto não são para este tipo de projeto por apresentarem maiores custos.

A largura do ímã terá de respeitar o passo polar (Y_p). Indica-se inicialmente que a largura do ímã não ultrapasse 70% do passo polar em virtude da fixação destes ímãs no rotor. É necessária uma parede de mínima de ferro (bordas) entre os ímãs para que resistam às forças centrífugas.

Posteriormente, é verificado se a espessura do ímã atenderá aos critérios do entreferro, visto com mais detalhes no próximo tópico.

Para o projeto, definiu-se o tipo de ímã e suas dimensões, descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações dos ímãs de neodímio

Definições dos ímãs de neodímio N35	Símbolos	Valores	Unidade
Comprimento	Cm	19	mm
Largura	Lm	14	mm
Espessura	e	5	mm
Remanência magnética do ímã	Bm	3300	gauss
Sentido de magnetização		radial	
Temperatura máxima	Te	80	°C

O ímã escolhido foi o neodímio visto que a ferrita não atenderia, pois suas dimensões ultrapassariam o passo polar, porque a remanência é baixa, em geral até 1500 gauss e obtendo-se um valor de densidade de fluxo bem abaixo da exigência. Os ímãs de neodímio possuem uma cobertura de níquel. Para proteção contra a corrosão. Para atender ao comprimento do pacote do rotor de 120 mm foram escolhidos 6 peças com o comprimento de 19 mm. Desse modo facilitou-se a montagem, principalmente para a confecção dos blocos de ímãs em ângulo.

O ímã escolhido teve sua remanência média de 3300 gauss, devidamente medidos com um gaussmeter LAKESHORE 421, resultando num fluxo de aproximadamente 55000 linhas, menor do que o ideal. Contudo, durante as medições observou-se que, nas extremidades (bordas) do ímã, a remanência apresentou valores com 60% (2000 gauss) da remanência média até 10 a 15% além da largura da peça (1,4 a 2 mm). Admitindo essas observações nos cálculos de fluxo tem-se uma elevação para 63000 linhas, resultando numa tensão gerada de cerca de 200 V.

Foram realizadas três medições em cada ponto, sendo nove os pontos distribuídos simetricamente sobre os polos norte e sul. Notou-se, também, que a remanência na periferia é maior (em torno de 20%) do que no centro da peça.

A correta especificação do ímã, mediante os cálculos, seria um ímã com remanência média de 4000 gauss, definindo-se assim um ímã de neodímio N42; portanto, de valor maior que o ímã N35 e também com custo superior. O protótipo é construído com o ímã N35 em virtude da relação custo e benefício. A letra N significa a máxima temperatura de operação e as dezenas seguintes determinam a remanência; pode-se encontrar as letras M, H, precedidas de SH, UH, EH em temperaturas máximas de trabalho de 80, 100, 120, 150, 180 e 200 °C.

Outro modo de se determinar a remanência do ímã é pela curva de magnetização, quando não se tem disponível aparelho de medição apropriada. A Figura 16 apresenta a curva de magnetização típica do ímã de neodímio.

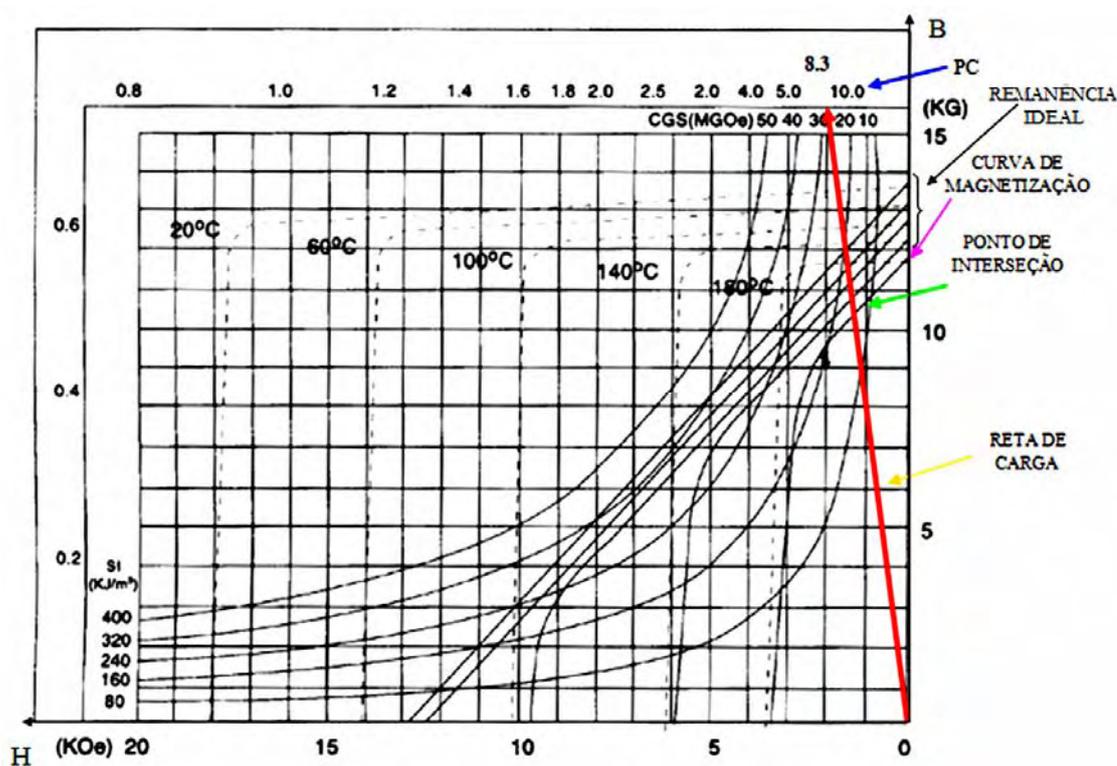


Figura 16 – Curva de magnetização típica do neodímio e seu ponto de operação

Fonte: IMAG (2008)

A Figura 16 tem o objetivo de explicar a redução da remanência devido à diferença entre os valores do ponto de operação de funcionamento e a remanência ideal. A interseção da curva de magnetização com a reta de carga determina o ponto de operação do ímã, onde ocorre a máxima remanência magnética, portanto, com valor menor do que a remanência ideal. De um modo geral, este valor menor é justificado levando-se em conta a temperatura de trabalho, o tipo de ímã, o coeficiente de permeância e sua aplicação. A curva de magnetização varia em função da temperatura e a reta de carga é traçada do ponto de origem até o valor do coeficiente de permeância determinado para o projeto, portanto, a reta de carga varia em função do coeficiente de permeância.

Nos projetos de motores, o valor típico do coeficiente de permeância (PC) é de 10, com variação de 5 a 15 (HENDERSHOT e MILLER, 1994). Segundo Hwang *et al* (2008), esse coeficiente é de 8,4 para motores de baixa rotação; com variação de 4 a 20. O coeficiente de permeância é referente ao produto $B \times H$.

3.2.3 Entreferro

O entreferro (g) é a lacuna entre o estator e o tambor do rotor (nos ímãs e nas bordas de aço entre os ímãs), mostrado na Figura 17. Os valores de entreferro, apresentados na Figura 17, serão usados na construção do protótipo e estão de acordo com o método analítico, apresentado a seguir com maiores detalhes.

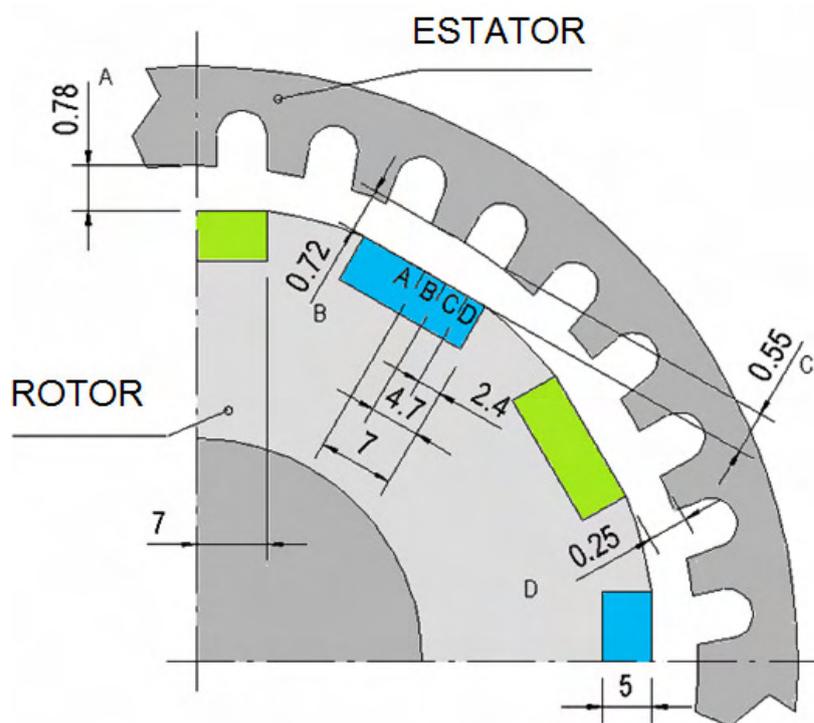


Figura 17 – Lacuna (entreferro) entre o estator e os ímãs do rotor

Segundo Gieras *et al* (1997) a relação entre o entreferro e a espessura do ímã deverá ser menor que 10%, ou seja, $g/e < 0,1$, para configurações retangulares dos polos dos ímãs.

Os valores calculados apresentados pela Tabela 6 são para a especificação do máximo entreferro admissível, segundo os formulários apresentados por Hwang *et al* (2002) e Hwang *et al* (2008).

Tabela 6 – Determinação do entreferro

Dados	Símbolos	Valores	Unidade
Espessura do ímã	e	5	mm
Coefficiente de permeância	PC	8,4	
Largura do ímã	L_m	14	mm
Diâmetro interno do estator	$D_{int\ est}$	92,5	mm
Número de polos	p	12	
Passo polar	Y_p	24,2	mm
Calculados			
Entreferro máximo admissível	g	0,81	mm
Fator de fluxo concentrado	C_ϕ	0,72	
Área do corte transversal por polo do ímã	A_m	70	mm ²
Área do corte transversal por polo do entreferro	A_g	96,01	mm ²
Coefficiente do arco polar	α	0,79	

De acordo com Hwang *et al* (2002), Hanselman (2006), Gieras *et al* (1997) e Hwang *et al* (2008) o entreferro máximo admissível é calculado, segundo as equações (15), (16), (17), (18) e (19).

$$g = \frac{e}{PC C_\phi} \quad (15)$$

No qual o fator de fluxo concentrado (C_ϕ),

$$C_\phi = \frac{A_m}{A_g} \quad (16)$$

Sendo A_g e A_m , respectivamente, as áreas de corte transversal por polo do entreferro e do ímã,

$$A_m = L_m e \quad (17)$$

$$A_g = \frac{\alpha D_{int\ est} e \pi}{p} \quad (18)$$

Sendo α chamado de coeficiente do arco polar é definido como sendo a razão entre o arco do polo (b_p) e o passo polar (Y_p). De acordo com Gieras *et al* (1997) este coeficiente varia de 0,55 a 0,75.

$$\alpha = \frac{b_p}{Y_p} = \frac{Y_p - e}{Y_p} \quad (19)$$

A Figura 17 apresenta uma variação do entreferro ao longo de toda a circunferência do tambor do rotor. O entreferro na borda do rotor (superfície de aço) é de 0,25 mm e constante, mas sobre os ímãs esse entreferro é variável, conforme Tabela 7. Nota-se que, inicialmente, nas extremidades destes ímãs é 0,25mm e aumenta progressivamente até o valor máximo de 0,78 mm no centro do ímã. Analisando o entreferro, os pontos de referência A, B, C e D são próximos e menores do que o valor máximo admissível no entreferro, apresentados na Tabela 6.

Tabela 7 – Variação do entreferro sobre os ímãs

Pontos de referência	Distâncias	Entreferro	Unidade
A	No centro do ímã, a 7 mm da borda	0,78	mm
B	Afastamento de 4,7 mm da borda	0,72	mm
C	Afastamento de 2,4 mm da borda	0,55	mm
D	Borda (arco da circunferência do ferro)	0,25	mm

Segundo Hendershot e Miller (1994), o entreferro para micromotores, usados em computadores, está compreendido entre 0,13 a 0,25 mm; motores pequenos, tais como tacogeradores e pequenos servomotores, de 0,38 a 0,51 mm e motores *brushless* de tamanho próximo ou superior ao protótipo possui faixa entre 0,64 a 0,89 mm.

3.2.4 O ângulo de inclinação

Os ímãs sobre o rotor foram dispostos formando 12 polos, conforme a Figura 18. Foi construído o rotor com duas formas geométricas para comparação entre os blocos de ímãs alinhados e inclinados axialmente.

Pretende-se verificar com esta comparação a influência dos harmônicos nas ranhuras sob a forma de onda de saída gerada numa máquina síncrona com grande número de polos e com enrolamentos concentrados.

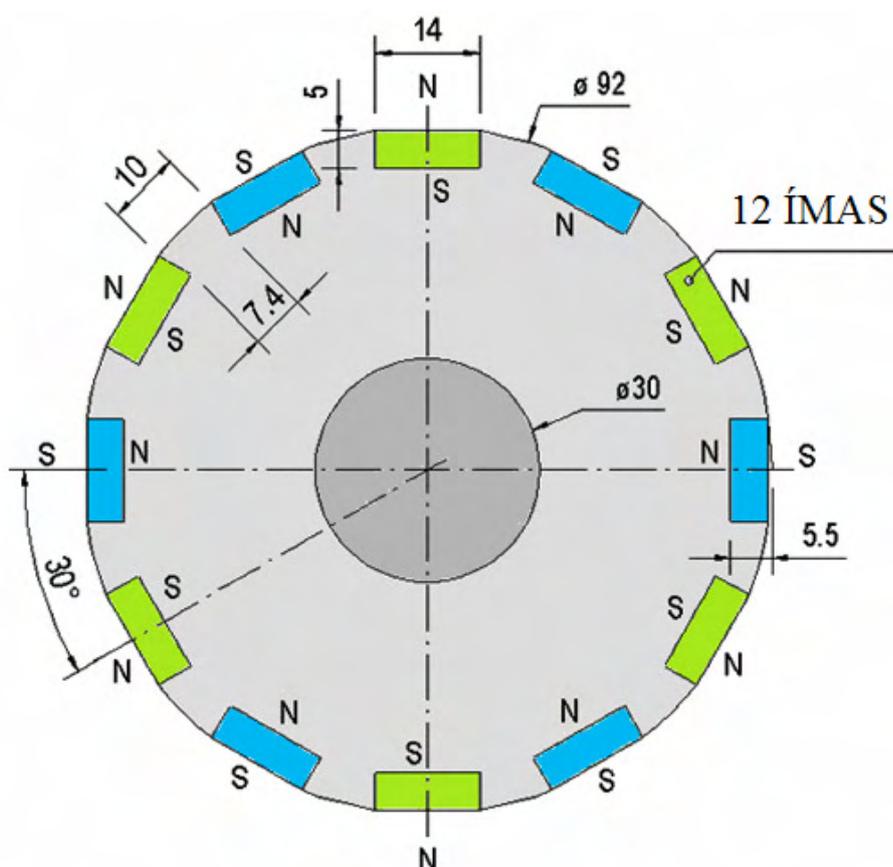


Figura 18 – Distribuição dos 12 polos de ímãs no rotor

Segundo Oliveira (2002) os harmônicos de ranhuras, provenientes da inadequada distribuição das espiras dos enrolamentos, causam diversos problemas como induzir harmônicos na tensão gerada em geradores de corrente alternada, produzir torques parasitas que podem atuar sobre a curva de torque *versus* velocidade, introduzir vibrações e ruídos; aumentar as perdas no núcleo introduzindo componentes de alta frequência na tensão e a corrente.

