Campus de São Carlos

CONSTRUÇÃO, ACIONAMENTO E ENSAIOS DO
MOTOR BIFÁSICO DE IMÃ PERMANENTE NO ROTOR
(MBIPR)

Autor: Rafael Borelli

Orientador: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**CONSTRUÇÃO, ACIONAMENTO E ENSAIOS DO MOTOR
BIFÁSICO DE IMÃ PERMANENTE NO ROTOR (MBIPR)**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço.....30/11/05

Ass.:.....*[assinatura]*

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Candidato: *Engenheiro Eletricista Rafael Borelli*

Orientador: *Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga*

São Carlos, Junho de 2005

DEDALUS - Acervo - EESC

31100053616

Class.	TESE
Cutt.	0874
Tombo	T 310/05
Sysno	1488723

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B731c Borelli, Rafael
Construção, acionamento e ensaios do motor bifásico
de imã permanente no rotor (MBIPR) / Rafael Borelli.
-- São Carlos, 2005.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga.

1. Motor sem escova. 2. Motor CC invertido.
3. Motor síncrono. 4. Motor de imã permanente.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RAFAEL BORELLI**

Dissertação defendida e julgada em 10-06-2005 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **DIÓGENES PEREIRA GONZAGA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **MANOEL LUÍS DE AGUIAR**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Titular **YARO BURIAN JUNIOR**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof. Associado **HOMERO SCHIABEL**
Vice-Coordenador em Exercício do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedicatória

*Aos meus pais, Nivaldo Borelli e
Marivone Rosa Gameiro Borelli, e
namorada, Renata Pugliesi Graner,
pelo incentivo e apoio.*

Agradecimentos

Primeiramente e em especial ao professor Dr. Diógenes Pereira Gonzaga pela confiança, apoio e dedicação desde a Graduação, passando pela Iniciação Científica e agora no Mestrado.

Ao professor Dr. Manoel Luis de Aguiar, pelas contribuições a respeito de máquinas elétricas e seus acionamentos.

Ao professor Dr. José Roberto Boffino de Almeida Monteiro, pelas contribuições que propiciaram o acionamento do motor.

Ao técnico mecânico Rui Bertho, pelo auxílio na construção do protótipo e dos dispositivos de ensaio.

Ao técnico e futuro engenheiro eletricista César Domingues, pelo auxílio na Eletrônica.

Ao técnico em informática Gerson Alesi Patrizzi, pelo auxílio com os problemas de informática.

Em especial à Denise Hollupi, secretária da pós-graduação, pela ajuda com as questões burocráticas.

À Marisa Helena R. Vicente Fortulan, também secretária da pós-graduação.

Aos demais componentes do corpo docente e funcionários do departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP pelo auxílio e convivência desde a Graduação até o Mestrado.

A WEG, pela confecção e fornecimento dos rotores.

À K2 Service, pelo bobinamento dos estatores.

E por fim a CAPES pelo financiamento prestado a este projeto de pesquisa durante dois anos, na forma de Bolsa de Mestrado.

Índice

Lista de Figuras	VII
Resumo	XI
Abstract	XII
Introdução	01
 Capítulo I – Descrição e Modelo Matemático do MBIPR	 02
1.1- Motor Síncrono a Imã Permanente (PMSC)	02
1.1.1 – Aspectos construtivos e características do PMSC modelo global	02
1.2.- Motor Bifásico de Imã Permanente (MBIPR) com fluxo não senoidal	04
1.2.1 – Modelagem matemática do motor MBIPR	12
1.2.2 – Modelo global	15
 Capítulo II – Aspectos construtivos do Rotor	 18
 Capítulo III – Estator	 29
 Capítulo IV - Acionamento do MBIPR	 43
 Capítulo V - Ensaio do MBIPR	 47
 Conclusões	 59

Apêndice I - Corte e Magnetização do Imã	61
Apêndice II - Acionamento do MBIPR	68
AII.1- Primeiro Sistema de Acionamento	68
AII.2- Segundo Sistema de Acionamento	71
A.II.2.1- Camada de Potência	71
A.II.2.2- Interface Analógica / Digital	75
A.II.2.3- Camada de Processamento Digital	75
Referências Bibliográficas	77

Lista de Figuras e Gráficos

Figura 1.1 – Configurações de Imãs-permanentes para motores síncronos senoidais	03
Figura 1.2 – Secção transversal de um motor CC	06
Figura 1.3 – Representação do Motor BDCM de rotor interno (convencional)	09
Figura. 1.4 - Formas de onda típicas do motor MBIPR (trapezoidal)	10
Figura 2.1 - Estator do Motor de Indução Monofásico Split-Phase convencional	18
Figura 2.2- Vista frontal do Estator do Motor de Indução Monofásico Split-Phase, evidenciando os dois pólos.	19
Figura 2.3 - Rotor do Motor de Indução Monofásico <i>Split-Phase</i> convencional	19
Figura 2.4 - Detalhe da gaiola do Rotor do Motor de Indução Monofásico Split-Phase	20
Figura 2.5 - Corte transversal do rotor 1	21
Figura 2.6 – Formato do Imã	22
Figura 2.7 – Bloco de Imã	23
Figura 2.8 – Corte do Imã no Bloco	23
Figura 2.9 - Corte transversal do Rotor 2	24
Figura 2.10 - Corte transversal do Rotor 3	24
Figura 2.11 - Corte transversal do Rotor de Pólo Liso	25
Figura 2.12 - Corte transversal do Rotor de Pólo Saliente	25
Figura 2.13 - Rotor de Pólos Lisos, visão frontal	26
Figura 2.14 - Rotor de Pólos Lisos, visão lateral	27
Figura 2.15 - Rotor de Pólos Salientes, visão frontal	27
Figura 2.16 - Rotor de Pólos Salientes, visão lateral	28

Figura 3.1 - Distribuição das bobinas no estator (planificada)	29
Figura 3.2 - Distribuição das bobinas no estator (corte transversal)	30
Figura 3.3 - Vista lateral do Estator Bifásico	33
Figura 3.4 - Vista lateral do Estator Bifásico (fase a)	34
Figura 3.5 - Vista lateral do Estator Bifásico (fase b)	34
Figura 3.6 - Vista angular do Estator Bifásico	35
Figura 3.7 - Vista interna do Estator Bifásico	35
Figura 3.8 - Vista interna 2 do Estator Bifásico	36
Figura 3.9 - Vista angular da carcaça	36
Figura 3.10 - Vista frontal do novo Estator Bifásico	37
Figura 3.11 - Vista lateral do novo Estator Bifásico	38
Figura 3.12 - Vista detalhada do novo Estator Bifásico	38
Figura 3.13 – Distribuição das bobinas no novo estator (planificada)	39
Figura 3.14 – Distribuição das bobinas no novo estator (corte transversal)	39
Figura 4.1 – FCEM das fases A e B(azul e amarela) e sinal de 2 dos 4 sensores (rosa e verde) do MBIPR com Rotor Liso	44
Figura 4.2 – FCEM das fases A e B (rosa e verde) e sinal de 2 dos 4 sensores (amarelo e azul) do MBIPR com Rotor Saliente	45
Figura 4.3 – Sinal dos 4 sensores	46
Figura 5.1 – Vista geral da bancada de ensaio	47
Figura 5.2 – Acoplamento dos Motores	48
Figura 5.3 – Acionamento do MBIPR e acoplamento dos Motores	49

Tabela 5.1 – Dados do ensaio com o Rotor de Pólos Lisos	50
Gráfico 5.1 – Potência Mecânica (CV) por Rotação (RPM)	50
Gráfico 5.2 – Torque (Nm) por Rotação (RPM)	51
Gráfico 5.3 – Corrente (A) por Rotação (RPM)	51
Gráfico 5.4 – Torque (Nm) por Corrente (A)	52
Gráfico 5.5 – Potência Mecânica (CV) por Corrente (A)	52
Gráfico 5.6 – Potência Mecânica (CV) por Torque (Nm)	53
Tabela 5.2 – Dados do ensaio com o Rotor de Pólos Salientes	54
Gráfico 5.7 – Potência Mecânica (CV) por Rotação (RPM)	54
Gráfico 5.8 – Torque (Nm) por Rotação (RPM)	55
Gráfico 5.9 – Corrente (A) por Rotação (RPM)	55
Gráfico 5.10 – Torque (Nm) por Corrente (A)	56
Gráfico 5.11 – Potência Mecânica (CV) por Corrente (A)	56
Gráfico 5.12 – Potência Mecânica (CV) por Torque (Nm)	57
Figura A.1 – Vista geral do dispositivo de corte do Imã	61
Figura A.2 – Dispositivo de corte do Imã	62
Figura A.3 – Vista superior do dispositivo de corte do Imã	62
Figura A.4 – Vista em detalhe do corte do Imã	63
Figura A.5 – Imã cortado	63
Figura A.6 – Peças de Imã cortadas	64
Figura A.7 – Vista superior do Dispositivo de Imantação do Imã	65

Figura A.8 – Vista em detalhe do Dispositivo de Imantação do Imã	65
Figura A.9 – Vista frontal do Dispositivo de Imantação do Imã	66
Figura A.10 – Detalhe do suporte do Dispositivo de Imantação do Imã	66
Figura A.11 – Vista frontal do suporte com o rotor a ser magnetizado	67
Figura A.12 – Vista lateral do suporte com o rotor a ser magnetizado	67
Figura A.13 – Circuito de acionamento do motor MBIPR (trapezoidal)	68
Figura A.14 – Diagrama de acionamento do motor MBIPR (trapezoidal)	69
Figura A.15 – Diagrama Esquemático do Inversor de Acionamento do MBIPR	72
Figura A.16 – Inversor de acionamento do MBIPR	73
Figura A.17 – Diagrama Esquemático do Retificador	73
Figura A.18 – Diagrama Esquemático do Inversor	74
Figura A.19 – Placa do Processador	76

Resumo

Visando uma opção de substituição, onde for possível e aplicável, do motor de indução monofásico, este trabalho relata o estudo teórico, a construção, o acionamento e os ensaios de um Motor Bifásico com Ímã Permanente no Rotor, de baixa potência, utilizando ímãs de Ferrita na confecção do rotor.

