

Rafael Henrique Trindade

**ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS
NÃO-CONVENCIONAIS:
Motor *Brushless DC***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga

São Carlos
2009

Dedicatória

Aos meus pais

Agradecimentos

Ao Professor Diógenes Pereira Gonzaga pela orientação e constante disponibilidade em auxiliar na elaboração deste trabalho.

Ao meu pai, Wladimir, à minha mãe, Isabel, ao meu irmão, Renan, e à minha namorada, Fernanda, que sempre me apoiaram, desde quando decidi ingressar no curso de Engenharia Elétrica.

A todos os meus familiares pelos diversos votos de incentivo. Em especial, aos meus tios, César e Célia, e minhas primas, Aline e Isabela, pela generosa hospitalidade e convivência durante este último ano de graduação e de estágio na cidade de São Paulo.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Tabelas	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. Introdução	1
2. Motores Brushless DC	3
2.1 Princípio de funcionamento	3
2.2 Configurações	5
2.2.1 Rotor de entreferro axial	5
2.2.2 Rotor externo	5
2.2.3 Rotor interno.....	6
2.2.4 Número de fases	6
2.2.5 Número de ranhuras do estator e pólos	7
2.3 Comutação eletrônica	7
3. Modelagem	9
3.1 Perdas por enrolamento	9
3.2 Torque eletromagnético de um BDCM	10
3.2.1 Curvas Torque x Velocidade	10
3.2.2 Oscilação do torque.....	11
3.2.3 Fontes de pulsação no torque.....	11
3.3.4 Minimização das oscilações no torque	12
4. Ensaio	13
5. Conclusões	17
Referências Bibliográficas	19
APÊNDICE A - Materiais Magnéticos	21
A.1 Ímãs permanentes	21
A.1.2 A curva de histerese e as características de desmagnetização	21
A.1.2 Materiais de ímãs permanentes	23
A.1.3 Efeitos da variação de temperatura	24
A.1.4 Produto de Energia	25
A.1.5 Magnetização	25
A.2 Materiais ferromagnéticos moles	26

APÊNDICE B - Sensores de posição angular.....	27
<i>B.1 Sensores de efeito Hall.....</i>	<i>27</i>
<i>B.2 Encoders.....</i>	<i>28</i>
<i>B.3 Resolvers</i>	<i>29</i>
<i>B.4 Motores sem sensores</i>	<i>29</i>

Lista de Figuras

Figura 1: Motor CC elementar (HENDERSHOT; MILLER, 1994)	3
Figura 2: Formas de onda da f.e.m e torque eletromagnético	4
Figura 3: Rotor de entreferro axial (HENDERSHOT; MILLER, 1994)	5
Figura 4: Motor de rotor externo (HENDERSHOT; MILLER, 1994)	5
Figura 5: Motor de rotor interno (HENDERSHOT; MILLER, 1994).....	6
Figura 6: Circuito da ponte inversora trifásica.....	8
Figura 7: Forma de onda da corrente por fase e chaves em condução	8
Figura 8: Circuito equivalente de um BDCM em Y.....	9
Figura 9: Componentes do torque de um BDCM (GIERAS; WING, 2002)	11
Figura 10: Montagem para os ensaios.....	13
Figura 11: Circuito de controle e ponte inversora	14
Figura 12: Esquema utilizado para alimentação do BDCM.....	14
Figura 13: Curva torque x velocidade	15
Figura 14: Curva rendimento x torque	16
Figura 15: Curva de histerese (HENDERSHOT; MILLER, 1994).....	21
Figura 16: Segundo quadrante da curva de histerese (HENDERSHOT; MILLER, 1994)	22
Figura 17: Evolução dos ímãs permanentes desde 1900 (HENDERSHOT; MILLER, 1994).....	23
Figura 18: Sensor Hall: a) princípio de funcionamento; b) diagrama de blocos do circuito integrado de um sensor Hall (GIERAS; WING, 2002).....	27
Figura 19: Sensores Hall em um BDCM de três fases (GIERAS; WING, 2002).....	28
Figura 20: Encoder óptico: 1-fonte de luz colimada; 2-grade; 3-máscara; 4-detector de luz.....	28
Figura 21: Princípio de funcionamento de um resolver (GIERAS; WING, 2002).....	29