Um procedimento para a redução dos harmônicos consiste na inclinação das ranhuras do estator ou rotor da máquina (JAHNS, 1996). Este processo foi usado em motores de indução, sendo as barras do rotor em gaiola de esquilo inclinadas em

relação às ranhuras do estator. Dessa forma, uma extremidade da barra se encontra sob uma ranhura do estator e a outra extremidade sob a ranhura seguinte. Assim, cada barra está submetida, ao longo de sua profundidade, à variação de relutância existente entre ranhuras adjacentes (distância correspondente ao período elétrico da menor frequência harmônica devido às ranhuras), cancelando seus componentes harmônicos. O mesmo efeito é conseguido quando as ranhuras do estator são inclinadas. A escolha entre a inclinação das ranhuras do estator ou das barras do rotor é feita em cima de critérios de construção, obedecendo às condições disponíveis pelo fabricante para a fabricação dessas máquinas.

Segundo Hendershot e Miller (1994), há três fatores que contribuem para a redução das flutuações de torque para uma máquina atuando como motor, tais como a distribuição dos enrolamentos do estator, o tipo da forma de onda do acionamento e a geometria da máquina (inclinação das barras dos ímãs e o tipo dos dentes da ranhura do estator).

Uma característica importante é o torque de travamento e pode ser compreendido como o torque oscilatório causado pela tendência do rotor de alinhar-se com o estator, num determinado sentido, onde o fluxo magnético dos ímãs é maximizado. O torque de travamento ocorre mesmo quando não existe corrente circulando nos enrolamentos do estator e pode ser reduzido com um alto valor de relação entre as ranhuras e os polos, além de todos os fatores para a redução do torque flutuante (ISLAM *et al*, 2009).

A Figura 19 apresenta as barras de ímãs inclinadas sobre o rotor (vista parcial). A inclinação deverá respeitar o critério de que a extremidade do último ímã tem que estar na mesma direção que o início da extremidade oposta do próximo ímã, referente ao outro polo, visto pela interseção entre polos. O ângulo da inclinação no projeto foi uma consequência do critério estabelecido e não uma determinação. Uma nova escolha no ângulo de inclinação, por determinação, obrigaria a uma nova especificação na largura do ímã e logicamente em novos valores de remanência e espessura deste ímã. Por sua vez, isso acarretaria um novo valor para o entreferro.

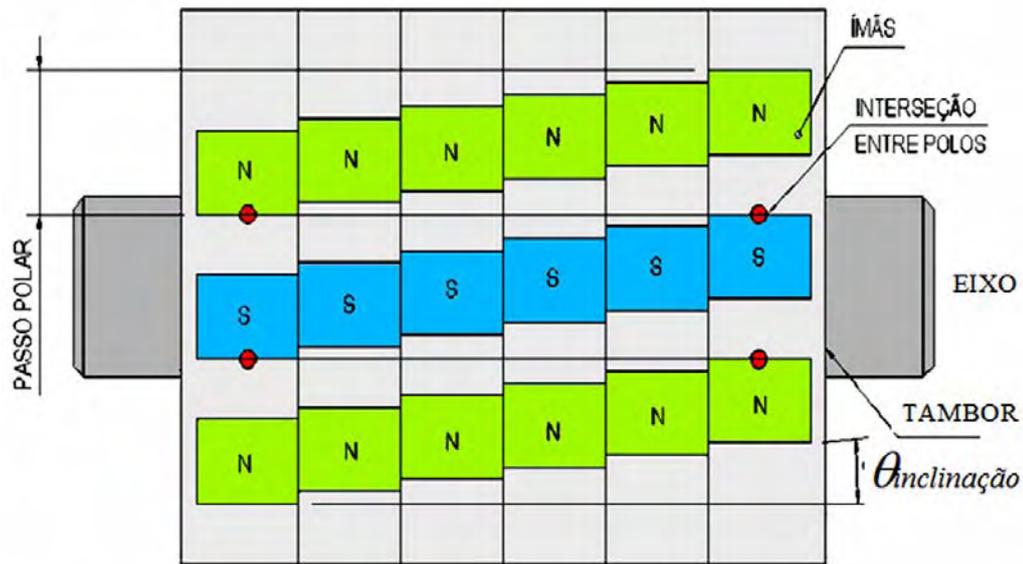


Figura 19 – Rotor com os ímãs fixados com inclinação axial

O ângulo de inclinação é calculado pela equação (20).

$$\theta_{inclinação} = \arctg \left\{ \frac{\left[\left[(D_{int\ est} - 2 g_{ferro}) \operatorname{sen} \left(\frac{180}{p} \right) \right] - L_m \right]}{C_m} \right\} \quad (20)$$

sendo,

$\theta_{inclinação}$ = ângulo de inclinação dos blocos dos ímãs

C_m = comprimento total dos ímãs ou rotor

g_{ferro} = entreferro entre o estator e as bordas de ferro do rotor

L_m = largura do ímã – faixa indicada – $0,1 Y_p < L_m < 0,9 Y_p$

Y_p = passo polar

Substituindo-se os valores do protótipo, $D_{int\ est} = 92,5$ mm, $g_{ferro} = 0,25$ mm, $p = 12$, $L_m = 0,1$ mm e $C_m = 120$ mm, na equação tem-se um ângulo de inclinação máximo de aproximadamente 11° , considerando ímãs com largura extremamente

pequena. No caso do protótipo, o ângulo escolhido de 5° representa metade do ângulo máximo.

A Tabela 8 mostra dois valores de ângulos de inclinação comparados com o ângulo escolhido para o projeto.

Tabela 8 – Comparação entre ângulos de inclinação dos ímãs

Ângulo de inclinação dos ímãs (°) $\theta_{inclinação}$	3,7°	Escolhido para o projeto 5°	7°
Especificações dos ímãs de neodímio			
Comprimento do ímã C_m – (mm)	20	19	20
Largura do ímã – L_m – (mm)	16	14	9
Espessura do ímã – e – (mm)	8	5	5
Entreferro máximo calculado – g – (mm)	0,96	0,81	1,2
Porcentagem do passo polar (%)	67	58	37
Remanência magnética média – B_m – (gauss)	3300	3300	5000
Tensão gerada (V)	230	198	195
Aspectos favoráveis	-	Custo de aquisição do ímã razoável	Menor índice de DHT e flutuações de torque em relação aos outros ângulos
Aspectos desfavoráveis	Maior índice de DHT e flutuações de torque em relação aos outros ângulos. Alto custo de aquisição do ímã em virtude dos altos valores de sua dimensão	Baixa tensão gerada	Alto custo de aquisição do ímã em virtude do alto valor de remanência

Bianchi (2002) estabelece um critério para a determinação do melhor ângulo de inclinação das barras de ímãs permanentes em formato de arco aplicados na superfície do rotor. Suas fórmulas analíticas, equações (21) e (22), relacionam as ranhuras com o número de polos na Tabela 9. Variações do número de fatiamentos dos blocos dos ímãs em partes iguais determinam os módulos, apresentada pela Figura 20, variando de 1 a 5, implicam na redução do torque de travamento com o aumento do número de módulos.

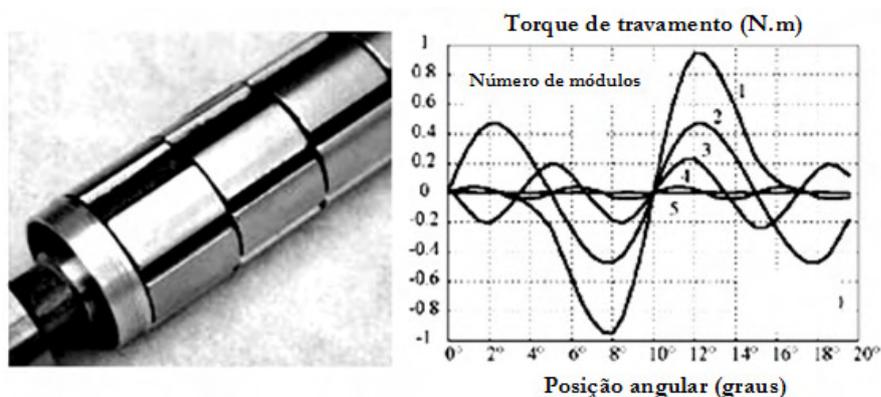


Figura 20 – Relação dos números de módulos com o torque de travamento – Fonte: Bianchi (2002)

$$\theta_{\text{inclinação}} = \frac{360^\circ}{Q N_{\text{períodos}}} \quad (21)$$

$$N_{\text{períodos}} = \frac{p}{\text{HCF}\{Q, p\}} \quad (22)$$

sendo,

$N_{\text{períodos}}$ = número de períodos da onda de torque

HCF = fator referente ao maior denominador comum entre Q e p

Q = número de ranhuras

p = número de polos

Aplicando os critérios estabelecidos (BIANCHI, 2002), o melhor ângulo de inclinação dos ímãs é $3,33^\circ$ ($\text{HCF} = 4$; $N_{\text{períodos}}=3$) e um número de módulos maior do que 5. Isto implica que o ângulo de projeto estabelecido está em concordância com os critérios para ímãs inseridos na superfície, já que valores acima tendem a reduzir o torque de travamento.

A Tabela 9 não abrange uma relação entre ranhuras e número de polos, contemplando toda a faixa de motores comerciais. Então, foi preciso dividir por três, tanto o número de polos quanto o número de ranhuras para encontrar na Tabela 9 um denominador em comum (HCF) à forma construtiva do protótipo.

Tabela 9 – Número de períodos da onda de torque de travamento

Número de polos (p)	2	2	2	2	4	4	4	8	8	8
Número de ranhuras (Q)	3	6	9	12	6	9	12	6	9	15
HCF	1	2	1	2	2	1	4	2	1	1
Nperíodos	2	1	2	1	2	4	1	4	8	8

Fonte: Bianchi (2002)

3.3 A CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Primeiramente foi construído o eixo com aço SAE 1045. Posteriormente, foram usinados os blocos que foram fixados no eixo por intermédio de chavetas, evitando o seu deslocamento rotacional. Também há porca e batente no eixo com aço 1045, com o objetivo de neutralizar o deslocamento dos blocos axialmente. Por último, os canais foram fresados com divisor para posterior colagem dos ímãs no interior do rotor.

3.3.1 Escolha do material para o rotor

O rotor foi fabricado em dois diferentes tipos de materiais sendo o eixo em aço SAE 1045 e a parte do rotor que suporta os ímãs em aço SAE 1006 recozido.

O eixo é de material padrão aplicado em eixos de motores convencionais, indicado para suportar esforços mecânicos.

O suporte dos ímãs do protótipo foi confeccionado em aço SAE 1006 recozido, pela facilidade na construção, baixo custo e perdas no ferro razoável em relação ao material usado para a fabricação do rotor gaiola de esquilo que é o aço silício.

O gráfico da Figura 21 justifica a escolha, pois apresenta uma comparação nos diversos tipos de materiais em que são fabricados os motores elétricos e transformadores. Esse gráfico relaciona as perdas, em W/kg, do aço SAE 1006 sem recozimento (1006SR), aço SAE 1006 recozido (1006CR), aço silício com 0,5% de silício (0,5%Si), aço silício com 2% de silício (2%Si), aço silício com 3% de silício (3%Si) e aço silício com o grão orientado (GO).

O aço escolhido apresenta praticamente o mesmo valor de perdas por histerese que o aço silício, usado em rotores gaiola de esquilo, porém apresentam perdas por

correntes parasitas muito maiores, todavia, o protótipo por se tratar de um rotor onde o fluxo magnético é fixo e constante, gerado pelos próprios ímãs permanentes, as correntes parasitas no rotor serão mínimas, conseqüentemente a influência das perdas por correntes parasitas estão reduzidas.

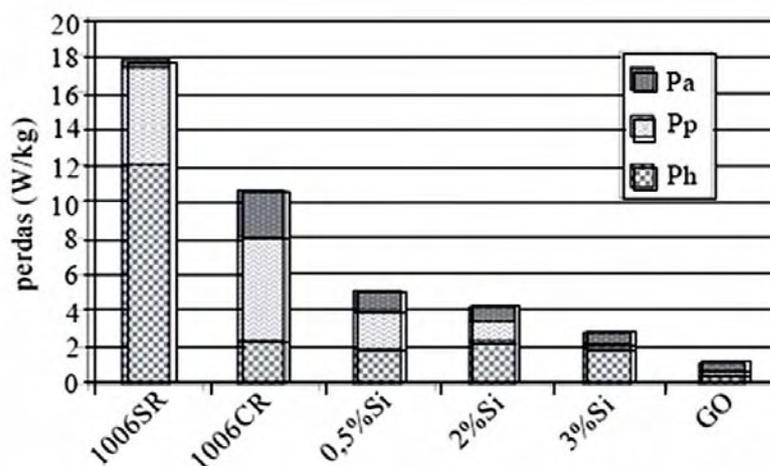


Figura 21 – Perdas no ferro para diversos tipos de aço para fins elétricos (Perda anômala “Pa”, Perda por correntes parasitas “Pp”, Perda por histerese “Ph”) – Fonte: Landgraf (2008)

3.3.2 Usinagem, fresamento e fixação dos ímãs no rotor

O protótipo foi construído de forma a se aproveitar todo o conjunto (eixo, blocos de aço SAE 1006 e os ímãs de neodímio), podendo ser usado tanto para os ímãs alinhados, quanto para os ímãs inclinados, acarretando uma significativa economia de tempo e de material. A seguir apresentam-se as etapas para a construção do protótipo.

3.3.2.1 Confeção do eixo

O eixo com aço SAE 1045, conforme ilustra a Figura 22, tem um batente e rosca para fixação dos blocos, através de uma porca e arruela de trava. Os blocos de aço SAE 1006 recozidos, que agruparão os ímãs, também terão rasgo de chaveta com um rasgo para os ímãs alinhados e outro deslocado 180° para os ímãs inclinados.