Palavras-chaves: motor sem escovas; motor CC invertido; motor síncrono; motor de ímã-permanente; Ferrita

Abstract

This work shows the theoretical studies, building, driving systems and tests of a small-power double-phase motor with Ferrite permanent-magnet in the rotor, based on the original structure of a single-phase induction motor. The objective is to create an option to replace the single-phase induction motor where it is possible and applicable.

Key words: brushless motor; inverted DC motor; synchronous motor; permanent-magnet motor; Ferrite

Introdução

O objetivo deste projeto é desenvolver um motor de baixo custo, com ímã permanente no rotor que permita ser construído com processos de produção (maquinário e ferramental) semelhante aos de fabricação dos motores de indução monofásicos, tipo gaiola de esquilo convencional, visando criar uma opção de substituição, onde for possível e aplicável.

Há, no mercado, motores de alto desempenho com ímãs-permanentes no rotor, que utilizam para tanto, ímãs de Terras Raras, ver [1], [2], [3] e [5], (Samário-Cobalto, Neodímio-Ferro-Boro, etc...), material este de custo elevado e cuja utilização neste trabalho seria inviável, devido ao alto custo em relação aos ímãs de Ferrita (Estrôncio-Bário sinterizada). A opção pelo ímã de Ferrita foi motivada também, por alguns outros aspectos técnicos que serão abordados no decorrer do trabalho.

No trabalho será apresentada, uma revisão teórica de forma simplificada, para posteriormente iniciar a construção e acionamento do motor idealizado. Por fim, os testes realizados serão mostrados e comparados aos dados de um motor de indução monofásico, tipo gaiola de esquilo convencional.

As dificuldades ocorridas na elaboração deste trabalho, serão relatadas e soluções serão propostas. Sugestões, para trabalhos futuros também serão apresentadas.

A facilidade de utilizar este tipo de motor para acionamento de velocidade e torque variáveis demonstra ser atrativa, e será iniciada com o presente projeto, sendo este o primeiro protótipo para esta finalidade.

Capítulo I – Descrição Física e Modelo Matemático do MBIPR

Este estudo aborda o Motor Bifásico de Imã Permanente no Rotor (MBIPR) com fluxo não senoidal. Este motor possui outras denominações, como será visto, tendo grande campo de aplicações em máquinas, ferramentas e processos automáticos de alto desempenho.

Será enfatizada a forma construtiva do motor e sua respectiva modelagem simplificada, com vistas ao modelo dinâmico necessário para futuros propósitos de controle e simulação.

O primeiro passo será apresentar uma breve descrição, sobre o motor síncrono de ímã-permanente senoidal.

1.1- Motor Síncrono a Imã Permanente (PMSC)

Como pode ser visto em [2], [5], no caso do motor síncrono com ímã permanente, normalmente a estrutura de rotor é do tipo cilíndrica. O motor nesta configuração é também designado Motor Síncrono de Imã Permanente Senoidal ou usando a notação em inglês *Permanent Magnet Synchronous Motor* – PMSC. Às vezes tal designação é acrescida do termo *Brushless*, como mostra [3], uma vez que o motor é dotado de ímãs permanentes em seu rotor e não há necessidade de escovas para acesso elétrico ao enrolamento de campo para a excitação do motor.

1.1.1 – Aspectos construtivos e características do PMSC

Nesta configuração, os ímãs são alocados na superfície ou interiormente à estrutura do rotor e de tal forma que produza uma Força-Contra-Eletromotriz (FCEM) senoidal nos enrolamentos de estator em função do ângulo de rotação do rotor. A precisão na senóide

induzida desta forma depende da configuração e disposição dos ímãs no rotor e, também, da distribuição do enrolamento de estator. Desde que a distribuição senoidal dos enrolamentos de estator raramente é perfeita, a configuração dos ímãs de rotor deve prover a FCEM senoidal o mais fielmente possível.

Assim, já que a FCEM produzida pelo campo de rotor com os ímãs é senoidal, para se obter torque constante no tempo, a corrente de estator deve também ser senoidal. Esta característica é que define este motor como motor síncrono de ímã-permanente.

As configurações mais comuns de rotor de ímã-permanente nos motores síncronos senoidais são indicadas a seguir:

Figura 1.1 – Configurações de Ímãs-permanentes para motores síncronos senoidais, [4].

Na configuração da Figura 1.1-a, os ímãs são magnetizados paralelamente (não radialmente) ao longo do eixo. Na disposição da 1.1-b, a variação de espessura do ímã produz um efeito de distribuição senoidal enquanto que, na disposição da Figura 1.1-c, a geometria do núcleo onde são alocados os ímãs produz um entreferro efetivo variável, tal que a distribuição da FCEM seja próxima de senoidal. Diversas técnicas práticas de execução dos enrolamentos podem contribuir para um efeito combinado de distribuição da FCEM praticamente senoidal.

Outro tipo de vantagem está relacionado aos aspectos de controle. Nos motores de indução trifásicos, sob uma proposta de controle vetorial com orientação de campo, o acionamento do motor atua sobre duas componentes de corrente de estator: a direta responsável pela magnetização e a de quadratura responsável pelo torque. No caso do motor síncrono de ímãs permanentes, a mesma proposta de controle vetorial pode ser usada, sendo que a componente direta é controlada para zero, para não desmagnetizar o ímã e a componente de quadratura é controlada para atuar diretamente no torque. Uma consequência direta disto é que o motor síncrono neste caso irá operar com um fator de potência mais elevado.

A partida do PMSC pode ocorrer com auxílio de uma gaiola semelhante àquela dos motores de indução, ou pode ser comandada pelo acionamento. Como forma de diminuição de custo do motor propriamente, usa-se normalmente a partida associada a um conversor de acionamento, evitando o uso da gaiola. Portanto, o conversor de acionamento é normalmente parte integrante do motor PMSC.

1.2- Motor Bifásico de Ímã Permanente no Rotor (MBIPR) com fluxo não senoidal

Em contraste ao motor síncrono senoidal, este tipo de motor, conforme [1], [2], [3], [4], [5] e [7], possui um ímã permanente fixo na estrutura de rotor que produz uma FCEM trapezoidal nos enrolamento de estator. Desta forma este motor também é conhecido como motor síncrono trapezoidal.

Este tipo de FCEM apresenta um perfil com níveis constantes alternadamente com polaridades opostas. A transição entre estes níveis de polaridade ocorre em diversas formas, variando desde rampas acentuadas a rampas escaladas com mais de uma inclinação.

De forma a manter um nível de torque constante, o qual é proporcional ao produto da FCEM pela corrente de alimentação, no caso, da corrente de estator, esta corrente deve apresentar um perfil semelhante, ou seja, do tipo com níveis constantes alternados. Isto significa que deve-se alimentar este motor com correntes contínuas de polaridades alternadas tipo pulsante.

Em virtude, do referido motor ser alimentado no estator com correntes CC pulsantes, tipo onda quadrada, também podemos denominá-lo, motor síncrono de onda quadrada. De forma geral este motor é conhecido por *Brushless* Bifásico ou *TFSBDCM*, como em [1], proveniente da designação em inglês *Two-Phase Squarewave Brushless Direct Current Motor*.

A razão desta FCEM trapezoidal, é resultado da constituição e alocação dos imãs no rotor associado à distribuição de enrolamentos no estator. Neste caso, não há a preocupação em gerar uma FCEM senoidal no estator. Isto propicia uma estrutura de estator muito mais prática e barata no aspecto construtivo do motor. Com isto, o motor *Brushless Direct Current Motor (BDCM)* é muito mais atrativo que seu equivalente senoidal. O enrolamento do estator neste caso pode ser concentrado, exatamente como é o enrolamento de um motor de indução monofásico (concêntrico).

Apesar de ser alimentado em corrente alternada (pulsada), o motor *BDCM* assemelha-se muito mais aos motores CC do que aos motores CA.