Lista de Tabelas

Tabela 1: Desempenho do BDCM com número de fases diferentes	7
Tabela 2: Parâmetros do protótipo	13
Tabela 3: Desempenho do protótipo.....	15
Tabela 4: Principais propriedades de materiais magnéticos	24

RESUMO

TRINDADE, Rafael Henrique. **ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS NÃO-CONVENCIONAIS: Motor Brushless DC**. 2009. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

No presente trabalho são estudados os motores sem escovas com ímãs permanentes no rotor e fluxo não-senoidal, os chamados motores *brushless DC* (BDCM). Tais máquinas elétricas apresentam melhor desempenho, eficiência superior e outras vantagens em relação aos motores de indução monofásicos e aos motores de corrente contínua com comutadores. Seus princípios de funcionamento, principais configurações e estratégias de controle são descritos. É exibida a modelagem matemática de um BDCM ideal, a partir da qual foram obtidas as curvas características teóricas de torque versus velocidade e eficiência versus torque de um protótipo existente, as quais são comparadas com os resultados obtidos nos ensaios realizados.

Palavras-chave: Comutação eletrônica, Eficiência energética, Fluxo não-senoidal, Máquinas com ímã permanente, Máquinas elétricas, Motores brushless DC.

ABSTRACT

TRINDADE, Rafael Henrique. **UNCONVENTIONAL ELECTRIC MACHINES STUDY: Brushless DC Motor**. 2009. 30 p. Course Conclusion Paper (Graduation) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2009.

In this work the brushless motors with permanent-magnets in the rotor and nonsinusoidal flux, called brushless DC motors (BDCM) are studied. These electrical machines present better performance, higher efficiency and other advantages over single-phase induction motors and direct current commutation motors. Their basic principles, main configurations and control strategies are described. The ideal mathematical BDCM modeling is showed, from which based the prototype torque-speed and efficiency-torque theoretical characteristics which are compared to the experimental results.

Keywords: Brushless DC motors, Electric Machines, Electronic commutation, Energy efficiency, Nonsinusoidal flux, Permanent-magnet machines.

1. Introdução

A eficiência energética é uma questão de grande importância, uma vez que as atuais fontes de energia se mostram insuficientes no médio prazo diante dos atuais padrões de consumo, além de trazerem consigo impactos ambientais relevantes.

Diante desta situação, aliado ao incentivo do uso de energias renováveis e com o objetivo de mitigar os problemas relacionados aos padrões atuais de uso de energia, surge o desafio de se desenvolver tecnologias capazes de contribuir na redução das perdas existentes, desde a geração, passando pela transmissão e distribuição de energia elétrica e chegando até seu uso final. Dentre os diversos equipamentos vistos como cargas nos sistemas de energia, os motores elétricos têm expressiva participação consumindo 43% da eletricidade disponibilizada no Brasil (GARCIA, 2003).

No cenário atual os motores de indução, com rotor curto-circuitado (gaiola de esquilo), são os mais populares. Recentemente, com o rápido progresso nas tecnologias de eletrônica de potência e controle, sua aplicação tornou-se mais ainda difundida. As principais vantagens dos motores de indução gaiola de esquilo são sua característica construtiva simples, fácil manutenção, não existência de comutadores ou anéis coletores, baixo custo e boa confiabilidade. Suas principais desvantagens se referem à baixa eficiência no caso de motores de indução monofásicos, e ao fator de potência sempre indutivo, podendo apresentar valores muito baixos (GIERAS; WING, 2002).

Os motores de corrente contínua convencionais têm alta eficiência e suas características permitem que sejam empregados como servomotores. Entretanto, seu grande inconveniente é a necessidade do conjunto composto por comutador e escova, sujeito a desgaste e requerendo manutenção periódica (KENJO; NAGAMORI, 1985).