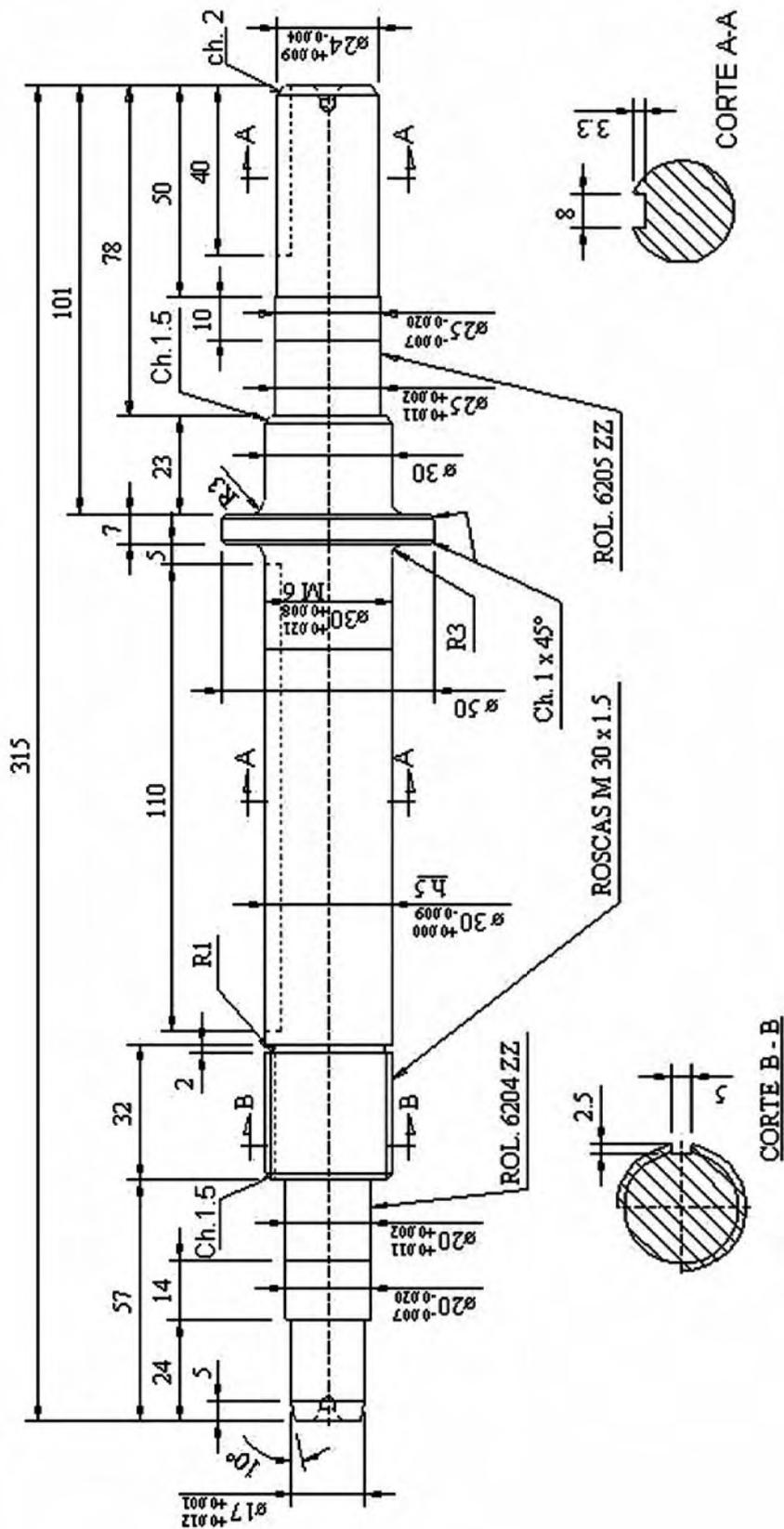


Figura 22 – Projeto detalhado do eixo

3.3.2.2 Confeção dos blocos que constituem o suporte dos ímãs no rotor

Usinou-se o diâmetro externo do suporte dos ímãs, chamado também de tambor do rotor, para 92 mm e comprimento com 120 mm. Cortou-se e dividiu-se o tambor em seis partes com quatro partes com comprimento 19,3 mm e duas partes com comprimento de 21,4 mm, apresentado pelas Figuras 23 e 24.

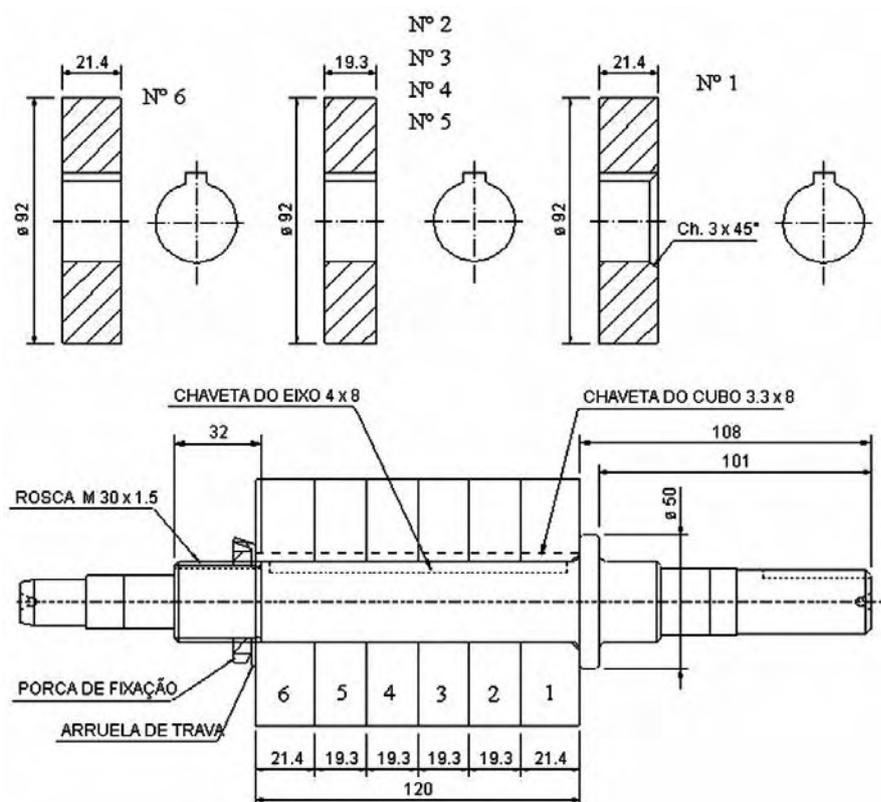


Figura 23 – Desenho dos blocos do rotor sobre o eixo



Figura 24 – Eixo e rotor usinados

3.3.2.3 Abertura dos canais para a fixação dos ímãs no tambor do rotor

Com os blocos montados sobre o eixo que foi fresado com a largura de 14 mm e profundidade de 5 mm, para todo o comprimento dos blocos de aço SAE 1006 recozido, fresamento de acordo com as Figuras 19 e 25. O equipamento utilizado foi uma fresa do tipo furadeira de topo.

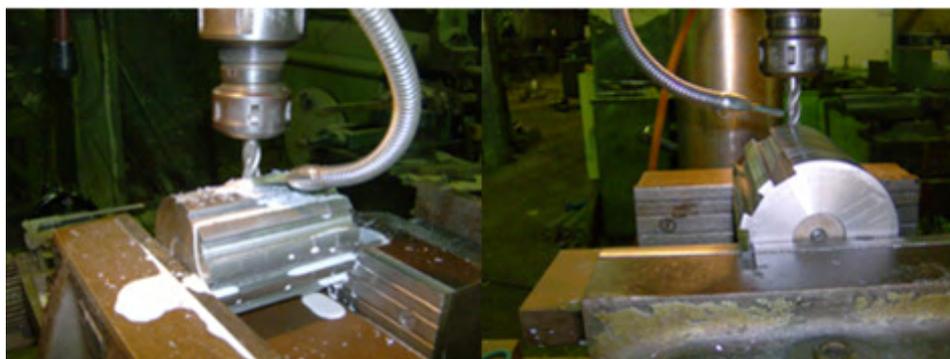


Figura 25 – Fresa em marcha (vista lateral e radial)

3.3.2.4 Deslocamento angular dos canais

Após a abertura dos canais para fixação dos ímãs, apresentado pela Figura 26, os blocos serão deslocados, cada bloco um em relação ao outro de 2 mm, para a confecção do rotor com os ímãs inclinados, conforme a Figura 27.



Figura 26 – Rotor com os canais alinhados

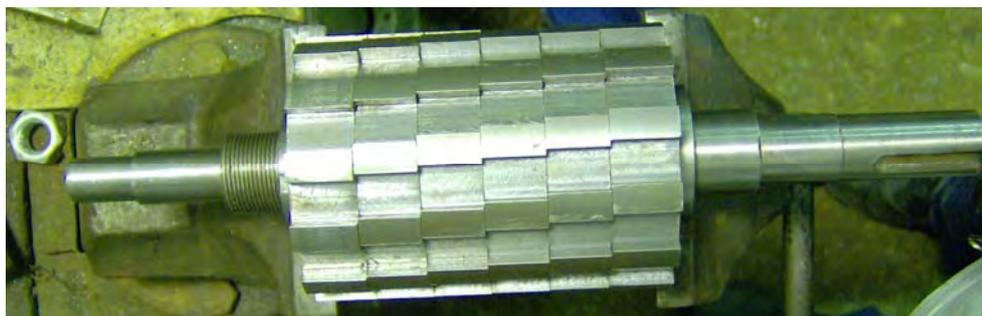


Figura 27 – Rotor com os canais inclinados

3.3.2.5 Fixação dos ímãs

Colaram-se os ímãs nos blocos individuais. As faces norte e sul foram marcadas com o auxílio de uma bússola e uma caneta marcadora. Usou-se resina epóxi para a fixação dos ímãs e solvente para retirada do excesso de cola, utilizou-se (tricloroetileno), o mesmo solvente foi usado para limpeza das superfícies de colagem. As Figuras 28 e 29 ilustram o procedimento.



Figura 28 – Processo de fixação dos ímãs nos blocos

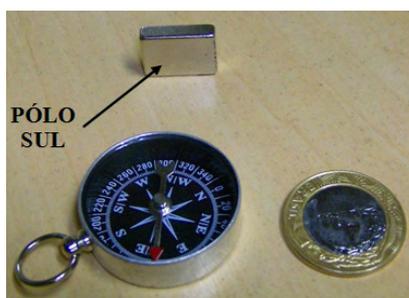


Figura 29 – Verificação do sentido de magnetização com a bússola

3.3.2.6 Montagem

A montagem dos seis blocos prontos, apresentado na Figura 30, foi realizada de duas formas, uma, para os blocos de ímãs alinhados, apresentada na Figura 31, e a outra, para os blocos de ímãs inclinados, mostrada na Figura 32.



Figura 30 – Blocos prontos



Figura 31 – Protótipo com os ímãs alinhados



Figura 32 – Protótipo com os ímãs inclinados

4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROTÓTIPO

A avaliação do protótipo foi feita atuando como gerador, realizando ensaios dinâmicos e estáticos (ALMEIDA, 2007; MARTIGNONI, 1987), descrevendo o procedimento de avaliação e os materiais utilizados para cada etapa.

Foram analisadas e comparadas as máquinas síncronas de ímãs permanentes montadas de duas formas com ímãs alinhados e com ímãs inclinados.

Os parâmetros que foram considerados para a análise e comparação entre os dois modelos de geradores foram a quantidade e a qualidade da energia gerada e para isso foram feitas medições do nível de distorções harmônicas, forma de onda, regulação de tensão, sem e com cargas lineares e não-lineares.

4.1 A MÁQUINA FUNCIONANDO COMO GERADOR

4.1.1 Ensaios como gerador

A montagem dos equipamentos de medição e o protótipo a ser avaliado, apresentados pela Figura 33, permitiram a análise do desempenho eletromecânico da máquina atuando como gerador.

Os ensaios consistiram na utilização de um sistema para controlar a velocidade do eixo do gerador a vazio, e com várias cargas, acopladas aos seus terminais. Registraram-se corrente, tensão, frequência, potência ativa, velocidade, torque, fator de potência e nível de distorções harmônicas da tensão (DHT).

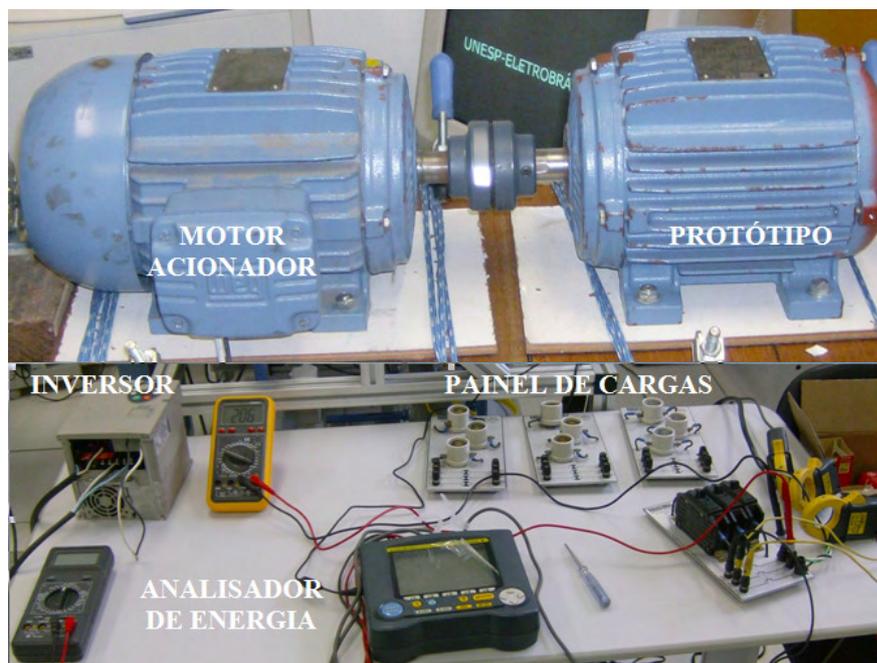


Figura 33 – Montagem da bancada de teste do laboratório de máquinas elétricas

4.1.2 Os materiais para ensaio como gerador

As bancadas usadas para ensaios do protótipo estão localizadas no laboratório LAMOTRIZ – ELETROBRAS do câmpus da UNESP – Guaratinguetá e foram realizados ensaios complementares no laboratório de máquinas elétricas do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) no câmpus da USP e no laboratório de máquinas elétricas da Universidade Federal Fluminense no câmpus de Niterói. Nas bancadas da UNESP e da UFF, acoplou-se o protótipo ao motor de 3CV, por intermédio de um conversor de frequência variou a velocidade do conjunto. Usam-se também os seguintes aparatos de medição e carregamento: analisador de energia (Yokogawa CW 240 e WT 1600), tacômetro, multímetros com medição *True* RMS, alicate amperimétrico e painel simulador de cargas resistivas, indutivas e capacitivas.

4.1.3 Levantamento dos dados experimentais do gerador

Foram realizados os testes das duas configurações, dividindo-se em duas etapas: sem carga e com carga.

Primeiramente, foi preciso realizar o ensaio sem carga com o objetivo de verificar as condições iniciais para comparar posteriormente com a condição do gerador com carga. As condições foram em que velocidade tem-se a frequência nominal e qual é o comportamento do gerador. No ensaio, extrapola-se a rotação até 120% da rotação síncrona.

Posteriormente, o teste com carga é realizado dentro de alguns limites. A condição inicial é que os níveis de tensão e ou frequência ficam na faixa de $\pm 10\%$ do valor nominal, isto é, a faixa de tensão é de 200 a 240V e a faixa da frequência de 53 a 66Hz.

4.1.3.1 Gerador com ímãs alinhados

Foram realizados ensaios sem carga para levantamento da curva da Figura 34, no qual têm-se na frequência nominal 60Hz, 600 rpm, 238 V e percentagem de distorção harmônica total de 16%, com o fechamento das bobinas em triângulo. As formas de onda das tensões nas três fases sem carga podem ser vistas na Figura 35, obtida via analisador de energia Yokogawa CW 240 na frequência nominal.