Desta forma, a melhor maneira de introduzir o princípio de funcionamento do motor MBIPR é a partir da comparação com os Motores CC e *Brushless DC (BDCM)* Trifásico (motores mais comuns), tal como será feito a seguir.

Na Figura 1.2 é esquematizado um corte transversal da constituição de um motor CC de ímã permanente, sem entretanto, indicar as escovas e o comutador mecânico. A indicação de espiras denominadas a-a', b-b' e c-c' serão utilizadas na descrição do motor *BDCM*. Para o motor CC, de acordo com [6], [8] e [9], estas espiras representam o enrolamento de armadura e cujas extremidades são terminadas no comutador mecânico.

Figura 1.2 – Secção transversal de um motor CC.

Os pólos de ímã permanente, norte e sul, são posicionados de forma fixa no estator, enquanto que o rotor (armadura) incorpora os enrolamentos (girantes) alimentados pelo conjunto comutador/escovas, que é também uma estrutura fixa. Com esta constituição, o campo magnético ou o fluxo é espacialmente fixo, assim como o padrão de corrente também é fixo por ação do comutador, ou seja o comutador sempre alimenta o conjunto de espiras situadas num plano perpendicular àquele do fluxo. Numa representação vetorial, os vetores de espaço de fluxo e da corrente de armadura estariam em quadratura permanentemente. Na forma convencional de fabricação e utilização do motor CC o rotor

deve ser a parte girante para prover a comutação das espiras e manter o padrão de fluxos de armadura e de campo perpendicular.

Imaginando uma aplicação em que o rotor do motor CC operasse estacionário e o campo, no caso o conjunto de ímãs permanentes girasse em torno desse rotor, não haveria mais comutação de espiras, pois o conjunto escovas-comutador estaria sempre alimentando a mesma espira. Nestas condições o motor sequer entraria em rotação. Entretanto, trocando-se o conjunto de comutação mecânica por um dispositivo eletrônico de comutação e que comutasse a alimentação de armadura, devidamente, mantendo o padrão perpendicular dos fluxos de armadura e campo, este motor teria o mesmo comportamento do motor CC, mas operando de modo “invertido”. A comutação eletrônica das espiras representa a geração de um campo girante de armadura. Desde que, num motor CC convencional a armadura é constituída de um grande conjunto de espiras, necessitar-se-ia um conjunto com mesmo número de chaves eletrônicas, que acionadas seqüencialmente produzisse o campo girante de armadura.

Uma forma fácil de conseguirmos um campo girante, é através de um enrolamento trifásico com alimentação simétrica. Desta forma, surge a constituição básica do motor BDCM Trifásico.

A mesma representação indicada na Figura 1.2, pode representar um motor BDCM “invertido”. Este tipo de motor é designado por motor BDCM de rotor externo, onde os enrolamentos de armadura são fixos e o rotor com os ímãs permanentes giram externamente. Estes tipos de motores BDCM são tipicamente usados no acionamento de disco rígido de computadores onde se requer velocidade alta e constante.

Na estrutura de motor BDCM “invertido” é fácil entender o funcionamento deste motor. Neste caso, assim como o motor CC “invertido”, a parte girante é a externa e é

constituída de uma estrutura cilíndrica onde estão posicionados os ímãs permanentes. A diferença fundamental é que a armadura é constituída por um enrolamento trifásico que receberá uma corrente de excitação proveniente de um dispositivo eletrônico, a qual deverá, portanto, prover uma alimentação de armadura de modo a manter um padrão de fluxos de armadura e campo (ímãs) em quadratura.

Para se prover a quadratura entre os fluxos de campo e armadura, assim como seria no caso do motor CC “invertido”, é necessário conhecer instantaneamente a posição do eixo dos ímãs e comutar a alimentação de armadura devidamente. Em virtude disto os motores BDCM são providos de sensores que determinam ou indicam a posição do campo dos ímãs permanentes. Para efeito de comutação eletrônica, desde que se dispõe de um enrolamento trifásico ou bifásico, é necessário um simples inversor trifásico ou bifásico que é comutado a partir das informações dos sensores de posição de campo. Uma vez que o enrolamento é do tipo concentrado e a configuração de ímãs produz uma FCEM trapezoidal ou quadrada, a alimentação das espiras deve ser em corrente contínua e comutada a cada 60 graus elétricos no sistema trifásico e 90 graus elétricos no bifásico.

Estipulado o modo de operação do motor *BDCM* invertido, ou de rotor externo, é fácil retornar à configuração de motor com rotor interno e associar o mesmo modo de operação. Na Figura 1.3 é ilustrado um motor *BDCM* de rotor interno. Neste caso, os ímãs permanentes podem ser colados na estrutura de rotor, sendo que para altas velocidades algum mecanismo de retenção dos ímãs pode ser utilizado, ou pode-se inserir os magnetos na estrutura de rotor. Com os enrolamentos de armadura fixos na parte externa, também há de se prover um sistema de comutação das espiras, que devem ser alimentadas para manter “constante” a quadratura dos fluxos de rotor e de armadura. Neste caso, basta novamente

2

representação, conforme [1], [2], [3], [4], [5] e [7], indicada na Figura 1.4, será estabelecido o procedimento de excitação do enrolamento de estator através do inversor.

Na Figura 1.4, o primeiro diagrama representa o fluxo magnético do rotor concatenando com a fase “a” de estator em função do ângulo do rotor. Na fase “b” o fluxo concatenado é semelhante na forma, mas defasado de 90° em relação ao de “a”.

Sabendo, conforme [2], que a FCEM é igual a:

$$e = \frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \omega_m \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad (1.1)$$

Ao se girar o rotor com o motor desligado, o fluxo dos ímãs produz a FCEM (1.1) nos enrolamentos de estator, tal como indicado pelas formas de onda e_{as} e e_{bs} . De acordo com a escolha de distribuição de fluxos, as FCEMs têm uma formação trapezoidal pura. É possível, entretanto, que outras configurações de campo produzam diferentes formas de onda de FCEM, porém sempre se aproximando de uma forma de onda trapezoidal.

Os sensores de indicação da posição de rotor em relação aos ímãs indicarão nesta configuração os sinais mostrados pelas formas de onda Sensor 1, Sensor 2, Sensor 3 e Sensor 4, posicionados espacialmente a 90° entre si.

Observa-se que o sinal destes sensores tem forma de onda com 90° de defasagem e existe uma combinação única de estados dos sensores, que permite estabelecer a sequência de acionamento do inversor.

Com a informação dos sensores, o inversor é acionado para produzir as correntes indicadas nas formas de onda i_{as} e i_{bs} . Estas formas de onda operam em sincronismo com a forma de onda da FCEM.

Figura 1.4 - Formas de onda típicas do motor MBIPR (trapezoidal).

O efeito combinado de ação das FCEM's e das correntes injetadas pelo inversor, irá produzir os termos de torque por fase indicados, nas formas de onda subsequente.

Efetivamente, no motor será produzido o torque eletromagnético indicado na forma de onda *Torque*, resultante da somas dos termos de torque por fase.

Nos tópicos seguintes serão deduzidas as formulações matemáticas que descrevem a operação e funcionamento do motor MBIPR na formulação matricial bifásica.

1.2.1 – Modelagem matemática do motor MBIPR

Esta formulação é realizada com base em [1] onde é demonstrado o procedimento de modelagem para o motor *BDCM* trifásico e indicado que tal procedimento é similar e válido para qualquer número de fases.

Nesta análise, é considerado que o rotor é de material laminado e que os imãs possuem alta resistividade elétrica, tal que correntes induzidas no rotor são desprezíveis. O motor também não possui enrolamentos amortecedores como gaiola de esquilo de partida.

Também, devido à simetria construtiva as resistências e indutâncias por fase são iguais entre si e uma vez que os enrolamentos das fases estão defasados no espaço de 90°, temos que a indutância mútua entre enrolamentos é igual à zero.

A tensões induzidas por fase são trapezoidais e tais como indicadas na Figura 1.4 (vide e_{as} e e_{bs}).

Com tais suposições, a equação matricial bifásica é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ba} & L_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{as}}{dt} \\ \frac{di_{bs}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Onde R_s é a resistência de estator por fase e assumida como sendo igual para ambas.

As tensões induzidas (e_{as} e e_{bs}) têm magnitude de pico (E_p) por fase igual a:

$$E_p = (B \cdot l \cdot v) \cdot N = N \cdot (B \cdot l \cdot r \cdot \omega_m) = N \cdot \phi_a \cdot \omega_m = \psi_p \cdot \omega_m \quad (1.3)$$

Onde N é o número de condutores em série por fase, v é a velocidade, l é o comprimento do condutor, r é o raio do rotor, ω_m é a velocidade angular e B é a densidade de fluxo magnético, no qual os condutores estão localizados. Esta densidade de fluxo é devido aos magnetos do rotor. O produto $(B \cdot l \cdot r)$, denominado ϕ_a , tem dimensão de fluxo e é diretamente proporcional ao fluxo de entreferro, ϕ_g :

$$\phi_a = B \cdot l \cdot r = \frac{1}{\pi} \cdot B \cdot \pi \cdot l \cdot r = \frac{1}{\pi} \cdot \phi_g \quad (1.4)$$

O produto do fluxo pelo número de condutores em série tem dimensão de fluxo concatenado e é denominado por ψ_p .