Durante o século 19 foram implementadas as primeiras máquinas excitadas por ímãs permanentes, mas devido ao uso de materiais ferromagnéticos de baixa qualidade (aço e aço-tungstênio) as máquinas de excitação eletromagnética se mostravam mais interessantes.

Com a criação do Alnico em 1932 (GIERAS; WING, 2002), a aplicação da excitação com ímãs permanentes foi revista. Entretanto, sua aplicação ficou limitada a pequenas máquinas de corrente contínua com comutadores. Atualmente, a maioria dos motores de corrente contínua de ímãs permanentes com comutadores utiliza ímãs de ferrita devido ao seu bom desempenho aliado ao seu baixo custo. Já os ímãs de terras raras, com propriedades magnéticas superiores, vêm aos poucos sofrendo uma redução em seu custo, permitindo sua aplicação em maior escala (GIERAS; WING, 2002).

A capacidade de processamento dos computadores atuais, que propicia a realização de simulações espaciais e projetos utilizando-se do Método de Elementos Finitos para análise do campo e

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

circuitos magnéticos (JULIANI, 2007), vem permitindo o desenvolvimento e a aplicação de motores de ímãs permanentes sem escovas (*brushless permanent-magnet motors*), tornando-os uma opção mais interessante frente aos motores de indução. Com o avanço das tecnologias na área de dispositivos semicondutores, o controle desses motores vem se tornando mais fácil de ser implementado, obtendo-se um custo-benefício melhor e permitindo que o motor possa operar numa ampla faixa de velocidade mantendo boa eficiência (GIERAS; WING, 2002).

Num motor de ímãs permanentes sem escovas, o rotor é composto de um ou mais ímãs e o enrolamento de armadura faz parte do estator, similar ao motor polifásico de corrente alternada convencional, sendo a configuração mais comum e mais eficiente a de três fases (KENJO; NAGAMORI, 1985). Desta maneira, a corrente da armadura não é conduzida através de escovas e comutadores ou anéis. Isto representa uma vantagem expressiva, uma vez que 90% das rotinas de manutenção padrão em motores estão relacionadas aos contatos deslizantes (GIERAS; WING, 2002).

Em um motor de corrente contínua com comutadores, a maior parte das perdas ocorrem no rotor o que dificulta a dissipação de calor, limitando a densidade de corrente aplicável no enrolamento da armadura. No motor de ímãs permanentes, praticamente todas as perdas de energia acontecem no estator, onde a dissipação de calor pode ser feita de maneira eficaz através de aletas na carcaça ou, no caso específico de máquinas de grande porte, através de um sistema de refrigeração por água (MONGEAU, 2004).

Além dessas vantagens, grandes ganhos podem ser obtidos com relação às características dinâmicas no motor de ímãs permanentes sem escovas, uma vez que seu rotor tem baixa inércia, há alta densidade de fluxo magnético e não há dependência da velocidade por limitações de corrente.

Neste trabalho, é apresentado um estudo sobre motores de ímãs permanentes sem escovas, mostrando as diferentes configurações e dando ênfase às características do protótipo desenvolvido, no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, por Teixeira (2006).

2. Motores Brushless DC

Os motores síncronos de ímã permanente (PMSC – *Permanent-Magnet Synchronous Motor*) são classificados em motores *Brushless AC* (BACM) e motores *Brushless DC* (BDCM). Os circuitos elétricos e magnéticos dos BACM e dos BDCM são similares, isto é, o enrolamento de armadura polifásico (geralmente de três fases), está localizado nas ranhuras do estator e o rotor com ímã permanente serve como sistema de excitação. Basicamente, o que os diferencia é a forma de onda da corrente aplicada ao enrolamento de armadura e a distribuição do fluxo magnético gerado (MONTEIRO, 2002).

Os *Brushless AC* são alimentados com formas de onda de tensão senoidal trifásica e operam no princípio dos campos girantes. Normalmente, não é necessária uma técnica de controle para a posição do rotor quando são constantes a tensão e a frequência (GIERAS; WING, 2002).