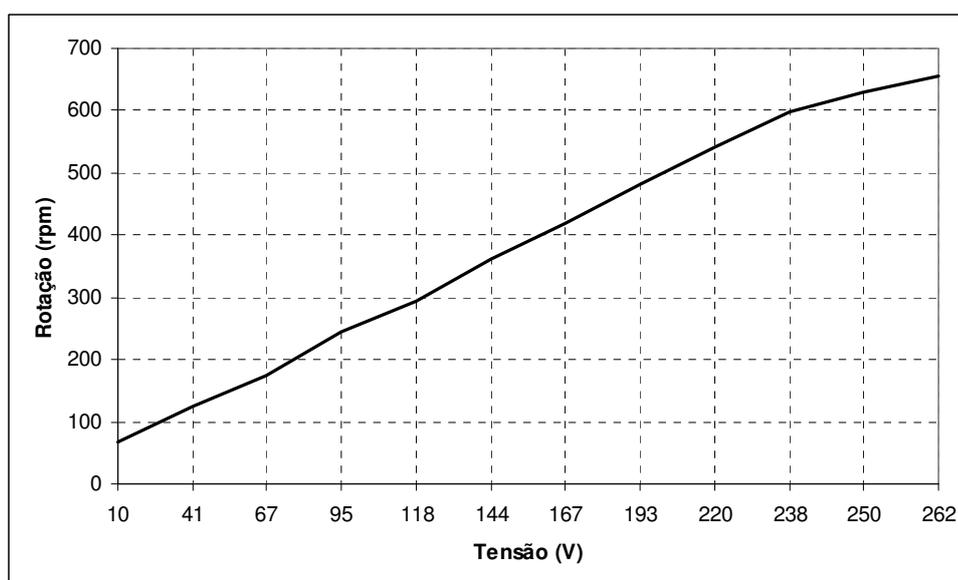


Figura 34 – Rotação *versus* tensão: sem carga para ímãs alinhados

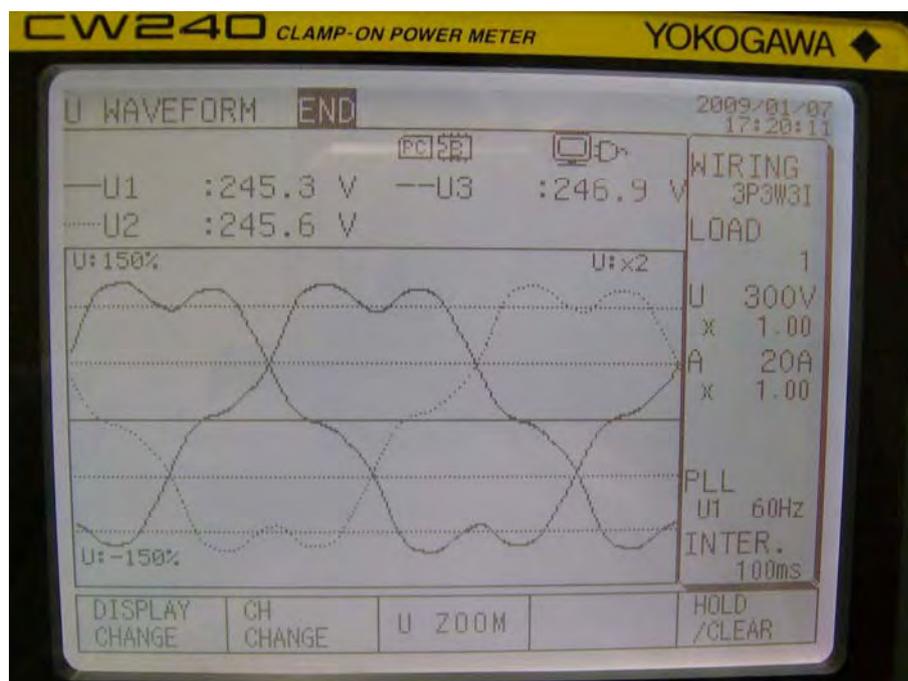


Figura 35 – Formas de onda das tensões nas três fases do gerador com ímãs alinhados sem carga

A Tabela 10 apresenta o ensaio desta configuração, aplicando-se carga (lâmpadas incandescentes).

Tabela 10 – Ensaio do gerador com os ímãs alinhados e com carga

Potência das lâmpadas	Velocidade (rpm)	Tensão (V)	Frequência (Hz)	Corrente (A)	DHT %	Potência trifásica elétrica (W)
0	624	248	63	0	15 - 17	0
60	610	237	62	0,48	15 - 16	197
100	603	231	61	0,78	16,2	312
160	592	221	60	1,24	16,7	475
200	583	215	59	1,51	16 - 18	562
260	573	205	58	1,93	16 - 18	685
300	518	180	52	2,22	16 - 20	692

Pode-se observar, pela Figura 36, que não houve diferença significativa entre as formas de onda das tensões nas três fases com e sem carga.

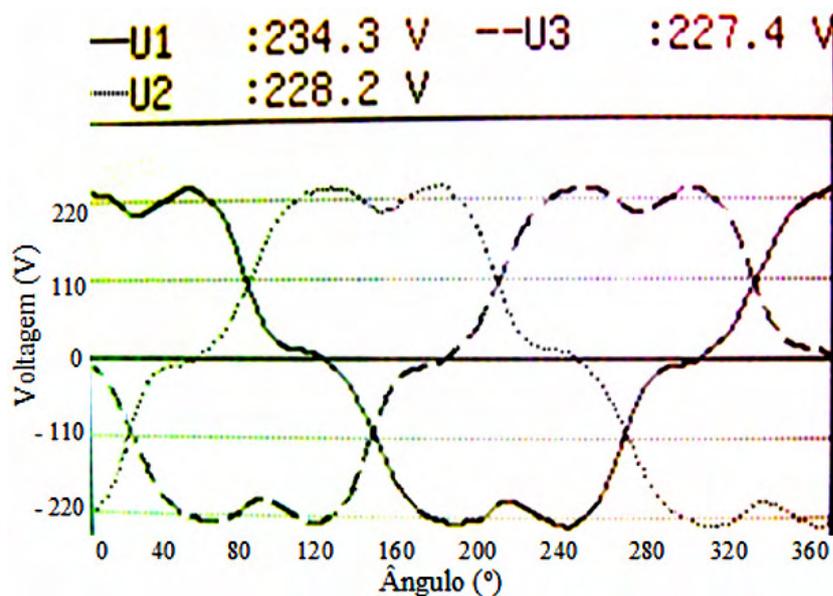


Figura 36 – Formas de onda das tensões nas três fases do gerador com ímãs alinhados com carga de 475W

4.1.3.2 Gerador com ímãs inclinados

Foi obtida a curva da Figura 37, onde se tem na frequência nominal 60Hz, 600rpm, 205V e percentagem de distorção harmônica total de 8% e 7%, respectivamente, para o fechamento das bobinas em triângulo e estrela.

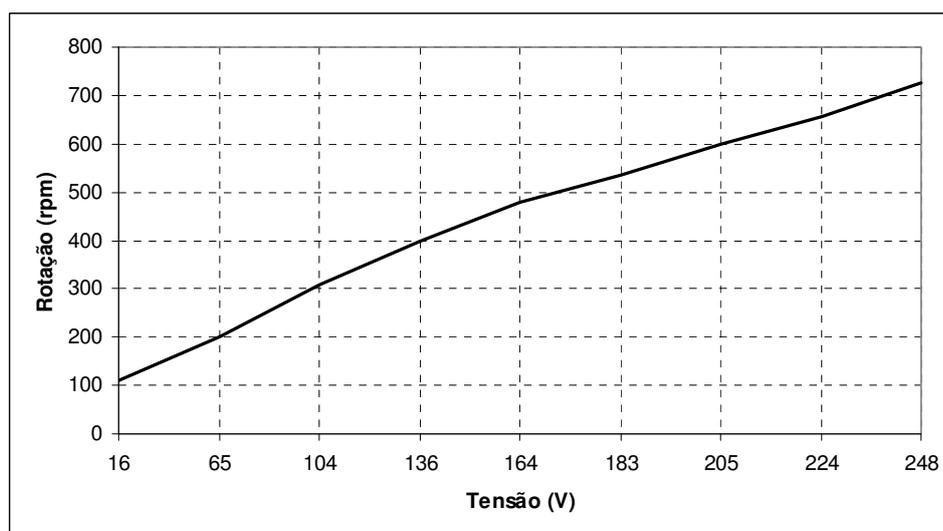


Figura 37 – Rotação *versus* tensão: sem carga para ímãs inclinados

A mesma metodologia utilizada nos ensaios do gerador com ímãs alinhados foi aplicada ao gerador com ímãs inclinados. Assim, as Figuras 38 e 39 apresentam as formas de onda das tensões nas três fases sem e com carga, respectivamente, para o fechamento das bobinas em triângulo. As formas de onda de maior amplitude das Figuras 39 e 41 representam as três tensões e, as menores amplitudes são as formas de onda da corrente. As Figuras 40 e 41 apresentam os resultados com o fechamento das bobinas em estrela, respectivamente, sem e com carga.

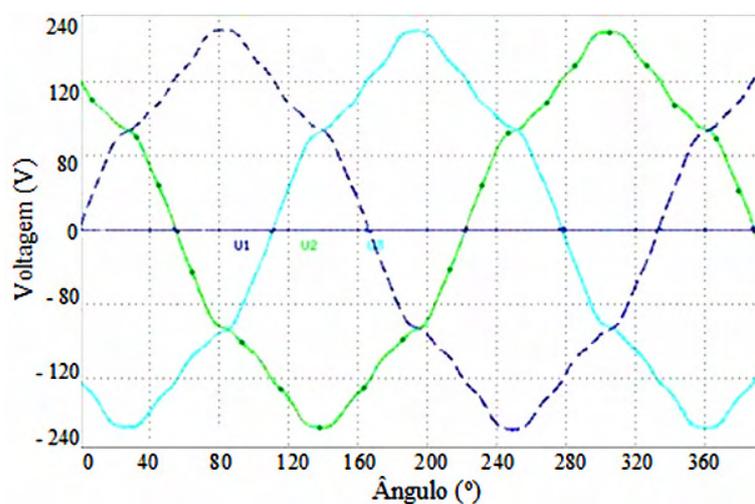


Figura 38 – Formas das ondas das tensões do gerador com ímãs inclinados com fechamento das bobinas em triângulo sem carga

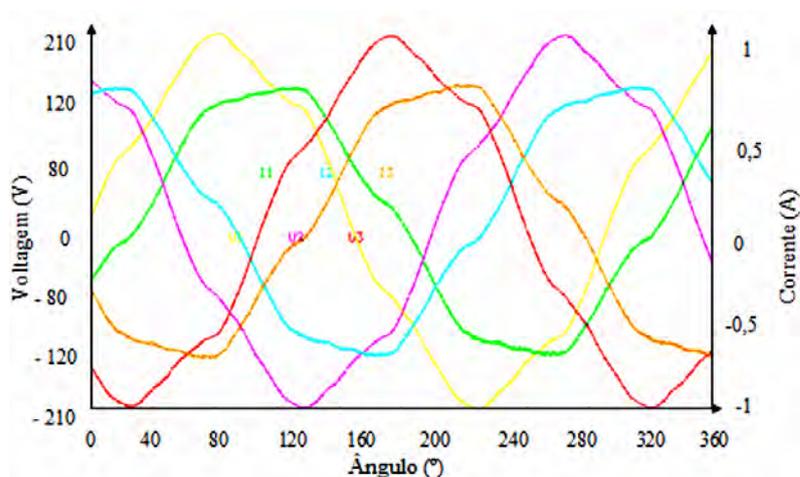


Figura 39 – Formas das ondas das tensões e correntes do gerador com ímãs inclinados com carga e com bobinas fechadas em triângulo

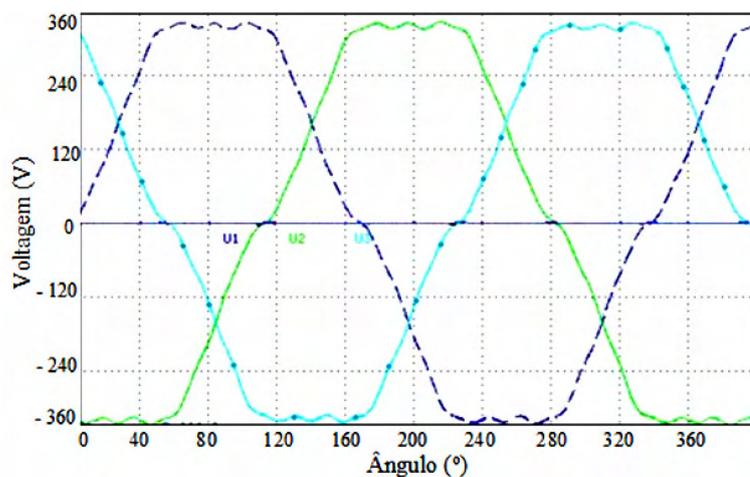


Figura 40 – Formas das ondas das tensões do gerador com ímãs inclinados com fechamento das bobinas em estrela sem carga

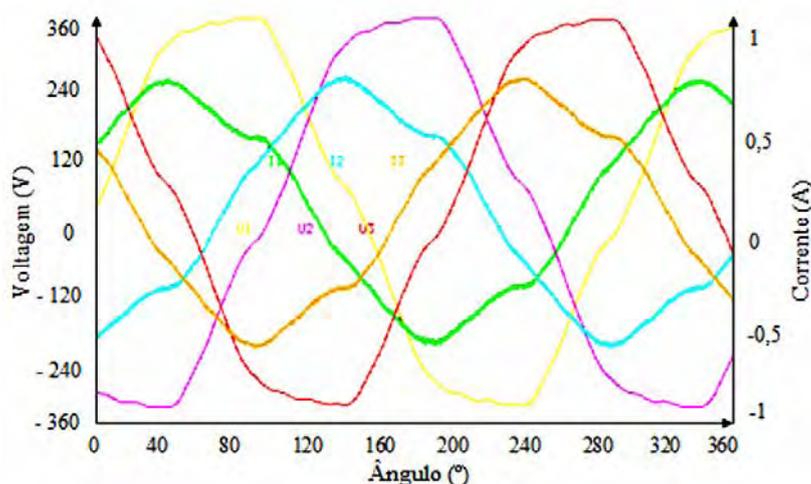


Figura 41 – Formas das ondas das tensões e correntes do gerador com ímãs inclinados com carga e com bobinas fechadas em estrela

A carga aplicada, nas Figuras 39 e 41, foi constituída de três lâmpadas de 100W nominais para os dois tipos de fechamentos em triângulo e em estrela, respectivamente, com tensão de fase em torno de 200V e 360V com a mesma potência trifásica de 237W. A diferença entre os fechamentos foi a redução de 1% no nível de distorção harmônica total para o fechamento em estrela².

² Segundo Hendershot e Miller, 1994 o fechamento das bobinas em estrela de motores e transformadores reduz o nível de distorção harmônica em relação ao fechamento em delta.

A Tabela 11 apresenta o ensaio do gerador sob carga para os ímãs inclinados, realizado nas mesmas condições do ensaio de ímãs alinhados, exceto ter sido realizado um novo ensaio para se verificar qual a máxima potência elétrica suportável pelo protótipo na frequência nominal.

Tabela 11 – Ensaio do gerador com os ímãs inclinados sob carga em triângulo

Potência das lâmpadas	Velocidade (rpm)	Tensão (V)	Frequência (Hz)	Corrente (A)	DHT %	Potência trifásica elétrica (W)
0	706	245	72	0	19 - 45	0
60	697	235	71	0,46	20 - 40	187
100	691	228	69	0,76	11 - 38	300
160	684	217	69	1,2	21 - 40	451
200	677	209	68	1,48	14 - 28	536
260	669	198	67	1,89	11 - 19	648
300	665	185	66	2,23	7 - 12	715
Novo ensaio carga aplicada na frequência nominal						
100	600	195	60	0,7	8	236

4.1.3.3 A análise do gerador com ímãs inclinados para cargas lineares e não-lineares sob o aspecto de regulação de tensão

Estes novos ensaios foram realizados com três diferentes tipos de carga, resistiva, indutiva e capacitiva, os resultados são apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14 respectivamente. O ensaio consistiu em inserir as cargas aos terminais do gerador com fechamento em triângulo, estas cargas foram ligadas em serie e em paralelo com o propósito de se obter o desempenho do gerador com ímãs inclinados para diferentes pontos. A bancada simuladora de carga tem resistores de 500 ohm (Ω) – 100W por fase, indutores de 1,2 henry – 100W por fase e capacitores de 0,000015 faraday – 100W por fase.