Considerando um rotor sem variação de relutância, pois não apresenta saliências, e que o enrolamento de estator seja simétrico, as indutâncias do estator podem ser dadas como sendo:

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_{bb} = L; \\ L_{ab} &= L_{ba} = M = 0; \end{aligned} \quad (1.5)$$

Com isto a equação (1.2) passa a ser:

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{as}}{dt} \\ \frac{di_{bs}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Ou, separando as duas equações elétricas:

$$v_{as} = R_s \cdot i_{as} + L \cdot \frac{di_{as}}{dt} + e_{as}; \quad (1.7)$$

$$v_{bs} = R_s \cdot i_{bs} + L \cdot \frac{di_{bs}}{dt} + e_{bs};$$

O torque eletromagnético desenvolvido é diretamente proporcional à potência elétrica total, menos as perdas ôhmicas. Ele é dado por:

$$T_e = [e_{as} \cdot i_{as} + e_{bs} \cdot i_{bs}] \frac{1}{\omega_m} (N \cdot m) \quad (1.8)$$

As tensões induzidas por fase podem ser escritas com base na Figura 1.4 e na equação (1.3):

$$e_{as} = f_{as}(\theta_r) \cdot \psi_p \cdot \omega_m; \quad (1.9)$$

$$e_{bs} = f_{bs}(\theta_r) \cdot \psi_p \cdot \omega_m$$

Onde as funções $f_{as}(\theta_r)$ e $f_{bs}(\theta_r)$ tem a mesma forma de onda de e_{as} e e_{bs} com amplitude de magnitude máxima ± 1 . Elas descrevem o comportamento de cada tensão induzida em relação ao ângulo do rotor em graus elétricos. As tensões induzidas são derivadas dos fluxos concatenados e, estes fluxos são funções contínuas. A expressão final do torque pode ser escrita como:

$$T_e = \psi_p \cdot [f_{as}(\theta_r) \cdot i_{as} + f_{bs}(\theta_r) \cdot i_{bs}] (N \cdot m) \quad (1.10)$$

Uma observação significativa é que a equação de tensão por fase é idêntica a

equação de tensão de armadura da Máquina DC. Esta é uma das razões pela qual este motor pode ser chamado de *PM brushless dc machine*.

A equação dinâmica para um sistema rotativo simples é dada por:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B_a \omega_m = (T_e - T_l) \quad (1.11)$$

Onde J é o coeficiente de momento de inércia das partes girantes, B_a o coeficiente de atrito viscoso (mancais e ventilação) e T_l é o torque de carga.

A velocidade do rotor é dada por:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{P}{2} \omega_m \quad (1.12)$$

Onde P é o numero de pólos do motor.

Portanto, as equações (1.6) e de (1.10) a (1.12) definem o modelo matemático do MBIPR. Em cada caso em particular, há que se estabelecer a forma de onda da tensão induzida e o modo de acionamento.

No caso dos motores MBIPRs necessariamente um inversor bifásico é associado ao acionamento do motor.

1.2.2 – Modelo global

Para a simulação da dinâmica do MBIPR é necessária a descrição do modelo em espaço de estado. Desta forma por simples manipulação do modelo desenvolvido nos itens anteriores, chega-se a:

$$\dot{x} = Ax + Yu \quad (1.13)$$

Onde:

$$x = [i_{as} \quad i_{bs} \quad \omega_m \quad \theta_r]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & 0 & -\frac{\psi_p}{L} f_{as}(\theta_r) & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L} & -\frac{\psi_p}{L} f_{bs}(\theta_r) & 0 \\ \frac{\psi_p}{J} f_{as}(\theta_r) & \frac{\psi_p}{J} f_{bs}(\theta_r) & -\frac{B_a}{J} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

E u igual a:

$$u = [v_{as} \quad v_{bs} \quad T_l]^T \quad (1.15)$$

Finalmente, o torque é obtido a partir de (1.10) e as tensões de alimentação provêm do inversor bifásico, segundo a lei de variação determinada pela forma de onda das tensões induzidas.

Pode-se afirmar pelo desenvolvimento acima, segundo [2], que a velocidade angular do motor é proporcional à tensão aplicada a este e que o Torque é proporcional a corrente fornecida ao motor.

Sendo que:

$$\begin{aligned} E &= k_E \cdot \omega_m; \\ T_e &= k_T \cdot I; \end{aligned} \tag{1.16}$$

Onde k_E é chamada de constante de FEM e k_T de constante de Torque. No caso ideal k_E e k_T são iguais.

O chamado acionamento em “malha aberta” neste caso irá necessitar no mínimo de uma realimentação da posição angular (θ_r) do rotor ou dos sinais disponibilizados pelos sensores que determinam a posição angular do campo de rotor.

Depois de estudada a teoria do motor, o próximo passo executado foi sua construção.

Capítulo II – Aspectos construtivos do Rotor

O Motor Bifásico de Imã-Permanente, MBIPR, foi idealizado a partir de [2], [3] e [4], com base na estrutura de um Motor de Indução Monofásico *Split-Phase*, conhecido por motor de fase dividida, convencional para ser possível a análise de quais mudanças são necessárias para torná-lo em um MBIPR.

O Motor monofásico, que serviu de base para o projeto, Figuras 2.1 a 2.4, foi gentilmente cedido pela empresa *K2 Service*, que presta assistência técnica e é revendedora autorizada da empresa WEG na cidade de Campinas. Este Motor é da marca WEG, de ¼ CV, 2 pólos, velocidade de 3390 RPM, Conjugado nominal de 0,506 Nm, regime S1, alimentação de 110/220 V, corrente de 4,4/2,2 A, 60 Hz, Fator de Serviço 1,6, isolamento B, Grau de Proteção IP21, Fator de Potência 0,78 e razão entre corrente de pico e corrente nominal igual a 5,5.

Figura 2.1- Estator do Motor de Indução Monofásico Split-Phase convencional

Figura 2.2- Vista frontal do Estator do Motor de Indução Monofásico Split-Phase, evidenciando os dois pólos.

Figura 2.3- Rotor do Motor de Indução Monofásico Split-Phase convencional

Figura 2.4 - Detalhe da gaiola do Rotor do Motor de Indução Monofásico Split-Phase

Como o motor base utilizado era da marca WEG, foi realizado um contato com a empresa e apresentado o projeto de mestrado. A WEG, acabou por fornecer as lâminas de rotor cortadas e já fixadas ao eixo no formato elaborado no projeto (como mostrado à frente), o estator da máquina sem bobinamento e a carcaça.

A idéia era de colocar ímãs-permanentes no rotor, pois estes teriam o objetivo de criar o campo magnético de rotor, que nas máquinas síncronas geralmente são produzidos pelo enrolamento de campo. A primeira dificuldade encontrada, foi escolher qual seria o ímã a ser utilizado. As opções eram Ferrita (Estrôncio-Bário sinterizado) ou Terras Raras (Samário-Cobalto e Neodímio-Ferro-Boro). Segundo [2], as lâminas de ferro utilizadas na construção dos rotores de Motores Monofásicos de Indução não suportam os níveis de densidade de fluxo magnético ($B \approx 1,5T$) providos por ímãs de alto desempenho, como os de Terras Raras, tendendo a se saturarem magneticamente de forma muito rápida, não sendo, então, aproveitado todo o potencial de uso desses ímãs. Outro fator, também importante, é

relativo ao custo deste tipo de imã que é muito superior ao da Ferrita, além de ser considerado material estratégico, restrito ao uso por algumas corporações industriais.

O campo gerado pelo imã de Ferrita, conforme [2], da ordem de 0,3-0,4 Tesla é suficiente para gerar o campo além de possuir um baixo custo e não saturar as lâminas provenientes do Motor de Indução Monofásico.

Decididos, então, pelo imã de Ferrita, a próxima preocupação foi com o formato deste no rotor e se era possível a WEG executar o tipo de corte das chapas de Ferro. Pela necessidade de deixar um espaço de ferro entre as peças de imã e por facilidade construtiva, a opção foi por um rotor de dois pólos. O primeiro formato que surgiu é mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Corte transversal do rotor 1

O formato côncavo do imã, Figura 2.6, tornou-se um problema tendo em vista que após incessante pesquisa no mercado, não foi encontrado uma empresa que pudesse fornecer o imã no formato idealizado, com a precisão necessária.

Figura 2.6 – Formato do Imã

A solução encontrada foi adquirir dois blocos de Ferrita desmagnetizados, Figura 2.7, e direcioná-los para corte com a técnica de corte com jato de água. Os blocos adquiridos, Figura 2.8, foram encaminhados para o corte, onde surgiram problemas pelo fato de serem muito pequenos para fixá-los na máquina de corte, além do bico de jato de água provocar uma deformação cônica no corte, fato este, que interferiria no formato do imã e na intensidade do campo magnético.