Já os *Brushless DC* usam realimentação direta da posição angular do rotor de modo que a corrente de armadura seja comutada entre as fases do motor, em sincronismo exato com a posição do rotor. Este conceito é conhecido como sincronização autocontrolada, ou comutação eletrônica. O inversor eletrônico e os sensores de posição são equivalentes aos comutadores mecânicos em motores de corrente contínua convencionais e, justamente por apresentarem tal característica, estes motores recebem este nome. São de construção mais simples que os *Brushless AC*, pois a disposição de suas espiras facilita a montagem dos estatores e podendo utilizar menor quantidade de fios de cobre (GIERAS; WING, 2002). No presente trabalho o foco estará direcionado no estudo deste motor.

2.1 Princípio de funcionamento

Fundamentalmente, o funcionamento de um BDCM pode ser comparado ao de um motor CC com ímãs permanentes no estator, conforme citado anteriormente. Num motor CC elementar, como ilustrado na Figura 1, uma espira é fixada ao rotor e o campo do estator é estabelecido por ímãs.

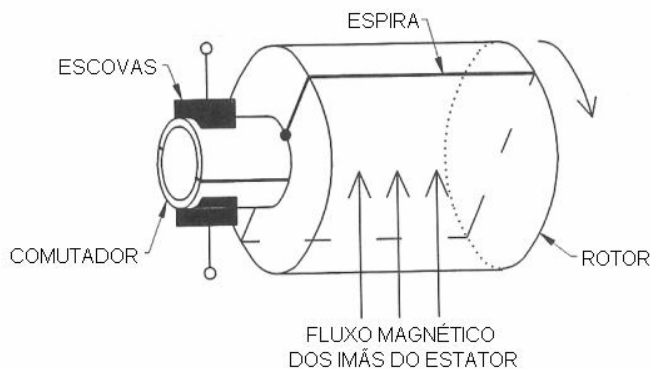


Figura 1: Motor CC elementar (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

Neste tipo de motor, o sentido da corrente que percorre a espira é controlado através do conjunto escova-comutador. A comutação deve sempre ocorrer no instante em que a posição angular do rotor é tal que o fluxo magnético do rotor se alinha ao fluxo do estator, de modo que a rotação se mantenha no mesmo sentido.

Já num BDCM, as comutações são efetuadas por comutadores eletrônicos (transistores bipolares de porta isolada, transistores de efeito de campo ou tiristores em comutação forçada) (JULIANI, 2009). A posição angular do rotor pode ser determinada por sensores como os do tipo Hall ou por uma estratégia *sensorless* (GONELLA, 2006) e é utilizada como realimentação no sistema de controle que gera os disparos dos comutadores.

Em ambos motores as formas de onda do fluxo concatenado ψ_1 em uma espira são exibidas na Figura 2a. A força eletromotriz (f.e.m.) e_1 gerada é trapezoidal (Figura 2b), de acordo com a lei da indução de Faraday (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = \omega_r \frac{d\psi_1}{d\theta} \quad 2.1$$

Nesta condição, a corrente de armadura i_1 tem a forma de onda quadrada (Figura 2c). Considerando-se um motor com três seções de enrolamentos de armadura, o torque gerado total é mostrado na Figura 2g e as suas contribuições por fase pelas Figura 2d, 2e e 2f.