A equação (23) apresenta a regulação de tensão em módulo ΔV .

$$\Delta V = \left| \frac{V_i - V_o}{V_o} \right| \quad (23)$$

sendo,

ΔV = regulação de tensão [%]

V_i = tensão medida sob carga [V]

V_o = tensão em condição sem carga [V]

Tabela 12 – Ensaio do gerador com carga resistiva em triângulo

Tipos de ligação	MEDIDOS					CALCULADOS			
	Tensão (V)	Corrente (A)	Fator de Potência	Resistência (Ω)	DHT (%)	Potência trifásica ativa (W)	Potência trifásica reativa (VAr)	Potência trifásica aparente (VA)	Regulação de tensão (%)
Sem carga	200				8,2				
Dois resistores em paralelo	189	0,66	1	250	6,3	215,8	0	215,8	5,5
Um resistor	192,5	0,61	1	500	8	203,1	0	203,1	3,75
Dois resistores em serie	193,2	0,3	1	1000	8,2	100,3	0	100,3	3,4
Três resistores em serie	195	0,19	1	1500	8	64,1	0	64,1	2,5

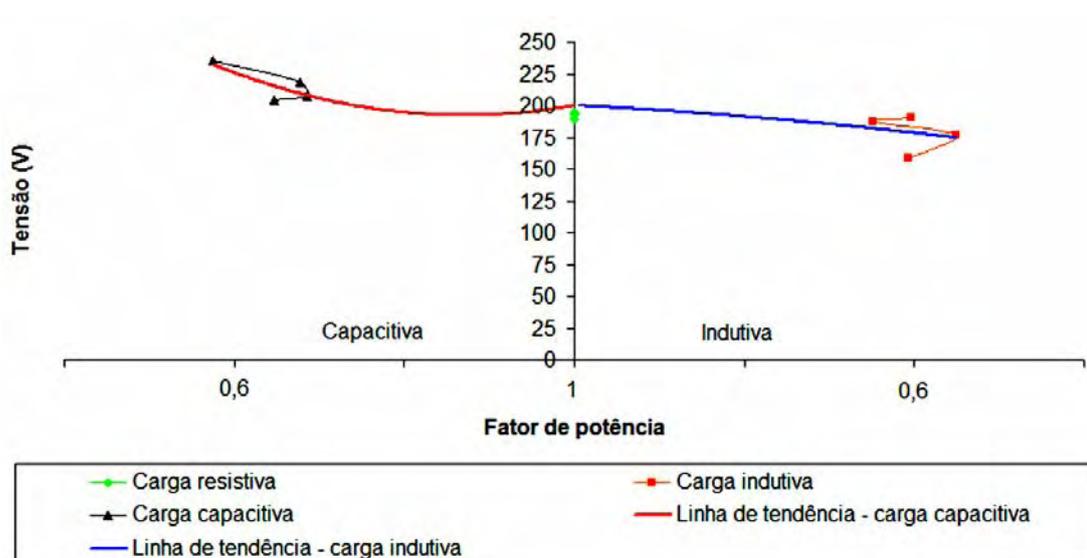
Tabela 13 – Ensaio do gerador com carga indutiva em triângulo

Tipos de ligação	MEDIDOS					CALCULADOS			
	Tensão (V)	Corrente (A)	Fator de Potência	Indutor (henry)	DHT (%)	Potência trifásica ativa (W)	Potência trifásica reativa (VAr)	Potência trifásica aparente (VA)	Regulação de tensão (%)
Sem carga	200				8,2				
Dois indutores em paralelo	159	1,23	0,59	0,6	13	199,6	273,2	338,3	20,5
Um indutor	177	0,65	0,673	1,2	10,9	134,0	147,2	199,0	11,5
Dois indutores em serie	187	0,32	0,527	2,4	9,7	54,6	88,0	103,5	6,5
Três indutores em serie	190,6	0,23	0,595	3,6	9,3	45,1	61,0	75,8	4,7

Tabela 14 – Ensaio do gerador com carga capacitiva em triângulo

Tipos de ligação	MEDIDOS					CALCULADOS			
	Tensão (V)	Corrente (A)	Fator de Potência	Capacitor (faraday)	DHT (%)	Potência trifásica ativa (W)	Potência trifásica reativa (VAr)	Potência trifásica aparente (VA)	Regulação de tensão (%)
Sem carga	200				8,2				
Dois capacitores em paralelo	235	1,53	0,638	0,00003	2	396,8	479,0	622,0	17,5
Um capacitor	218,4	0,71	0,483	0,000015	4	129,6	234,9	268,3	9,2
Dois capacitores em serie	207	0,41	0,471	0,0000075	20	69,2	129,5	146,8	3,5
Três capacitores em serie	203,8	0,29	0,53	0,000005	19,8	54,2	86,7	102,2	1,9

A Figura 42 apresenta um gráfico referente à curva tensão versus fator de potência para quatro diferentes valores de carga resistiva, indutiva e capacitiva. Os resultados das Tabelas 12, 13 e 14 e da Figura 42 afirmam que com a inserção de cargas capacitivas ocorre um aumento gradual da tensão com relação ao aumento da carga e justamente acontece o inverso para as cargas indutivas. Para as cargas resistivas ocorre um moderado decréscimo da tensão com relação ao acréscimo de carga.

Figura 42 – Curva tensão *versus* fator de potência do gerador com rotor de ímãs

4.1.4 Resultados obtidos com o gerador

As duas configurações foram feitas para avaliar o comportamento entre as configurações propostas e a teoria. As análises têm o objetivo de especificar a configuração de melhor desempenho, os pontos importantes e a discrepância entre os resultados experimentais e a teoria.

Na configuração com os ímãs inclinados, os aspectos favoráveis são o baixo torque de travamento na partida, nível de distorção harmônica reduzida (7 e 8% para carga resistiva) no uso de enrolamentos concentrados e razoável regulação de tensão. Segundo o ONS (2009), o requisito mínimo de DHT deverá ser menor do que 3% para um gerador que será conectado ao sistema interligado nacional (SIN) e valores de tensão compreendidos entre 90% e 110% da tensão nominal para o caso de operação do gerador em regime de tensão não nominal e quando for exigido um ótimo controle da tensão em regime permanente o índice permitido é $\pm 0,5\%$ da tensão nominal. Então, pode-se dizer que toda a carga resistiva e boa parte das cargas capacitivas e indutivas, estão dentro da faixa de $\pm 10\%$ da tensão nominal.

O principal aspecto desfavorável, na configuração com os ímãs inclinados, foi a baixa capacidade de geração em relação à outra configuração, confirmando-se a teoria, na qual o projeto revelava possivelmente uma capacidade de tensão gerada em torno de 200V, em virtude da aplicação dos ímãs N35 de remanência inferior ao especificado.

Os aspectos favoráveis para a configuração dos ímãs alinhados não foram encontrados. Esta configuração tem um alto valor de torque de travamento na partida, em torno de $\pm 9,8$ N.m, o que restringe a sua aplicação em microcentrais elétricas.

5. ANÁLISE ECONÔMICA DO PROTÓTIPO COM RELAÇÃO AOS GERADORES SÍNCRONOS CONVENCIONAIS

A avaliação econômica visa à comparação do protótipo atuando como gerador de rotor com ímãs inclinados com relação a dois outros geradores síncronos convencionais de diferentes fabricantes. Espera-se determinar se existe viabilidade na substituição dos geradores síncronos convencionais pela aplicação do protótipo na geração distribuída.

5.1 O CUSTO ESTIMADO DO PROTÓTIPO E DOS OUTROS DOIS GERADORES SÍNCRONOS

A Tabela 15 apresenta a lista de materiais e a mão de obra com seus respectivos custos; tem-se uma estimativa do custo pela manufatura do rotor do protótipo. O processo de fabricação foi artesanal e o ano de 2010 foi à referência para os custos. Evidentemente, esse custo poderá ser reduzido em produção industrial de larga escala.

Tabela 15 – Custo de fabricação do protótipo

Detalhamento	Custo	Considerações
Motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo	R\$ 1.040,00	
Rotor gaiola de esquilo - estimativa	R\$ 436,80	42% do motor completo
Estator - estimativa	R\$ 603,20	58% do motor completo
Ímãs de neodímio	R\$ 296,80	80 peças
Tarugo de aço SAE 1045	R\$ 120,00	
Tarugo de aço SAE 1006 recozido	R\$ 120,00	
Chaveta	R\$ 55,00	
Cola	R\$ 5,00	
Mão de obra para o torno	R\$ 200,00	Quatro horas trabalhadas
Mão de obra para a fresa	R\$ 300,00	Seis horas trabalhadas
Mão de obra para a plaina	R\$ 100,00	Duas horas trabalhadas
CUSTO ESTIMADO DO PROTÓTIPO	R\$ 1.800,00	

O estator do motor de indução trifásico foi aproveitado e seu custo foi estimado em 58% do motor completo. O custo médio da mão de obra foi estimado em R\$50,00 por hora de trabalho nas máquinas ferramentas.

A Tabela 16 apresenta os valores comerciais de dois geradores de diferentes fabricantes e sistemas auxiliares. O sistema de multiplicação de velocidade é composto de polias e correias e o sistema de excitação possui uma bateria de 55 A, um reostato, um controlador de carga e um retificador, esses custos podem ser usados para ambos geradores.

Tabela 16 – Custo dos geradores síncronos e sistemas auxiliares

Detalhamento	Custo (R\$)
Gerador de 0,5 kW, 1800 rpm, 220V, fabricante Equacional	R\$ 6.278,00
Gerador de 0,5 kW, 1800 rpm, 220V, fabricante De Lorenzo do Brasil	R\$ 7.980,00
Sistema para a multiplicação da velocidade de 600 para 1800 rpm	R\$ 230,00
Sistema de excitação – 12VCC	R\$ 380,00

5.2 A ENERGIA COMERCIALIZADA E O RETORNO DO INVESTIMENTO

Inicialmente, considera-se que ambos os geradores são acionados por uma turbina de uma usina hidrelétrica de baixa rotação, com cerca de 600 rpm, em virtude da baixa queda e pequeno volume d'água. Para os cálculos da energia anual gerada pelos geradores síncronos convencionais não foram consideradas perdas pelo multiplicador de velocidade e pela energia consumida para a sua excitação.

Para o retorno de investimento foram consideradas cinco possibilidades para o investimento total, respectivamente, as etapas 1, 2, 3, 4 e 5:

- Etapa 1 – Custo do estator acrescido do custo pela construção do novo rotor com ímãs inclinados, sem margem de lucro;
- Etapa 2 – É o custo da etapa 1 com o acréscimo de 70% de margem de lucro;
- Etapa 3 – É o custo da etapa 1 com o acréscimo de 100% de margem de lucro;
- Etapa 4 – Custo do gerador síncrono, fabricante De Lorenzo do Brasil, acrescidos de um multiplicador de velocidade e um sistema auxiliar para a excitação;
- Etapa 5 – Custo do gerador síncrono, fabricante Equacional, acrescidos de um multiplicador de velocidade e um sistema de auxiliar para a excitação.

A Tabela 17 apresenta os resultados das comparações entre os geradores e o retorno de investimento para cada uma das etapas, aplicando uma taxa de juros com base no método do valor presente líquido. É admitido, nos cálculos do número de horas de utilização por ano, o período de 85% sobre o total de horas por ano e o período de 15% restante é reservado para manutenções programadas. O preço médio da energia de R\$ 0,3433 é o valor praticado pela CCEE (2010).

Tabela 17 – Receita anual pela energia gerada e o retorno de investimento

Condições	Valores
Potência do gerador com ímãs inclinados (W)	250
Potência dos geradores síncronos (W)	500
Número de horas de utilização por ano (h)	7344
Custo médio da eletricidade (R\$)	0,3433
Energia anual gerada pelo gerador com ímãs inclinados (kWh)	1836
Energia anual gerada pelos geradores síncronos (kWh)	3672
Receita anual da energia do gerador com ímãs inclinados (R\$)	630,00
Receita anual da energia dos geradores síncronos (R\$)	1260,00
RETORNO DE INVESTIMENTO – Etapa 1 (anos)	3,8
RETORNO DE INVESTIMENTO – Etapa 2 (anos)	7,5
RETORNO DE INVESTIMENTO – Etapa 3 (anos)	10
RETORNO DE INVESTIMENTO – Etapa 4 (anos)	9,5
RETORNO DE INVESTIMENTO – Etapa 5 (anos)	15

A equação (24) apresenta o retorno de investimento pelo valor presente líquido (VPL).

$$VPL = \sum_{i=1}^n \frac{\text{valores}_i}{(1 + \text{taxa})^i} \quad (24)$$

sendo,

valores = são uma série de futuros pagamentos (valores negativos) e receita (valores positivos) num mesmo intervalo de tempo

taxa = taxa de juros anual desejada

n = número de fluxos de caixa no intervalo de tempo determinado

Na coluna receita *versus* despesas da Tabela 18, os valores negativos significam que a receita anual pela energia gerada menos os juros anuais não foram suficiente para a quitação do investimento inicial. Os valores positivos são referentes aos ganhos e o primeiro valor positivo equivale ao ano quando o investimento obteve o seu retorno. O valor de R\$ 630,00 referente à receita anual da energia do gerador com ímãs inclinados foi aplicado para amortização do investimento nas etapas 1, 2 e 3, já o valor de R\$ 1260,00 foi usado nas etapas 4 e 5.

A análise financeira da Tabela 18 foi realizada até 15 anos, pois é número de anos referentes à vida útil do gerador.

Tabela 18 – Retorno de investimento pela análise por valor presente líquido

	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5	Anos
Investimento inicial	-R\$ 1.800,00	-R\$ 3.000,00	-R\$ 3.600,00	-R\$ 6.888,00	-R\$ 8.590,00	0
	-R\$ 1.237,50	-R\$ 2.437,50	-R\$ 3.037,50	-R\$ 5.763,00	-R\$ 7.465,00	1
	-R\$ 735,27	-R\$ 1.935,27	-R\$ 2.535,27	-R\$ 4.758,54	-R\$ 6.460,54	2
	-R\$ 286,85	-R\$ 1.486,85	-R\$ 2.086,85	-R\$ 3.861,69	-R\$ 5.563,69	3
	R\$ 113,53	-R\$ 1.086,47	-R\$ 1.686,47	-R\$ 3.060,94	-R\$ 4.762,94	4
	R\$ 471,01	-R\$ 728,99	-R\$ 1.328,99	-R\$ 2.345,98	-R\$ 4.047,98	5
	R\$ 790,19	-R\$ 409,81	-R\$ 1.009,81	-R\$ 1.707,63	-R\$ 3.409,63	6
Receita	R\$ 1.075,17	-R\$ 124,83	-R\$ 724,83	-R\$ 1.137,67	-R\$ 2.839,67	7
<i>versus</i>	R\$ 1.329,61	R\$ 129,61	-R\$ 470,39	-R\$ 628,77	-R\$ 2.330,77	8
despesas	R\$ 1.556,80	R\$ 356,80	-R\$ 243,20	-R\$ 174,41	-R\$ 1.876,41	9
	R\$ 1.759,64	R\$ 559,64	-R\$ 40,36	R\$ 231,28	-R\$ 1.470,72	10
	R\$ 1.940,75	R\$ 740,75	R\$ 140,75	R\$ 593,50	-R\$ 1.108,50	11
	R\$ 2.102,46	R\$ 902,46	R\$ 302,46	R\$ 916,91	-R\$ 785,09	12
	R\$ 2.246,84	R\$ 1.046,84	R\$ 446,84	R\$ 1.205,67	-R\$ 496,33	13
	R\$ 2.375,75	R\$ 1.175,75	R\$ 575,75	R\$ 1.463,49	-R\$ 238,51	14
	R\$ 2.490,84	R\$ 1.290,84	R\$ 690,84	R\$ 1.693,69	-R\$ 8,31	15

A Figura 43 apresenta uma análise comparativa entre as etapas com retorno de investimento pelo valor presente líquido, aplicando uma taxa de juros de 12% ao ano, referente à taxa imposta nos empreendimentos de inovação tecnológica (BNDES, 2010).

Não foram consideradas taxas de depreciação sofridas pelos equipamentos já que os geradores analisados estão sujeitos às mesmas condições de trabalho, no entanto, espera-se que os geradores síncronos tenham um custo pela substituição das escovas que alimentam o enrolamento de campo.