As dificuldades encontradas na obtenção deste formato de imã, levaram à idealização de um outro desenho para o rotor. Uma maneira de simular o formato côncavo, seria colocar vários imãs de formato retangular em pequenas ranhuras como pode ser visto na Figura 2.9. A largura destes imãs teria de ser reduzida o suficiente para que a curvatura do rotor ficasse o mais próximo da cilíndrica, mesmo formada por pequenos pedaços de

reta. O problema encontrado nesta situação foi, de que o corte a laser das lâminas do rotor só conseguiria deixar dentes de no mínimo 3mm, Figura 2.10, o que impossibilitaria que a curvatura do rotor pudesse ser aproximada por retângulos de imãs. Com as dificuldades encontradas para utilizar o rotor com espaço côncavo, foi decidido modificar o formato deste. A utilização de um formato mais convencional viria facilitar a aquisição, e o corte tanto dos imãs quanto das lâminas do rotor.

Figura 2.7 – Bloco de Imã

Figura 2.8 – Corte do Imã no Bloco

Figura 2.9 – Corte transversal do Rotor 2

Figura 2.10 - Corte transversal do Rotor 3

Optou-se então, por dois modelos de rotor os quais são apresentados abaixo nas Figuras 2.11 e 2.12.

Figura 2.11- Corte transversal do Rotor de Pólo Liso

Figura 2.12- Corte transversal do Rotor de Pólo Saliente

Decidido por este formato, o próximo passo foi providenciar o corte do imã e o corte das lâminas do rotor. Os novos desenhos das lâminas do rotor foram encaminhados para a WEG, que se encarregou de executar a tarefa. Devido às dificuldades encontradas anteriormente, o procedimento de corte e magnetização dos imãs foi realizado nas dependências do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, e está apresentado no Apêndice I.

Os rotores que foram fornecidos pela WEG podem ser vistos a seguir.

Nas Figuras 2.13 e 2.14 o rotor de pólos lisos.

Nas Figuras 2.15 e 2.16 o rotor de pólos salientes.

Figura 2.13- Rotor de Pólos Lisos, visão frontal

Figura 2.14 - Rotor de Pólos Lisos, visão lateral

Figura 2.15- Rotor de Pólos Salientes, visão frontal

Figura 2.16- Rotor de Pólos Salientes, visão lateral

Capítulo III– Estator

Com os rotores e os imãs prontos, faltava preparar o estator e fixá-lo na carcaça.

O enrolamento do estator ficou a cargo da *K2 Service*.

O núcleo de Ferro do estator fornecido pela WEG, era o mesmo do motor monofásico convencional, ou seja, suas lâminas tinham um recorte para receber dois conjuntos de bobinas de bitolas de fio diferentes, o enrolamento principal e o enrolamento auxiliar, surgindo, então, a necessidade de alargar as ranhuras com recortes menores, onde originalmente não havia superposição de lados de bobinas diferentes.

Seriam necessários dois enrolamentos de mesma bitola e posicionados a 90° no espaço um do outro, ambos ocupando ranhuras específicas. Este posicionamento serve para fornecer um bifásico real. O modo como as bobinas foram distribuídas no estator, pode ser visto na Figura 3.1 e 3.2. As oito pontas do enrolamento foram deixadas livres para possibilitar o trabalho, com o seqüenciamento de ligação das bobinas.

Figura 3.1- Distribuição das bobinas no estator (planificadas)

Figura 3.2- Distribuição das bobinas no estator (corte transversal)

Para um correto posicionamento dos vetores de campo produzidos pelas bobinas azuis e vermelhas, foram curto-circuitados os fios 2 e 3 surgindo a bobina Azul total, bobina 1, e os fios 6 e 8 para a bobina Vermelha total, bobina 2.

Depois de ligar as bobinas de maneira correta, sobraram 4 pontas de bobinas, que são a entrada e saída.

Para a obtenção dos parâmetros destes enrolamentos, foram realizados experimentos com tensão DC e tensão AC.

O primeiro experimento foi aplicar uma tensão CC nos fios 1 e 4, bobina 1, e medir a corrente CC. Os dados obtidos foram:

Bobina 1 (Azul)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
V _{cc}	7,625 V	7,616 V	7,629 V
I _{cc}	1,078 A	1,075 A	1,075 A

O mesmo procedimento foi adotado para a bobina 2 (azul). A alimentação ocorreu nos fios 5 e 7 e os dados obtidos foram:

Bobina 2 (Vermelha)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
V _{cc}	7,611 V	7,610 V	7,644 V
I _{cc}	1,086 A	1,087 A	1,088 A

O segundo experimento foi aplicar uma tensão AC nos fios 1 e 4, bobina 1, e medir o módulo da corrente AC. Os dados obtidos foram:

Bobina 1 (Azul)	Ensaio 1	Ensaio 2
V _{ac} (eficaz)	16,28 V	16,26 V
I _{ac} (eficaz)	1,096 A	1,094 A

O mesmo procedimento foi adotado para a bobina 2 (Vermelha). A alimentação ocorreu nos fios 5 e 7 e os dados obtidos foram:

Bobina 2 (Vermelha)	Ensaio 1	Ensaio 2
V _{ac} (eficaz)	16,35 V	16,34 V
I _{ac} (eficaz)	1,014 A	1,013 A

A resistência da bobina pode ser obtida pela relação entre tensão e corrente CC, portanto:

Bobina 1(Azul)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
$R=V_{cc}/I_{cc}$	$R11=7,0733 \Omega$	$R12=7,0846 \Omega$	$R13=7,0967 \Omega$	$R1med=7,0848 \Omega$

Bobina 2 (Vermelha)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
$R=V_{cc}/I_{cc}$	$R21=7,0083 \Omega$	$R22=7,0009 \Omega$	$R23=7,0257 \Omega$	$R2med=7,0116 \Omega$

O módulo da impedância da bobina pode ser obtido pela relação entre o módulo da tensão e corrente AC, portanto:

Bobina 1 (Azul)	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
$Z=V_{ac}/I_{ac}$	$Z11=14,8540 \Omega$	$Z12=14,8629 \Omega$	$Z1med=14,8584 \Omega$

Bobina 2 (Vermelha)	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
$Z=V_{ac}/I_{ac}$	$Z21=16,1243 \Omega$	$Z22=16,1303 \Omega$	$Z2med=16,1273 \Omega$

O calculo da parte indutiva é feito:

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

$$X^2 = Z^2 - R^2$$

Portanto:

$$X1med=13,0605$$

$$X2med=14,5233$$

Onde:

$X = \omega L$ e $\omega = 2 \pi f = 376,992 \text{ rad/s}$, com $f = 60 \text{ Hz}$.

Portanto:

$L1 = 3,4644 \text{E-}02 \text{ H}$

$L2 = 3,8524 \text{E-}02 \text{ H}$

O enrolamento depois de pronto pode ser visto nas Figuras 3.3 a 3.8

Figura 3.3 - Vista lateral do Estator Bifásico

Figura 3.4 - Vista lateral do Estator Bifásico(fase a)

Figura 3.5 - Vista lateral do Estator Bifásico(fase b)

Figura 3.6 - Vista angular Estator Bifásico

Figura 3.7- Vista interna I do Estator Bifásico

Figura 3.8 - Vista interna 2 do Estator Bifásico

A carcaça fornecida pode ser vista na Figura 3.9.

Figura 3.9- Vista angular da carcaça

Os resultados alcançados com este enrolamento, não foram satisfatórios, já que ocorreram problemas de alinhamento entre os imãs do rotor e a bobina alimentada, causando um mau funcionamento do motor, durante seu acionamento.

O sistema de acionamento mostrava-se pouco eficiente, em lidar com esta situação pois, o rotor possuía dois pontos de alinhamento, gerando imprecisão ao sistema quanto ao sensor que deveria ser acionado e a próxima bobina a ser alimentada.

Para resolver esta dificuldade, outro modelo de estator foi sugerido, com a intenção de concentrar o campo magnético gerado e ao mesmo tempo fortalecê-lo.

O novo enrolamento, mantém a mesma premissa de dois enrolamentos de mesma bitola e, posicionados a 90° no espaço um do outro, para fornecer um bifásico real.

O novo estator pode ser visto nas figuras 3.10, 3.11 e 3.12

Figura 3.10 - *Vista frontal do novo Estator Bifásico*

Figura 3.11 - *Vista lateral do novo Estator Bifásico*

Figura 3.12 - *Vista detalhada do novo Estator Bifásico*

A distribuição das bobinas nas ranhuras segue o esquema que pode ser visualizado nas Figuras 3.13 e 3.14.

Figura 3.13 – Distribuição das bobinas no novo estator (planificada)

Figura 3.14 – Distribuição das bobinas no novo estator (corte transversal)

Para a obtenção dos parâmetros deste novo enrolamento, foram realizados os mesmos procedimentos e testes relatados anteriormente para o primeiro estator.

O primeiro experimento foi aplicar uma tensão CC nos fios 1 e 2, bobina 1, e medir a corrente CC. Os dados obtidos foram:

Bobina 1 (Azul)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
V _{cc}	5,06 V	6,34 V	8,00 V
I _{cc}	0,548 A	0,684 A	0,863 A

O mesmo procedimento foi adotado para a bobina 2 (azul). A alimentação ocorreu nos fios 3 e 4 e os dados obtidos foram:

Bobina 2 (Vermelha)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
V _{cc}	5,01 V	6,25 V	8,04 V
I _{cc}	0,545 A	0,678 A	0,872 A

O segundo experimento foi aplicar uma tensão AC nos fios 1 e 2, bobina 1, e medir o módulo da corrente AC. Os dados obtidos foram:

Bobina 1 (Azul)	Ensaio 1	Ensaio 2
V _{ac} (módulo)	14,05 V	21,1 V
I _{ac} (módulo)	0,615 A	0,924 A

O mesmo procedimento foi adotado para a bobina 2 (Vermelha). A alimentação ocorreu nos fios 3 e 4 e os dados obtidos foram:

Bobina 2 (Vermelha)	Ensaio 1	Ensaio 2
Vac (módulo)	14,94 V	20,4 V
Iac (módulo)	0,606 A	0,830 A

A resistência da bobina pode ser obtida pela relação entre tensão e corrente CC, portanto:

Bobina 1(Azul)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
$R=V_{cc}/I_{cc}$	$R11=9,2336 \Omega$	$R12=9,2690 \Omega$	$R13=9,2202 \Omega$	$R1med=9,2409 \Omega$

Bobina 2 (Vermelha)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
$R=V_{cc}/I_{cc}$	$R21=9,1927 \Omega$	$R22=9,2183 \Omega$	$R23=9,2202 \Omega$	$R2med=9,2104 \Omega$

O módulo da impedância da bobina pode ser obtido pela relação entre o módulo da tensão e corrente AC, portanto:

Bobina 1 (Azul)	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
$Z=V_{ac}/I_{ac}$	$Z11=22,8455 \Omega$	$Z12=22,8355 \Omega$	$Z1med=22,8405 \Omega$

Bobina 2 (Vermelha)	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
$Z=V_{ac}/I_{ac}$	$Z21=24,6535 \Omega$	$Z22=24,5783 \Omega$	$Z2med=24,6160 \Omega$

O cálculo da parte indutiva é feito:

$$Z^2 = R^2 + X^2 ;$$

$$X^2 = Z^2 - R^2 ;$$

Portanto:

$$X_{1med}=20,8876$$

$$X_{2med}=22,8280$$

Onde:

$$X=\omega L \text{ e } \omega=2\pi f=376,992 \text{ rad. el./s, com } f=60\text{Hz.}$$

Portanto:

$$L1=6,0553E-02 \text{ H}$$

$$L2=5,5406E-02 \text{ H}$$

O novo enrolamento possui um valor superior de indutância em relação ao primeiro estator.

Com os ímãs já fixados ao rotor, o estator já bobinado foi fixado e alinhado dentro da carcaça de maneira que, este deixasse o rotor com movimento livre.

Como a cabeça de bobinas deste novo enrolamento é maior que a do enrolamento original do motor monofásico e, também, que a do primeiro enrolamento, não foi possível inserir a hélice de ventilação interna no motor, devido ao espaço interno da carcaça ser insuficiente. A opção foi adotarmos um sistema de ventilação externa, forçada neste protótipo.

Capítulo IV - Acionamento do MBIPR

Para executar o acionamento do motor de forma correta, existia a necessidade de confirmar que a FCEM do motor se enquadrava na formulação teórica já apresentada, conforme o gráfico da Figura 1.4. O levantamento desta forma de onda, conforme [7], foi realizado através da conexão do eixo do MBIPR em um motor AC trifásico, para que quando este girasse o eixo do motor, fosse induzida no estator do MBIPR a sua FCEM característica, a qual ele necessita para um perfeito funcionamento.

Para a aquisição desta forma de onda, as bobinas foram ligadas a um osciloscópio digital, para a obtenção da curva característica da FCEM do MBIPR.

Este procedimento foi executado para os dois modelos de Rotores e podem ser vistos nas Figuras 4.1 e 4.2.

Os gráficos confirmam a forma de onda trapezoidal da FCEM tanto para o Rotor Liso quanto para o Rotor Saliente e, como já relatado no Capítulo I e na Figura 1.4, o motor deve ser alimentando com correntes constantes e de maneira alternada nos instantes corretos de passagem, do ímã pelas bobinas.

Figura 4.1 – FCEM das fases A e B (azul e amarela) e sinal de 2 dos 4 sensores (rosa e verde) do MBIPR com Rotor Liso

Figura 4.2 – FCEM das fases A e B (rosa e verde) e sinal de 2 dos 4 sensores (amarelo e azul) do MBIPR com Rotor Saliente

Para a precisão da posição do ímã em relação à bobina existe a necessidade de instalar sensores de posição angular, como tratam [1], [2], [3], [4], [5] e [7], no eixo do MBIPR, para que seja fornecida a posição correta do rotor ao mecanismo de acionamento. Estes sensores estão instalados a 90° entre si sendo um total de 4 sensores, o que possibilita mapear o rotor em 360° , e fazer com que o motor parta de qualquer posição, sem a necessidade de um dispositivo auxiliar de partida.

Figura 4.3 Sinal dos 4 sensores

Segundo [2] o acionamento do motor bifásico pode ser realizado alimentando-se as bobinas de maneira independente, ou seja, utilizando um circuito ponte independente para cada bobina. Este circuito pode ser realizado através de uma ponte composta de Mosfets ou IGBTs, que são disparados de maneira conveniente através dos sinais fornecidos pelos sensores, que realizam o mapeamento da posição angular do rotor.

Um acionamento nos moldes deste proposto acima foi implementado [Apêndice II].

Capítulo V - Ensaio do MBIPR

Depois da montagem do motor e da configuração do acionamento, foi acoplado ao MBIPR um motor de indução trifásico, tipo gaiola de esquilo, Figura 5.2, com o objetivo de proporcionar variação de carga ao MBIPR através da alimentação de CC, de forma desequilibrada, aos enrolamentos do motor trifásico. O motor de indução passa a ser visto pelo MBIPR como um freio eletromagnético. A montagem pode ser vista na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Vista geral da bancada de ensaio

O ensaio foi realizado alimentado o módulo retificador com 220V AC, sendo 311V DC a tensão transferida ao barramento do módulo inversor.

O primeiro rotor a ser ensaiado foi o de pólos lisos e posteriormente o de pólos salientes.

Figura 5.2 – Acoplamento dos Motores

Com a tensão fornecida ao inversor fixada, o sistema de acionamento foi ligado, levando o motor à velocidade e corrente de regime características da tensão fornecida. É importante lembrar que a velocidade nominal do motor está diretamente associada ao valor de tensão fornecida, bem como o valor do torque está diretamente associado ao valor da corrente (Capítulo I).

Figura 5.3 –Acionamento do MBIPR e acoplamento dos Motores

Para o primeiro ensaio, foi ligado o sistema de acionamento, que levou o MBIPR a velocidade de regime (3540 RPM). Com o auxílio de um dinamômetro digital, que fazia a leitura da força exercida pelo braço de alavanca acoplado ao motor trifásico, iniciou-se o ensaio com o motor e sucessivamente foi fornecida tensão ao motor de indução trifásica para que este realizasse a função de carga ou freio eletromagnético. Enquanto era incrementado o valor da tensão aplicada ao freio, era medida a velocidade de rotação e a corrente “true rms” do MBIPR, além da força que a alavanca exercia sobre o dinamômetro.

Os dados obtidos podem ser visualizados na tabela abaixo, bem como os gráficos característicos obtidos para o MBIPR com pólos lisos.

n (rpm)	n (rad/s)	I (A)	F (kgf)	T (Nm)	P _{MEC} (W)	P _{MEC} (KW)	P _{MEC} (CV)
3540	370,638	1,39	0	0	0	0	0
3380	353,886	1,5	0,034	0,07164	25,352	0,02535	0,03407
3090	323,523	1,8	0,082	0,17277	55,896	0,0559	0,07511
2735	286,355	2,38	0,16	0,33712	96,536	0,09654	0,12972
2332	244,16	3,5	0,32	0,67424	164,62	0,16462	0,22121
2000	209,4	4,3	0,42	0,88494	185,31	0,18531	0,24901

Tabela 5.1 – Dados do ensaio com o Rotor de Pólos Lisos

Observações:

- Em todas as tabelas a primeira linha corresponde ao motor em VAZIO.
- Braço de Alavanca = 0,215 m.
- $P_{MEC} = T \text{ (Nm)} \times n \text{ (rad/s)}$
- As curvas refletem a sequência de ensaio, ou seja da velocidade nominal até a de brakedown

Gráfico 5.1 – Potência Mecânica (CV) por Rotação (RPM)

Gráfico 5.2 – Torque (Nm) por Rotação (RPM)

Gráfico 5.3 – Corrente (A) por Rotação (RPM)

Gráfico 5.4 – Torque (Nm) por Corrente (A)

Gráfico 5.5 – Potência Mecânica (CV) por Corrente (A)

Gráfico 5.6 – Potência Mecânica (CV) por Torque (Nm)

O Torque desenvolvido pelo motor sob análise se comparado ao torque nominal de 0,506 Nm do motor monofásico original, ocorre por volta de 2500RPM enquanto que no motor monofásico este ocorre em aproximadamente 3400RPM. Um circuito de realimentação no conjunto motor inversor poderia suprir esta defasagem pois não permitiria que a velocidade diminuísse conforme ocorre um aumento na exigência de torque.