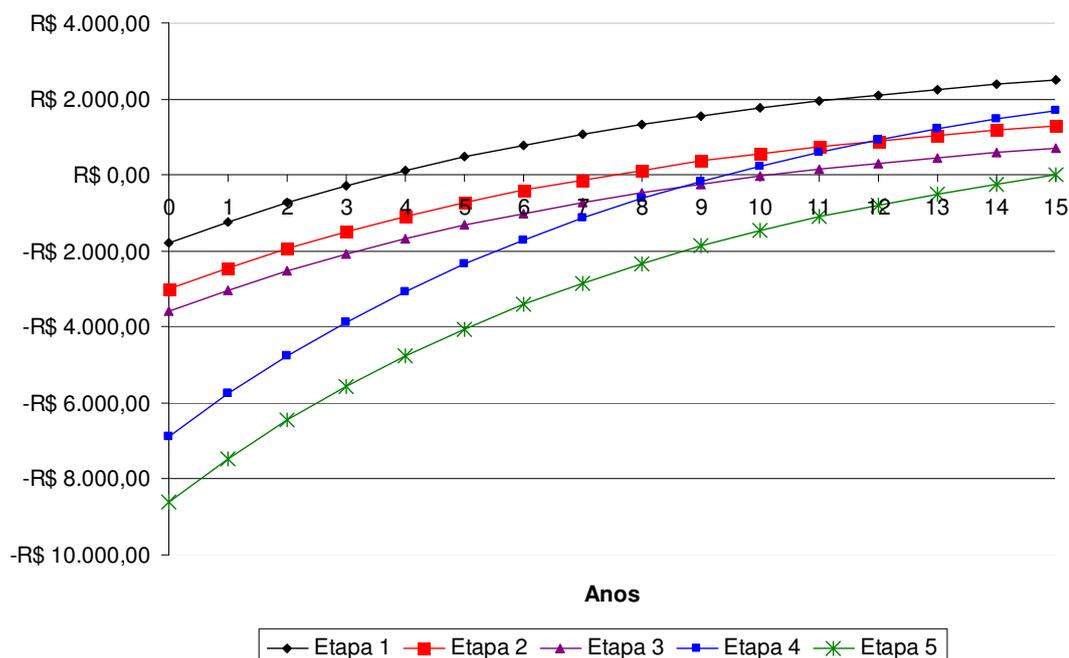


Figura 43 – Análise comparativa entre as etapas com retorno de investimento por valor presente líquido

5.3 RESULTADOS DO RETORNO DE INVESTIMENTO

De acordo com as análises dos dados apresentados, as etapas 1 e 2 possuem o prazo do retorno de investimento de até no máximo a metade da vida útil do gerador, são as melhores situações, contudo, a etapa 2 apresenta uma condição satisfatória tanto para o empreendedor como para o consumidor. O empreendedor fará um pequeno investimento podendo obter um lucro razoável, em torno de 70%, e o consumidor poderá se beneficiar de um gerador com ímãs inclinados de baixo custo em relação aos geradores síncronos.

Em relação aos geradores síncronos outros aspectos técnicos favorecem ao uso do gerador com ímãs inclinados tais como a baixa manutenção, a forma de onda com níveis de distorções harmônicas razoáveis e a regulação de tensão com faixa tolerável, além de não haver necessidade de sistemas auxiliares para a excitação do campo no rotor.

6. CONCLUSÕES

A máquina de rotor com ímãs inclinados é uma opção de máquinas elétricas atuando como gerador com diversos benefícios, tais como a baixa manutenção, sem consumo de energia para a criação do campo magnético no rotor em relação às máquinas síncronas convencionais. O gerador com grande número de polos seguramente eliminará multiplicadores de velocidade, ocasionando um aumento global do rendimento em centrais hidrelétricas, parques eólicos e grupos motores a combustão, simplificação da construção pela modulação e divisão do rotor em blocos.

Há uma grande oportunidade o reaproveitamento das carcaças de motores de indução trifásicos com rotor gaiola de esquilo, já padronizadas, para o projeto das máquinas síncronas com rotor com ímãs inclinados. O reaproveitamento das carcaças significa que não será preciso projetar o pacote das lâminas do estator e seu enrolamento e, conseqüentemente, suas linhas de fabricação em massa com a redução de tempo e seu custo de fabricação.

Este estudo contribuiu com o detalhamento e a revisão dos formulários analíticos, tornando-se num método analítico de fácil entendimento para a especificação dos ímãs permanentes retangulares, abrangendo a técnica de inclinação axial dos ímãs permanentes, para o projeto de conversão de um motor de indução trifásico numa máquina síncrona.

A construção modular do rotor com ímãs inclinados, distribuindo o fluxo magnético ao longo de todo o passo polar, é um processo construtivo de forma a simplificar e reduzir os custos de fabricação. O protótipo fabricado em aço SAE 1006, usinado e fresado é uma vantagem econômica porque o aço SAE 1006 é de menor custo em relação as chapas laminadas de aço silício que constituem o rotor dos geradores síncronos convencionais. O torno e a fresa são máquinas-ferramentas de fácil acesso e operação em oposição à tecnologia das máquinas-ferramentas usadas para o corte a laser das chapas laminadas de aço silício, que são também de custo elevado.

Os ímãs de neodímio retangulares são facilmente construídos e de custo menor em relação aos ímãs em forma de arco. Em contrapartida, tem-se o alto custo do

neodímio, mas pode haver o retorno do investimento, levando-se em conta a economia de energia.

O método de elementos finitos é uma ferramenta computacional de grande valia e apoio ao projeto de máquinas e afins. Neste estudo, segundo o contexto de aplicação experimental, a sua inviabilidade foi devido a softwares adequados e suas versões atualizadas, introdução a equações e condições de contorno mal interpretadas, ocasionando resultados distantes do ideal.

Espera-se que o protótipo desenvolvido oriente e estimule o uso das máquinas de rotor com ímãs de neodímio inclinados em diversas aplicações, sendo uma excelente opção na geração distribuída em pequenas centrais elétricas. Um gerador de dimensões reduzidas, como o protótipo, tem o benefício de facilitar a instalação e o transporte, principalmente, no caso do gerador ser instalado em torres de parques eólicos com grandes alturas. Muitos fabricantes optam pela ferrita para a fabricação de geradores, por questões econômicas, compensando a redução da remanência magnética por passo polar, aumentando o comprimento do gerador; conseqüentemente, também aumenta o peso e o consumo de cobre para o preenchimento do alongamento do estator.

Já os resultados do protótipo com rotor com ímãs alinhados, que tem fluxo magnético concentrado numa parte do passo polar, inviabilizam esse tipo de empreendimento. Apesar de apresentar grande capacidade de geração de energia, há aspectos técnicos desfavoráveis, em virtude da necessidade de grande torque de travamento e nível de distorção harmônica total o dobro em relação aos ímãs inclinados.

7. PESQUISAS FUTURAS

Após os experimentos e análises apresentados nesta Tese, propõe-se para pesquisas futuras que o protótipo seja simulado por elementos finitos, em três dimensões ou em duas dimensões pelo método de fatiamento do tambor do rotor, variando-se o ângulo de inclinação dos ímãs permanentes para verificar a qualidade da energia gerada.

Também desenvolver uma formulação matemática que relacione a inclinação dos ímãs permanentes com o nível de distorção harmônica, na tensão gerada pelos geradores síncronos, com rotor de ímãs permanentes utilizando os enrolamentos concentrados e distribuídos.

Outra sugestão é elaborar um software, baseado no método analítico aplicado, para se determinar as dimensões do ímã permanente, tipo de ímã e do entreferro para a conversão dos motores de indução em geradores síncronos abrangendo potências até 100kW e de 2 até 12 pólos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACESITA. Características magnéticas típicas dos aços silício. Disponível em: <<http://www.acesita.com.br>>. Acesso em: 30/06/2010.

ALNAEMI FARIS INTHAR, MOSES ANTHONY JOHN. FEM modeling of rotor losses in PM motors. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volume 304, March 2006, Pages 794-797.

ALMEIDA, JOSÉ LEANDRO C. N. **Análise da Viabilidade Técnica e Econômica da Implantação de uma Microcentral Hidrelétrica**. 52p. Guaratinguetá SP, 2007 – Dissertação do programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista UNESP. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/>>. Acesso em: 11/09/2008.

ALMEIDA, JOSÉ LEANDRO C. N., SOUZA, TEÓFILO M. de, SOBRINHO, PEDRO M. Desempenho de uma Microcentral Hidrelétrica com Geradores de Ímãs Permanentes. **V Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CLAGTEE)**, 2007.

BNDES. BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/>>. Acesso em: 19/03/2010.

BIANCHI N., BOLOGNANI S. Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors. **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 38(5), pp. 1259-1265, 2002.

CCEE. Câmara de comercialização de energia elétrica. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br/>>. Acesso em: 12/03/2010.

CHABBAN, F. B. Determination of the optimum rotor/stator diameter ratio of permanent magnet machines. **Electrical Machine Power System**. vol. 22, pp. 521–531, 1994.

CHABU, I. C., SILVA, V. C., NABETA, S. I ., AFONSO, M. A. M., CARDOSO, J. R. Axial flux concentration technique applied to the design of permanent magnet motors: theoretical aspects and their numerical and experimental validation. **International Electric Machines and Drives Conference**, San Antonio, 2005, pg 1988-1994.

CHAPMAN, J. STEPHEN. **Electric Machinery Fundamentals**. Third edition, 1999. Publicado por Mcgraw-Hill.

CISTELECAN, M.V.; POPESCU, M. Study of the Number of Slots/Pole Combinations for Low Speed Permanent Magnet Synchronous Generators. **Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International Volume 2**, 3-5 May 2007, page(s):1616 – 1620.

COEY, J.M.D. Permanent magnet applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volumes 248, 2002, Pages 441–456.

ELOSEGUI, I.; MARTINEZ-ITURRALDE, M.; RICO, A.G.; FLOREZ, J.; ECHEVERRIFA, J.M.; FONTAN, L. Analytical design of synchronous permanent magnet motor/generators. **Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on** 4-7 June 2007, Page(s): 1165 – 1170.

ENOKIZONO MASATO, TAKASHI TODAKA, YUJI TSUCHIDA, ATSUSI IKARIGA, SHINYA URATA, TOHRU MAUCHI, AKIRA UMEDUKI, KENICHI EBIHARA, HIROSHI SHIODUKI, HIROYASU SHIMOJI, YASUHIRO GOTHO, MUTSUNORI OBATA, YUKIHITO KIDO. Development of high density and high

efficiency machines. **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 181, 2007, Pages 110-114.

ESKANDER, MONA N. Neural network controller for a permanent magnet generator applied in a wind energy conversion system. **Renewable Energy**. 2002. Vol 26. Pages 463-477.

FERRAZ, CARLOS ALBERTO MEDON DIAS. **Contribuição ao estudo do motor síncrono de relutância com gaiola**. Dissertação, 148p, 2002, Universidade estadual de campinas, Faculdade de engenharia elétrica e de computação, departamento de sistemas e controle de energia. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/>>. Acesso em: 14/08/2008.

FITZGERALD, A. E., KUSKO, A., KINGSLEY, C. Jr. **Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência**. Editora Mcgraw-Hill do Brasil Ltda, 6ª edição, Pernambuco, 2006.

GIERAS JACEK F., WING, MITCHELL. **Permanent magnet motor technology**. Editora Marcel Dekker, New York, 1997.

GUO Y.G., ZHU J.G., RAMSDEN V.S. Design and construction of a single phase claw pole permanent magnet motor using composite magnetic material. **Renewable Energy**. 2001. Vol 22. Pages 185-195.

HANITSCH, ROLF. Electromagnetic machines with Nd-Fe-B magnets. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volume 80, Issue 1, 1 August 1989, Pages 119-130.

HANSELMAN, DUANE C. **Brushless Permanent Magnet Motor Design**. USA, University of Maine Orono. Second edition, 2006. Publicado por The Writers' Collective.

HENDERSHOT, J.R., MILLER, T.J.E.. **Design of brushless permanent-magnet motors**. Hillsboro, OH Oxford Magna Pysics Pub. Clarendon Press, 1994.

HWANG C. C., CHANG S. M., PAN C. T., CHANG T. Y.. Estimation of parameters of interior permanent magnet synchronous motors. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volume 239, Issues 1-3, February 2002, Pages 600-603.

HWANG C. C., CHANG C. M., CHENG S. P., CHAN C. K., PAN C. T., CHANG T.. Comparison of performances between IPM and SPM motors with rotor eccentricity. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volume 282, May 2004, Pages 360-363.

HWANG C. C., LIU C. T., TENG C. C.. Design and analysis of a novel inset permanent magnet synchronous motor. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volume 320, February 2008, Pages 283-286.

IMAG – INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE ELETRÔNICOS LTDA. Disponível em: <<http://www.imag.ind.br>>. Acesso em: 22/10/2008.

ISLAM, R.; HUSAIN, I.; FARDOUN, A.; MCLAUGHLIN, K. Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs With Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction. **Industry Applications, IEEE Transactions on**, Volume 45, Issue 1, Jan.-feb. 2009, page(s): 152 – 160,

JAHNS, THOMAS M., SOONG, WEN L. Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives – A Review. **IEEE transactions on industrial electronics**, Vol. 43, N. 2, APRIL 1996, Page(s): 321 – 330.

KALOKIRIS G.K., KLADAS A.G., HATZILAU I.K., COFINAS S., GYPARIS I.K. Advances in magnetic materials and their impact on electric machine design. **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 181, 2007, Pages 148 – 152.

KOSOW, IRVING L. **Máquinas Elétricas e Transformados**. Editora Globo, 12^a edição, São Paulo, 1996.

LANDGRAF, FERNANDO JOSÉ GOMES. Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de S.Paulo**, p109-128. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/>>. Acesso em: 11/09/2008.

LESTER R. MOSKOWITZ. **Permanent magnet design and application handbook**. United States of América – Florida, Malabar, Robert. E. Krieger publishing company, Inc. Reprint, 1986.

MANUAL GAUSSMETER LAKESHORE 421. Disponível em: <<http://www.lakeshore.com/mag/ga/gm421dn.html>>. Acesso em: 22/10/2008.

MARTIGNONI, ALFONSO. **Ensaio de máquinas elétricas**. Editora Globo, 2^a edição, Rio de Janeiro, 1987.

MUÑOZ TOLEDO, NARDO. **Cálculo de enrolamentos de máquinas elétricas e sistemas de alarme**. Editora Biblioteca técnica Freitas Bastos, 4^a edição, Rio de Janeiro, 1987.

OLIVEIRA A. M., P. KUO-PENG, N. SADOWSKI, P. DULAR. Consideração dos efeitos de inclinação de ranhuras nos problemas acoplados. V Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, CBMag 2002. **Revista Ciência & Engenharia**, p 31-36, 2002. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/>>. Acesso em: 28/08/2008.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELETRICO. Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes. 30p, 2009. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 10/06/2010.

SAWETSAKULANOND, B.; KINNARES, V. Investigation of skew effect on the Performance of Self - Excited Induction Generators. **Power Electronics and Drive Systems, 2007. 7th International Conference on 27-30 Nov. 2007**, page(s):1167 – 1173.

STUMBERGER BOJAN, STUMBERGER GORAZD, MIRALEM HADŽISELIMOVIĆ, HAMLER ANTON, TRLEP MLADEN, VIKTOR GORIČAN, MARKO JESENIK. High-performance permanent magnet brushless motors with balanced concentrated windings and similar slot and pole numbers. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volume 304, March 2006, Pages 829-831.

STUMBERGER BOJAN, STUMBERGER GORAZD, MIRALEM HADŽISELIMOVIĆ, HAMLER ANTON, GORIČAN VIKTOR, MARKO JESENIK, MLADEN TRLEP. Comparison of torque capability of three-phase permanent magnet synchronous motors with different permanent magnet arrangement. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Volume 316, February 2007, Pages 261-264.

TEIXEIRA, FERNANDO HENRIQUE PISANI. **Metodologia para projeto, construção e ensaios em máquinas síncronas de ímãs permanentes – MSIP**. Dissertação, 142p, 2006, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/>>. Acesso em: 12/06/08.

WEG. Disponível em: <<http://www.weg.com.br/>>. Acesso em: 08/08/2008.

YAMADA, A.; KAWANO, H.; MIKI, I.; NAKAMURA, M. A Method of Reducing Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. **Power Conversion Conference - Nagoya**, April 2007, pages: 322 – 325.