Os problemas observados durante o ensaio foram as altas temperaturas do rotor, que mesmo submetido a ventilação forçada, com o passar do ensaios, demonstrava estar afetando a magnetização dos ímãs de ferrita, causando desmagnetização, conforme [5]. Esta suspeita tem como base a descrição em [5] onde o aumento de temperatura influi na magnetização do ímã, podendo até mesmo desmagnetizá-lo se submetido a temperaturas muito elevadas.

No segundo ensaio (rotor de pólos salientes), foi ligado o sistema de acionamento, que levou o MBIPR à velocidade nominal. A estrutura deste ensaio foi semelhante a do anterior ressaltado somente a mudança da configuração do rotor.

Os dados obtidos podem ser visualizados na tabela abaixo, bem como os gráficos característicos obtidos para o MBIPR com pólos salientes.

n (rpm)	n (Rad/s)	I (A)	F (kgf)	T (Nm)	P _{MEC} (W)	P _{MEC} (KW)	P _{MEC} (CV)
3500	366,45	1,3	0	0	0	0	0
3060	320,382	1,98	0,12	0,25284	81,0053849	0,08100538	0,10885099
2366	247,72	3,5	0,243	0,512	126,83299	0,12683299	0,17043183
2190	229,293	4,1	0,32	0,67424	154,598512	0,15459851	0,20774175

Tabela 5.2 – Dados do ensaio com o Rotor de Pólos Salientes

Gráfico 5.7 – Potência Mecânica (CV) por Rotação (RPM)

Gráfico 5.8 – Torque (Nm) por Rotação (RPM)

Gráfico 5.9 – Corrente (A) por Rotação (RPM)

Gráfico 5.10 – Torque (Nm) por Corrente (A)

Gráfico 5.11 – Potência Mecânica (CV) por Corrente (A)

Gráfico 5.12 – Potência Mecânica (CV) por Torque (Nm)

Como no ensaio anterior, o torque desenvolvido pelo motor se comparado ao torque nominal de 0,506 Nm do monofásico, ocorre por volta de 2370RPM enquanto que no motor monofásico este ocorre em aproximadamente 3400RPM. Um circuito de realimentação no conjunto motor inversor também poderia suprir esta defasagem neste caso, assim como no anterior, pois não permitiria que a velocidade diminuísse conforme existe um aumento na exigência de torque.

Os problemas verificados neste ensaio são os mesmos já relatados no ensaio anterior, com a agravante de que como o ímã deste rotor possui menor superfície de apoio, tendo em vista não estar totalmente embutido no pacote de lâminas do rotor, as altas temperaturas no decorrer dos ensaios provocaram um amolecimento da cola que fixava o ímã ao rotor, fazendo com que este se soltasse durante a operação e passasse a raspar nas lâminas do estator durante os ensaios. Este fato incidiu numa espécie de atrito ao motor, que funcionou

como carga e ocasionou um aumento da corrente e queda na velocidade e no torque. A solução para esta falta de rigidez mecânica do ímã pode ser resolvida de forma simples no futuro, com um sistema de encaixe no formato *cauda de andorinha* na borda superior do alojamento dos ímãs.

Conclusões

O aprendizado, com este trabalho foi enorme tendo em vista a necessidade de aliar o conhecimento teórico adquirido na graduação, e nas disciplinas de pós-graduação, com os conhecimentos e novos aprendizados adquiridos no estágio de graduação, bem como no dia-a-dia profissional. O desafio de superar as dificuldades para realizar um trabalho que não ficasse somente em teoria, mas, que pudesse ser visto na prática e funcionando, era grande, mais o sentimento do dever cumprido neste momento supera as dificuldades encontradas no passado.

O objetivo da construção de um primeiro protótipo foi atingido e, as dificuldades e problemas ocorridos e verificados neste, poderão ser solucionados nos trabalhos futuros, com a construção de um segundo protótipo, onde será possível corrigir os erros e problemas de seu antecessor, bem como um estudo mais aprofundado do seu funcionamento.

Para uma segunda etapa, a análise de elementos finitos do motor será desejável, pois será possível direcionar e utilizar de forma harmoniosa o torque gerado pela interação estator / imã de rotor e o torque de relutância, fazendo com estas duas componentes de torque tenham uma interação de soma e produzam uma resultante de maior intensidade, gerando também uma menor temperatura do rotor.

A introdução de um sistema de travamento dos imãs demonstra ser importante, principalmente no de pólos salientes, tendo em vista que a utilização de cola, não mostrou ser eficiente.

A introdução da ventilação interna precisa ser repensada e implementada, pois a necessidade de ventilação forçada dificulta a utilização do motor não para fins acadêmicos, mas sim comerciais.

O desempenho apresentado, por ser um primeiro protótipo, mostrou-se satisfatório tendo em vista que o torque apresentado igualou-se ao torque do motor original apresentado e a velocidade quando em vazio também ficou próxima.

Para solucionar a queda na velocidade quando ocorre o aumento do torque, um sistema de realimentação deve ser implementado, pois este faria o papel de estabilizar o torque pela velocidade atuando diretamente no inversor de acionamento.

Outro ponto a ser desenvolvido, será a implementação de um sistema de acionamento mais robusto e prático que possa ser acoplado/integrado, diretamente à estrutura do motor sem a necessidade do controle de um micro-computador nas proximidades.

Em resumo, o trabalho supriu aos objetivos do início do projeto e deixa como sugestão para trabalhos futuros a construção de um segundo protótipo com:

- Análise por elementos finitos para utilização em harmonia do torque dos ímãs com o torque de relutância;
- Modelagem Matemática mais detalhada;
- Sistema de fixação dos ímãs;
- Ventilação interna;
- Sistema de acionamento em malha fechada integrado ao corpo do motor;
- Aplicação comercial.

Apêndice I- Corte e Magnetização do Imã

Decidido o formato do rotor, foram enviados os desenhos para a WEG que se encarregou de fazer os cortes nas lâminas e fornecer o rotor já montado faltando só a colocação dos ímãs.

Os dois blocos de Ferrita que foram adquiridos em um primeiro instante para o corte no formato côncavo, foram utilizados para o corte no novo formato. Este procedimento de corte foi realizado no próprio Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP.

Foi montado, um dispositivo que fixava uma serra mármore convencional com disco diamantado refrigerado a água em um trilho, que corria sobre o bloco de Ferrita, que permanecia fixo. Todo este trabalho foi em virtude da dificuldade de manusear e cortar a Ferrita, pois, ela apresenta grande dificuldade no corte além de se despedaçar com facilidade. O corte do ímã pode ser visto nas Figuras A.1 a A.6

Figura A.1 – Vista geral do dispositivo de corte do ímã

Figura A.2 – Dispositivo de corte do Imã

Figura A.3 – Vista superior do dispositivo de corte do Imã

Figura A.4 – Vista em detalhe do corte do Imã

Figura A.5 – Imã cortado

Figura A.6 – Peças de Imã cortadas

Com a obtenção dos ímãs cortados, faltava executar a magnetização. Para este procedimento foi construído um dispositivo com núcleo de ferro, que envolvia o rotor para que a magnetização do ímã ocorresse quando este já estivesse fixado no rotor; os rotores que ficaram a cargo da WEG, já se encontravam prontos.

O dispositivo de magnetização elaborado é constituído de uma fonte alimentadora de corrente contínua com tensão conveniente, banco de capacitores de capacitância relativamente elevada ($22.000\mu\text{F}$), dois contadores, um disjuntor, uma botoeira e o dispositivo de ferro que contém uma bobina com o devido número de espiras.

O funcionamento deste dispositivo, consiste na aplicação de tensão sobre o banco de capacitores para que estes sejam carregados. Depois disso, a alimentação é retirada e toda a energia do banco é liberada através da bobina na forma de um impulso, obtendo uma descarga praticamente instantânea sobre a bobina, resultando na magnetização dos ímãs,

devidamente polarizados, como pode ser visto em [1] e [2]. O dispositivo construído pode ser visualizado nas Figuras A.7 a A.12

Figura A.7– Vista superior do Dispositivo de imantação do Imã

Figura A.8– Vista em detalhe do Dispositivo de imantação do Imã

Efetuada o corte dos ímãs e sua magnetização, passou-se à etapa de montagem do motor.