APÊNDICE A – DOCUMENTO COM DADOS FORNECIDOS PELA WEG

Correspondência eletrônica com os dados do enrolamento fornecido pela fabricante de motores WEG.

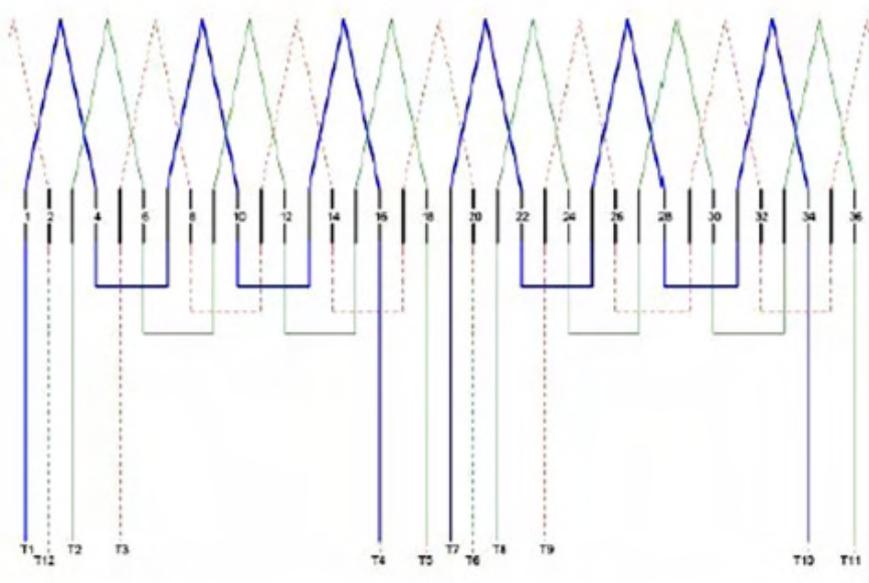
 UOL Webmail

●  **Esquema de ligação**

De:
Para: leandrocasanova@bol.com.br
Cópia:
Assunto: Esquema de ligação
Data: 15/09/2008 14:20
 Outlook.jpg 35.72 KB

Boa tarde Leandro,

Conforme vossa solicitação para auxílio na sua tese de doutorado.



The diagram illustrates a 36-slot, 11-pole motor winding layout. The stator slots are numbered 1 through 36. The poles are labeled T1 through T11. The diagram shows the connection paths for the windings, with solid lines representing the main winding and dashed lines representing auxiliary or reference windings. The connections are arranged in a regular, repeating pattern across the 36 slots.

Atenciosamente,

Assistência Técnica
Fone: (47) 3276-4085 Fax: (47) 3276-4180
WEG Equipamentos Elétricos S.A. - Motores
www.weg.net

APÊNDICE B – MEDIDOR DE REMANÊNCIA

O aparelho Lakeshore 421, apresentado pela Figura 44, tem a finalidade de medir um campo magnético permanente, como os ímãs e também um campo magnético gerado por corrente contínua ou corrente alternada como as máquinas elétricas. Este equipamento tem a capacidade de medição campo magnético abrangendo de 300 mG (0,00003 Teslas) até 300 kG (30 Teslas), em três faixas de ajustes, reduzindo o erro, conforme apresentado pela Tabela 19.



Figura 44 – Aparelho Lakeshore 421 – Fonte: Manual gaussmeter Lakeshore 421

A Figura 45 apresenta a ponta de prova do aparelho Lakeshore 421 e a posição da ponteira para medir o campo magnético que é transversal ao fluxo.

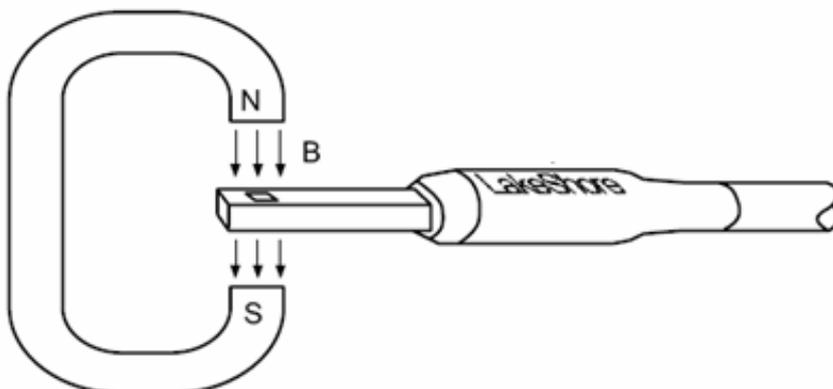


Figura 45 – Ponta de prova – Fonte: Manual gaussmeter Lakeshore 421

Tabela 19 – Faixas de ajustes e medição do campo magnético pelo aparelho Lakeshore

Faixas	Resolução CC com filtro	Resolução CC sem filtro	Resolução CA RMS
HST Probe 300 kG 30 kG 3 kG 300 G	0.01 kG 0.001 kG 0.0001 kG 0.01 G	0.1 kG 0.01 kG 0.001 kG 0.1 G	0.1 kG 0.01 kG 0.001 kG 0.1 G
HSE Probe 30 kG 3 kG 300 G 30 G	0.001 kG 0.0001 kG 0.01 G 0.001 G	0.01 kG 0.001 kG 0.1 G 0.01 G	0.01 kG 0.001 kG 0.1 G 0.01 G
UHS Probe 30 G 3 G 300 mG	0.001 G 0.0001 G 0.01 mG	0.01 G 0.001 G 0.1 mG	0.01 G 0.001 G 0.1 mG

Fonte: Manual gaussmeter Lakeshore 421

APÊNDICE C – ENSAIOS DO PROTÓTIPO COMO MOTOR

Os ensaios consistiram na utilização de um freio-eletrodinâmico, apresentado pela Figura 46, equipamento capaz de variar e controlar a carga mecânica inserida no eixo do protótipo, na velocidade síncrona. Obteve-se por meio de instrumentos destinados à medição, a corrente, tensão, frequência, potência ativa, velocidade, fator de potência e o torque.

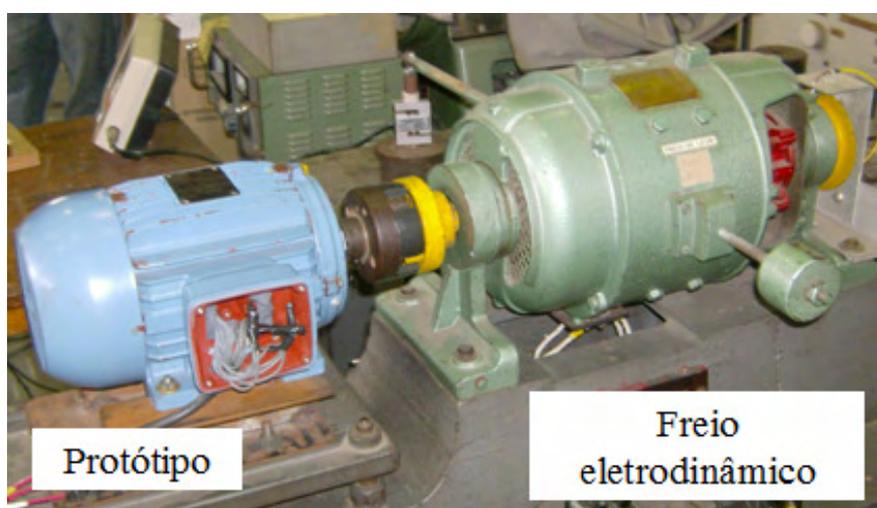


Figura 46 – Simuladora de cargas na ponta do eixo do motor

C. 1 OS MATERIAIS PARA O ENSAIO COMO MOTOR

Os ensaios do protótipo foram realizados no laboratório de máquinas elétricas do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) no câmpus da USP. Na bancada acoplou-se o protótipo ao medidor de torque. O protótipo foi acionado por intermédio de um conversor de frequência com forma de onda PWM, com o intuito de avaliar o comportamento da máquina. Foram usados os sistemas de medição: analisador de energia (Yokogawa WT 1600), célula de carga, tacômetro, multímetros, variac e alicate amperimétrico.

C.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS DO MOTOR

Foram realizados os testes das duas configurações do rotor com blocos dos ímãs inclinados e alinhados e comparados aos dados nominais do motor.

Primeiramente, foi preciso realizar a partida da máquina como motor lentamente, com auxílio de um conversor de frequência com o objetivo de verificar a resposta com relação ao sincronismo, trepidação, instabilidades e consumo de energia. Nesse ensaio extrapola-se a rotação em até 120% da rotação síncrona.

Posteriormente, o teste foi realizado com a máquina funcionando na velocidade síncrona com carga. Inseriu-se a carga mecânica no eixo através do freio-eletrodinâmico com o objetivo de se determinar a condição de melhor rendimento. O ensaio foi realizado até a corrente nominal do motor de 3,7 A (220V), porque é a condição que se teve o torque nominal.

Por último, foram feitos testes com velocidade acima da nominal e com carga para verificar o comportamento do motor após a frequência nominal.

C.3 O MOTOR COM ÍMÃS INCLINADOS

O primeiro teste consistiu na partida sem carga através do conversor de frequência com rampa de aceleração lenta e rápida. Não ocorreram dificuldades, apresentando boa resposta na partida e adequado controle de velocidade.

O segundo teste verificou a corrente de partida sem carga, comparando o protótipo com rotor ímãs inclinados e o rotor gaiola de esquilo, respectivamente, obtendo-se 2 A e 7 A, significando que a corrente de partida através do conversor na frequência de 60Hz é reduzida e menor do que a própria corrente nominal.

Posteriormente, foram realizados ensaios para a obtenção das características elétricas do rotor com ímãs inclinados e do rotor gaiola de esquilo. As Figuras 47, 48 e 49 apresentam os gráficos comparativos.

Na corrente nominal, verificou-se, pela Figura 47, que o torque é 15,3 N.m e 6,5 N.m, respectivamente o rotor de ímãs inclinados e o rotor gaiola de esquilo. Notou-se que ambas as curvas de torque são lineares.

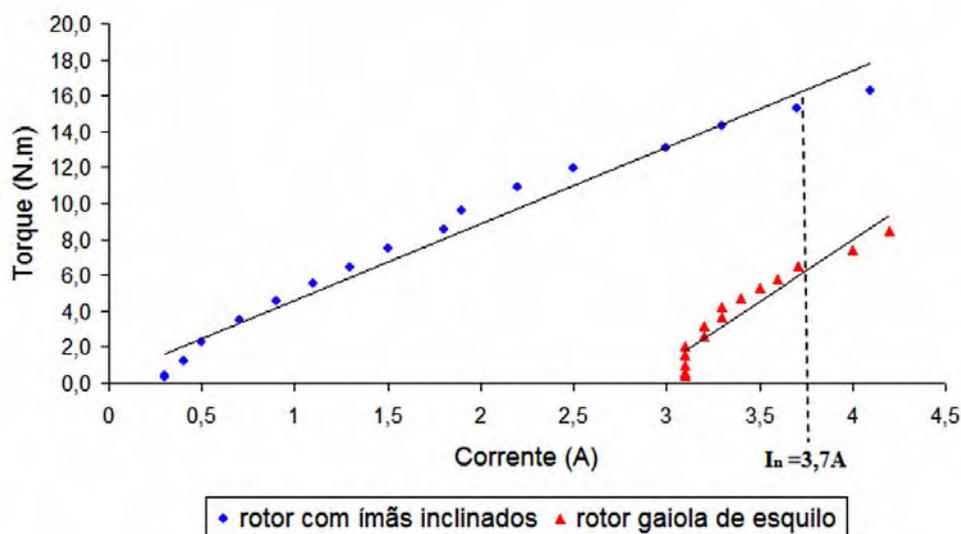


Figura 47 – Torque *versus* corrente

A Figura 48 apresenta o ponto de melhor operação do rotor com ímãs inclinados, referente ao rendimento de 86%, correspondendo ao torque de 6,5 N.m, valor equivalente ao torque nominal do rotor gaiola de esquilo. A curva de rendimento para o rotor com ímãs inclinados foi estabilizada com torque acima de 20% do torque nominal (3 N.m) em comparação com a curva em forma de parábola do rotor gaiola de esquilo.

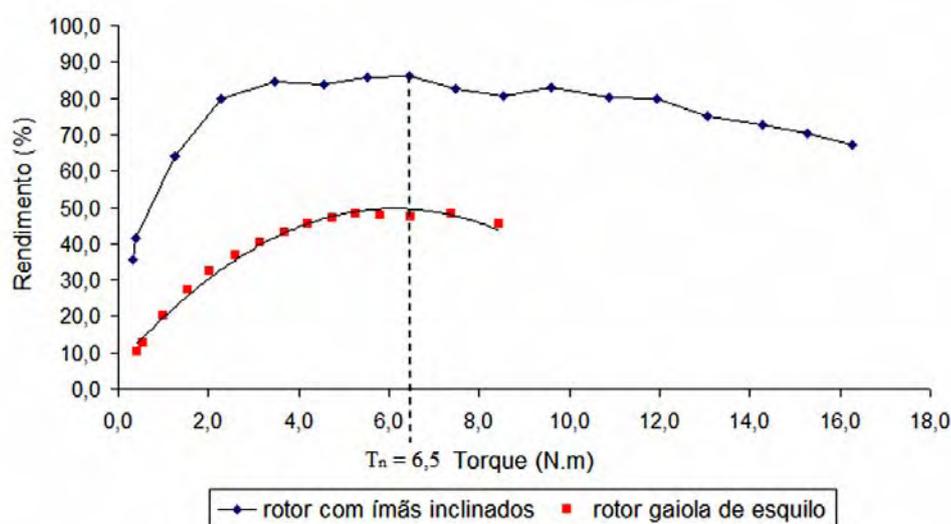


Figura 48 – Rendimento *versus* torque

A Figura 49 apresenta o comportamento do fator de potência com a carga. Observou-se que a curva para o rotor gaiola de esquilo é linear. Para o rotor com ímãs inclinados, os valores do fator de potência praticamente não se alteraram em valores de torque acima de 3 N.m (20% do torque nominal do rotor com ímãs inclinados).

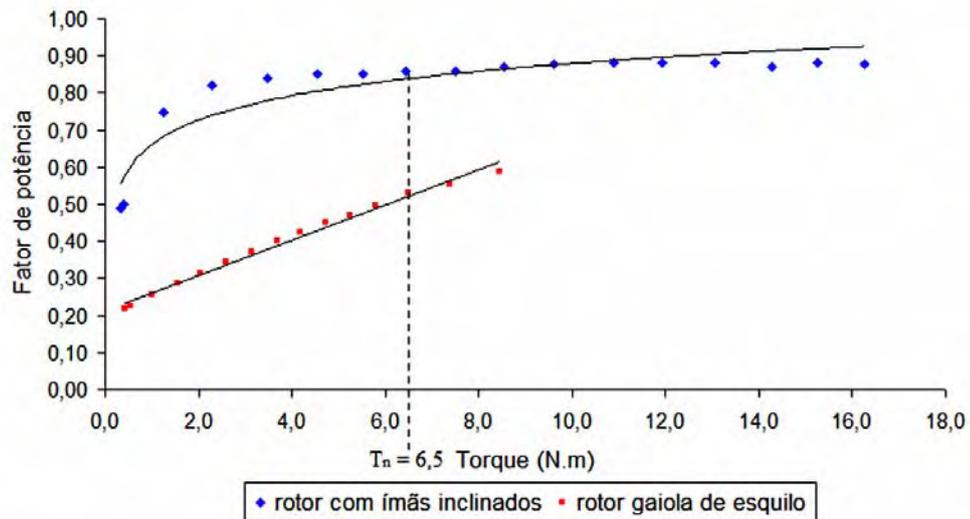


Figura 49 – Fator de potência *versus* torque

Apresentam-se as Tabelas 20 e 21 referente aos resultados pelos ensaios do protótipo atuando como motor, respectivamente, com rotor gaiola de esquilo e rotor com ímãs inclinados.

Tabela 20 – Resultado do ensaio do motor com rotor gaiola de esquilo

Número de pontos	Peso (kg)	Velocidade (rpm)	Velocidade (rad/s)	Torque (N.m)	Corrente da linha (A)	Tensão da linha (V)	Fator de potência	Potência elétrica medida (W)	Potência mecânica (W)	Rendimento
1	1,59	495,5	51,89	8,44	4,2	220	0,59	965	438	45,4
2	1,39	522,5	54,72	7,38	4	221	0,55	839	404	48,1
3	1,22	537,5	56,29	6,49	3,7	221	0,53	770	365	47,4
4	1,09	546,9	57,27	5,80	3,6	221	0,50	695	332	47,8
5	0,99	552,9	57,90	5,25	3,5	221	0,47	632	304	48,1
6	0,89	558,9	58,53	4,74	3,4	221	0,45	591	278	47,0
7	0,79	564,6	59,12	4,19	3,3	221	0,42	546	248	45,4
8	0,69	569,6	59,65	3,68	3,3	221	0,40	510	220	43,1
9	0,59	574,7	60,18	3,13	3,2	221	0,37	466	188	40,4
10	0,49	579,7	60,71	2,58	3,2	221	0,34	425	157	36,9
11	0,38	584,4	61,20	2,04	3,1	221	0,31	385	125	32,4
12	0,29	588,5	61,63	1,55	3,1	221	0,29	350	96	27,3
13	0,19	592,9	62,09	1,00	3,1	221	0,26	307	62	20,3
14	0,10	596,4	62,46	0,55	3,1	221	0,23	269	35	12,8
15	0,08	597,8	62,60	0,43	3,1	221	0,22	263	27	10,3

Tabela 21 – Resultado do ensaio do motor com rotor com ímãs inclinados

Número de pontos	Peso (kg)	Velocidade (rpm)	Velocidade (rad/s)	Torque (N.m)	Corrente da linha (A)	Tensão da linha (V)	Fator de potência	Potência elétrica medida (W)	Potência mecânica (W)	Rendimento
1	3,06	600	62,83	16,27	4,1	241	0,88	1518	1022	67
2	2,87	600	62,83	15,27	3,7	241	0,88	1364	959	70
3	2,69	600	62,83	14,28	3,3	242	0,87	1234	897	73
4	2,46	600	62,83	13,06	3	244	0,88	1095	820	75
5	2,24	600	62,83	11,92	2,5	245	0,88	936	749	80
6	2,05	600	62,83	10,88	2,2	245	0,88	850	684	80
7	1,81	600	62,83	9,60	1,9	245	0,88	726	603	83
8	1,61	600	62,83	8,54	1,8	243	0,87	664	537	81
9	1,41	600	62,83	7,49	1,5	243	0,86	569	471	83
10	1,21	600	62,83	6,43	1,3	242	0,86	470	404	86
11	1,04	600	62,83	5,53	1,1	241	0,85	405	347	86
12	0,86	600	62,83	4,55	0,9	240	0,85	341	286	84
13	0,65	600	62,83	3,48	0,7	240	0,84	258	218	85
14	0,43	600	62,83	2,28	0,5	240	0,82	179	143	80
15	0,23	600	62,83	1,24	0,4	239	0,75	122	78	64
16	0,07	600	62,83	0,39	0,3	240	0,50	59	24	41
17	0,06	600	62,83	0,33	0,3	240	0,49	59	21	36

Por fim, foi realizado um último ensaio, apresentado na Figura 50, com o objetivo de se verificar o comportamento do rotor com ímãs inclinados com carga em frequência superior a nominal, aplicando-se carga constante de 6 N.m, valor referente ao torque nominal do rotor gaiola de esquilo. Observou-se o pleno funcionamento até 112Hz, onde atingiu a corrente nominal.

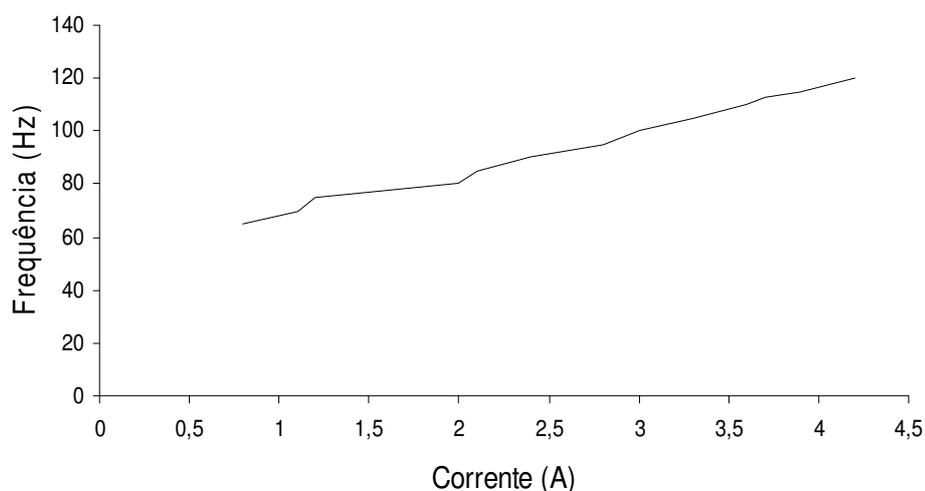


Figura 50 – Curva extrapolada com torque constante (rotor com ímãs inclinados)

C.4 O MOTOR COM ÍMÃS ALINHADOS

Os testes de partida sem carga apresentaram acentuadas trepidações em frequências abaixo de 15 Hz; sendo assim, desfavoráveis em partida com carga.

Por último, extrapolou-se a frequência sem carga obtendo-se a corrente nominal a 72 Hz (120% da frequência nominal); este resultado indicou um comportamento inaceitável, porque esta configuração, o rotor apresentou seu eixo muito bloqueado e a sua instabilidade na partida dificultou a realização dos ensaios.

C.5 RESULTADOS OBTIDOS

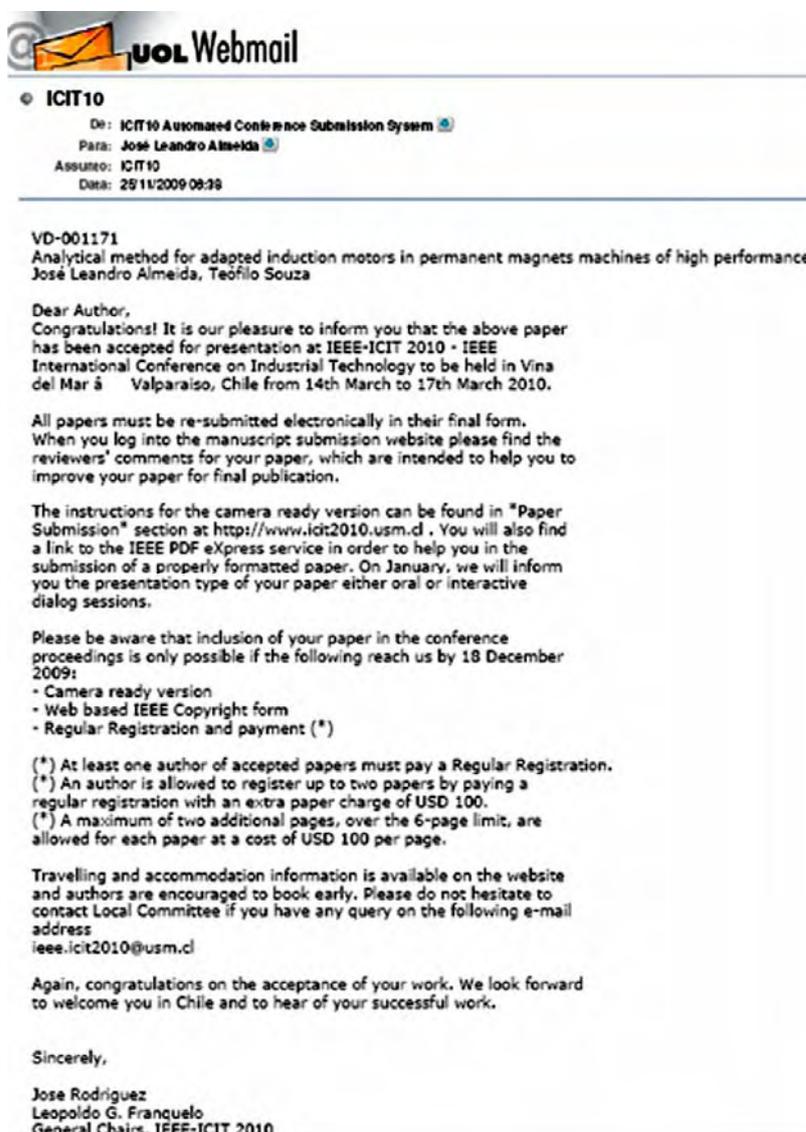
De uma forma geral, os resultados experimentais comprovaram que a melhor configuração é a dos blocos de ímãs inclinados em relação aos blocos de ímãs alinhados. Estes resultados também determinam um desempenho superior ao rotor gaiola de esquilo.

A máquina funcionando como motor com ímãs inclinados têm muitas características favoráveis, tais como a partida com e sem carga sem anomalias consideráveis, baixa corrente de partida, alta relação torque com o de volume e o torque com 240%, fator de potência de 166% e rendimento de 148% maiores em relação ao rotor gaiola de esquilo. Verificou-se, também, o pleno funcionamento sem carga até 120Hz. A dificuldade para este protótipo é a impossibilidade de sua partida e funcionamento direto na rede; em compensação, podem ser usados conversores de frequência convencionais.

A máquina com ímãs alinhados tem o agravante de ter seu eixo bloqueado e grandes trepidações na partida. O eixo travado significa que, nesta configuração com enrolamentos concentrados, existe um torque de partida elevado podendo ser minimizado com a inclinação dos ímãs, já estudado.

APÊNDICE D – ARTIGO E SEUS RESPECTIVOS ACEITES

O artigo desenvolvido a partir da tese atesta seu ineditismo, comprovado pelos aceites em três congressos internacionais. O artigo foi publicado no congresso *internacional conference on industrial technology* (ICIT-IEEE³) em março de 2010 e aceito na conferência *power electronics, machines and drives* (PEMD) em abril 2010 e no simpósio *internacional symposium on industrial electronics* (ISIE-IEEE) em julho 2010.



UOL Webmail

ICIT10
 De: ICIT10 Automated Conference Submission System
 Para: José Leandro Almeida
 Assunto: ICIT10
 Data: 25/11/2009 09:38

VD-001171
 Analytical method for adapted induction motors in permanent magnets machines of high performance
 José Leandro Almeida, Teófilo Souza

Dear Author,
 Congratulations! It is our pleasure to inform you that the above paper has been accepted for presentation at IEEE-ICIT 2010 - IEEE International Conference on Industrial Technology to be held in Vina del Mar - Valparaíso, Chile from 14th March to 17th March 2010.

All papers must be re-submitted electronically in their final form. When you log into the manuscript submission website please find the reviewers' comments for your paper, which are intended to help you to improve your paper for final publication.

The instructions for the camera ready version can be found in "Paper Submission" section at <http://www.icit2010.usm.cl>. You will also find a link to the IEEE PDF eXpress service in order to help you in the submission of a properly formatted paper. On January, we will inform you the presentation type of your paper either oral or interactive dialog sessions.

Please be aware that inclusion of your paper in the conference proceedings is only possible if the following reach us by 18 December 2009:

- Camera ready version
- Web based IEEE Copyright form
- Regular Registration and payment (*)

(*) At least one author of accepted papers must pay a Regular Registration.
 (*) An author is allowed to register up to two papers by paying a regular registration with an extra paper charge of USD 100.
 (*) A maximum of two additional pages, over the 6-page limit, are allowed for each paper at a cost of USD 100 per page.

Travelling and accommodation information is available on the website and authors are encouraged to book early. Please do not hesitate to contact Local Committee if you have any query on the following e-mail address:
ieee.icit2010@usm.cl

Again, congratulations on the acceptance of your work. We look forward to welcome you in Chile and to hear of your successful work.

Sincerely,
 Jose Rodriguez
 Leopoldo G. Franquelo
 General Chairs, IEEE-ICIT 2010

³ IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos



● **PEMD 2010: Notification of Acceptance**

De: Eventsa1@theiet.org
Para:
Assunto: **PEMD 2010: Notification of Acceptance**
Data: 27/11/2009 15:09

Dear Author

Thank you for submitting your abstract (0008) entitled 'ANALYTICAL METHOD FOR THE DESIGN OF THE SKEWED PERMANENT MAGNETS MOTOR OF HIGH PERFORMANCE' to PEMD 2010. The contributions have now been reviewed by the Organising Committee and I am pleased to advise you that your abstract has been accepted as a poster presentation at the conference.

The precise timings for the conference are currently being finalised, and we will inform you when the programme is available on the web.

We would now like you to prepare your full paper and submit this no later than Friday, 29 January 2010. The full paper will then be briefly reviewed by the Organising Committee and if there are any further comments on your final submitted paper, these will be forwarded onto you shortly after this deadline.

You will find any reviewer comments which have been made by the committee on the online submission system. To view the comments simply log in to the online system.

Please note that the full paper template and guidelines are available on the PEMD 2010 website and should be adhered to. Please be aware that any full papers submitted over 6 pages will be automatically withdrawn from the conference.

Papers will be published in the conference proceedings from the author-supplied 'camera-ready' copy. Original material must be provided in all cases and the paper must be in the form of a PDF document. You are reminded that the IET or other associated societies cannot meet any travelling or subsistence expenses for authors, either prior to or during the conference.

Registration

Each paper must have at least one author registered by Friday, 29 January 2010, to avoid the paper being withdrawn from the conference and conference publications.

Copyright

Please access the form from the PEMD website and send it to eventsa1@theiet.org or to the address at the bottom of this email by no later than Friday, 29 January 2010.

Kind Regards
PEMD 2010 Organisers



● **ISIE10**

De: **ISIE10 Automated Conference Submission System**
 Para: **José Leandro Almeida Casa Nova**
 Assunto: **ISIE10**
 Data: 05/03/2010 09:22

BD-000043

Analytical method for the design of a machine with aligned and skewed permanent magnets
 José Leandro Almeida Casa Nova

Dear Author,

Congratulations! It is our pleasure to inform you that the above paper has been accepted for presentation at the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE-2010) to be held in Bari, Italy from July 4-7, 2010.

When you log into the manuscript submission website please find the reviewers' comments for your paper, which are intended to help you to improve your paper for final publication. In addition, please review and update the reference list with relevant recent works found in IES journals and conferences -- this will help readers appreciate your work in view of Industrial Electronics Society scopes of interest.

All papers must be re-submitted electronically in their final form. Instructions for the final version can be found at:
<http://www.isie2010.it/>
 To help you submit an IEEE Xplore-compliant PDF file, a link to the IEEE PDF eXpress service is available on the instruction page.

Please be aware that inclusion of your paper in the conference proceedings is only possible if the following 4 items are submitted before the 8 April 2010 deadline (Early Registration):

1. final version the paper in IEEE Xplore-compliant format
2. web-based IEEE Copyright form
3. biography of the presenter (no more than 50 words)
4. regular registration with payment

A Regular Registration is requested to have two papers included in the conference proceedings. One extra paper may be included with one registration at the cost of 200 euro. Student Registration is only valid for Student Forum papers. Papers that are not presented at the conference will not be included in the proceedings or in IEEE Xplore and the registration will not be refunded.

All items can be submitted through the conference website:
<http://www.isie2010.it/>

Conference accommodation information will be soon be available on the website. Travel information (including visa requirements) are also on the website. Please check the website regularly.

Thank you very much for your contribution. We look forward to our meeting in Bari!

Sincerely,
 IEEE ISIE-2010 Organizing Committee