Figura A.9 – Vista frontal do Dispositivo de Imantação do Imã

Figura A.10 – Detalhe do suporte do Dispositivo de Imantação do Imã

Figura A.11 – Vista frontal do suporte com o rotor a ser magnetizado

Figura A.12– Vista lateral do suporte com o rotor a ser magnetizado

Apêndice II - Acionamento do MBIPR

AII.1- Primeiro Sistema de Acionamento

O primeiro circuito montado para o acionamento do MSBIPR pode ser visto na Figura A.13 e o diagrama na Figura A.14

Figura A.13 – Circuito de acionamento do motor MBIPR (trapezoidal)

Neste circuito, os 4 sensores defasados de 90° acoplados ao eixo do motor com um disco plástico, cortado na forma da lâmina padrão do rotor, girando por dentro deles,

transforma-se em um *encoder* e, são alimentados por uma fonte CC de 12V, sendo constituídos por fotodiodos (transmissores) e fototransistores (receptores), que detectam a presença ou interrupção de luz.

Figura A.14 – Diagrama de acionamento do motor MBIPR (trapezoidal)

Quando a abertura do disco do encoder passa por um dos quatro sensores alocados a 90° entre si, estes emitem um sinal (Figura 1.4) que é direcionado a uma porta NAND (alimentada por 12V) para efeito de “quadratura” do sinal. O sinal originado da porta lógica é encaminhado a um fotoacoplador que tem por função separar o circuito de baixa (12V CC) do circuito de alta potência (220V DC). Quando o sinal chega ao fotoacoplador, o diodo emissor emite luz na base do fototransistor, liberando a condução de corrente (tensão já originada pela fonte do lado da potência) entre coletor e emissor. Este sinal é direcionado para uma das pontes de Mosfet (IRF 840) que está em série com uma das bobinas do motor. O sinal chega ao *Gate* (porta) de dois Mosfet posicionados diagonalmente (como pode ser visto na Figura A.13) que permite a condução entre *Drain* (dreno) e *Source* (fonte) do

Mosfet, aplicando a tensão de 220V DC na bobina. O disparo em diagonal possibilita a alimentação da bobina do motor, ora com degrau positivo de corrente, ora com degrau negativo. A sequência de alimentação pode ser visualizada na Figura 1.4. A descrição acima é idêntica para os demais sensores, lembrado, que somente um sensor é ativado em cada instante, e cada sensor é responsável por somente uma informação. Pode-se dar como exemplo :

- o sensor 1 que sempre que ativo irá colocar tensão/corrente positiva sobre a bobina *a* :
- o sensor 2 sempre irá colocar tensão/corrente negativa sobre a bobina *b* (como pode ser visto na figura 1.2.3).

Uma inversão do chaveamento das pontes altera o sentido de rotação do motor.

Este inversor não funcionou de maneira satisfatória, tendo em vista que problemas ocorriam quando a tensão de alimentação do motor ultrapassava 180V DC e conseqüentemente sua velocidade aumentava. Quando a alimentação se aproximava de 180V DC (tensão desejada do motor igual a 220V DC) a ponte de Mosfets entrava em curto-circuito queimando-os. Após vários estudos e tentativas concluiu-se que, para solucionar este problema seria necessário implementar dispositivos de segurança no inversor, que permitissem o monitoramento dos sinais, bem como um circuito de bloqueio que garantisse que somente dois Mosfets posicionados diagonalmente fossem acionados por vez no inversor. Este bloqueio garantiria que dois Mosfets posicionados no mesmo braço da ponte não poderiam conduzir ao mesmo tempo, evitando assim o curto-circuito. Para a implementação deste sistema o custo seria elevado, fugindo dos propósitos deste trabalho.

A solução encontrada foi a de utilizar um sistema que possuísse a função do inversor relatado acima mais as proteções e que foi desenvolvido e utilizado em [7] e [10].

A.II.2- Segundo Sistema de Acionamento

Este novo sistema de acionamento, que foi projetado e construído como pode ser visto em [10], precisou de algumas alterações, como a implementação do recebimento de mais um sinal de sensor, e a mudança na programação do software de gerenciamento.

O sistema pode ser dividido em três camadas principais:

- Camada de potência;
- Camada de interface analógico / digital
- Camada de processamento digital

Um diagrama esquemático pode ser visto na Figura A.15 e a foto do sistema na Figura A.16.

A função deste sistema é transformar a alimentação AC em pulsos alternados de corrente DC como mostrado na Figura 1.4.

A.II.2.1- Camada de Potência

A camada de potência engloba o conector de entrada AC, as fontes de alimentação, que permitem um isolamento elétrico entre a própria camada de potência e as demais camadas, o módulo retificador e o módulo inversor.

Figura A.15 –Diagrama Esquemático do Inversor de Acionamento do MBIPR

Figura A.16 – Inversor de acionamento do MBIPR

Figura A.17 – Diagrama Esquemático do Retificador

O Retificador possui entrada de 220V e capacidade de corrente contínua de 25A (muito superior à atual necessidade), com um circuito de carga responsável pela carga dos

capacitores do filtro DC com alta capacitância para a tensão utilizada (aproximadamente 2000 μ F). O esquema do conjunto retificador pode ser visto na Figura A.17

O diagrama do módulo inversor pode ser visto na figura A.18.

Figura A.18 –Diagrama Esquemático do Inversor

O inversor é composto pela ponte inversora que possui seis transistores IGBTs de potência, mais o circuito de acionamento de porta que permite a isolação dos sinais de controle, vindos do circuito de controle, e as portas dos IGBTs, mais as proteções de sobrecorrente e sobretensão na ponte inversora e, por fim, o circuito de supervisão de operação que monitora a corrente, a tensão, e a temperatura na ponte inversora e transmite esses dados para o circuito de controle que analisa e previne possíveis anormalidades. O monitoramento de corrente serve apenas para supervisionar e atuar em condições de sobrecarga da máquina. Para o caso de curtos-circuitos que possam destruir a ponte,

inversora, fato que ocorria no primeiro sistema de acionamento, o módulo inversor possui um laço de emergência interno no próprio bloco de acionamento das portas que desabilita as chaves da ponte inversora no caso de corrente excessivas, não destruindo o sistema.

A.II.2.2 - Interface Analógica / Digital

Esta camada tem por função fazer com que a camada de processamento tenha acesso a todas as demais camadas. Isto ocorre, devido o circuito de interface analógica/digital possuir A/D, saídas de relês e entradas de lógica digital.

Como elementos principais a Camada Analógica / Digital possui:

- Conversores Analógico / Digitais;
- Relê e acionador de relês, com isolador de ruído;
- *Drive* RS485;
- *Drives* para saídas digitais;
- *Drives* para entradas digitais;

Esta camada comunica-se com a camada de processamento digital através de um barramento paralelo, e este barramento é responsável pelo controle de todos os itens expostos acima.

A.II.2.3 - Camada de Processamento Digital

O processador utilizado é o LH77790, fabricado pela Sharp Microelectronics. Ele possui um *clock* de 24MHz realizando em média 22,5MIPS (milhões de instruções por segundo).

Internamente possui três geradores de PWM, três contadores/temporizadores configuráveis independentes. Realiza instruções do tipo multiplica / acumula, porém não possui conversor A/D interno.

O compilador em linguagem C utilizado para este processador foi o GNU CC, ou GCC (GNU Cross Compiler) sendo este de uso livre, sem necessidade de licença de uso.

A placa utilizada com o processador Sharp possui 128kBytes de ROM-Flash, 256kBytes de RAM e uma interface RS232C. O programa desenvolvido através do compilador é enviado para a placa por meio desta interface RS232C.

A placa do processador pode ser vista na Figura A.19.

Figura A.19 –Placa do Processador

Referências Bibliográficas

- [1] KRISHNAN, R.; *Electric Motor Drives – Modeling, Analysis, and Control*; 2001; Prentice Hall, New Jersey (USA).
- [2] HENDERSHOT JR. , J. R. ; MILLER, T. J. E.; *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*; 1994; Magda Physics Publishing and Oxford University Press, New York (USA).
- [3] MORETON, P.; *Industrial Brushless Servomotors*; 2000; Newnes, Oxford (UK).
- [4] KENJO, T. ; NAGAMORI, S.; *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*; 1985; Oxford University Press, New York (USA).
- [5] MILLER, T. J. E.; *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*; 1989; Oxford University Press, New York (USA).
- [6] KOSOW, I. L.; *Electric Machinery and Control*; 1964; Prentice-Hall, New Jersey (USA).
- [7] MONTEIRO, J. R. B. A.; *Estratégias de Acionamento e Controle em Máquinas CA de Imã Permanente com Fluxo não Senoidal*; 1997; Dissertação de Mestrado, EESC-USP, São Carlos (BRA).
- [8] KRAUSE, P. C. ; WASYNCZUK, O. ; SUDHOFF, S. D.; *Analysis of Electric Machines*; 1995; IEEE-Press, New York (USA).
- [9] CHAPMAN, S. J.; *Electric Machinery Fundamentals*; 2001; McGraw-Hill, New York (USA)
- [10] MONTEIRO, J. R. B. A.; *Transformação DQ Não senoidal Para Máquinas Síncronas Com Imã Permanente no Rotor*; 2002; EESC-USP, São Carlos (BRA).