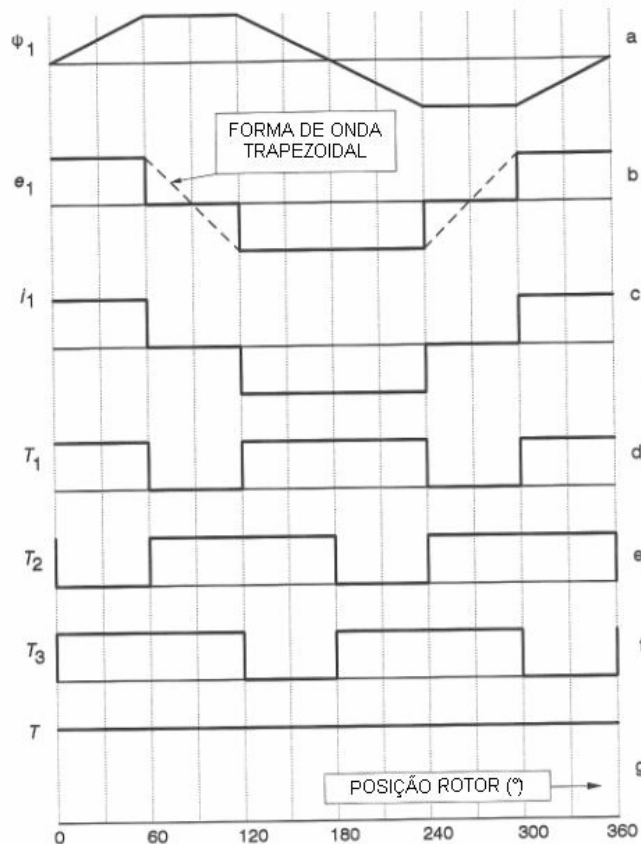


Figura 2: Formas de onda da f.e.m e torque eletromagnético (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

2.2 Configurações

Quanto à configuração, um BDCM pode ter diferentes tipos de rotores, número de fases, de ranhuras e pólos. Nas seguintes subseções, tais classificações são apresentadas com as suas principais características, brevemente descritas.

2.2.1 Rotor de entreferro axial

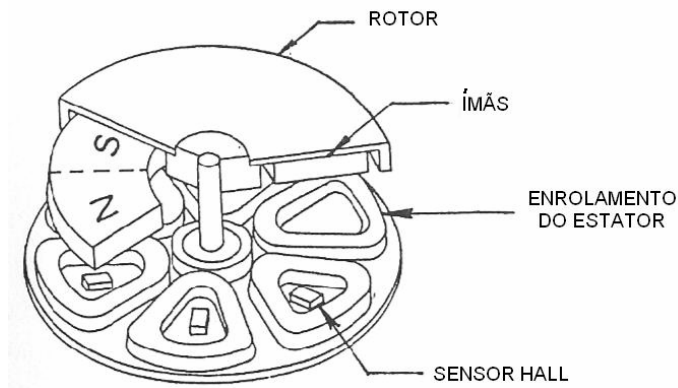


Figura 3: Rotor de entreferro axial (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

Quando se deseja um motor de velocidade baixa e constante ou pouco variável, o motor de entreferro axial deve ser escolhido, principalmente quando se deseja uma operação com torque sem oscilações. Exemplos de aplicações para tais motores são leitores de CDs e DVDs, leitores de disquetes, videocassetes, discos rígidos etc. Nestas aplicações, a potência de saída é baixa e a velocidade é geralmente menor que 1000rpm (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

2.2.2 Rotor externo

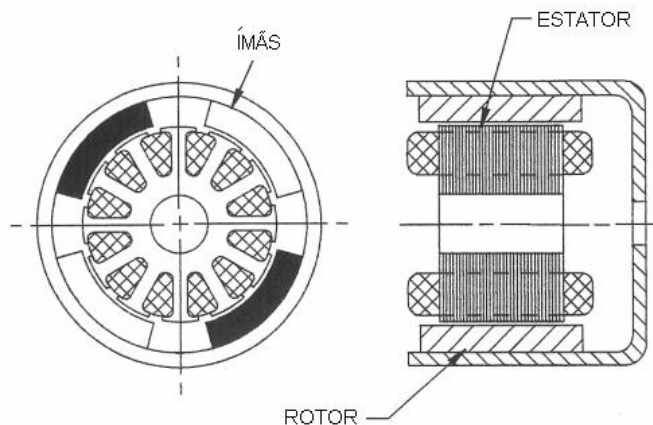


Figura 4: Motor de rotor externo (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

Nas aplicações em que se necessita de velocidades altas e constantes, o motor de rotor externo deve ser escolhido. Tal configuração é de fácil construção e baixo custo. A inércia relativamente alta do rotor é útil em aplicações como em ventiladores. Além disso, a montagem dos ímãs no rotor não é

crítica, uma vez que, em funcionamento, as forças que atuam sobre os ímãs não favorecem os seus descolamentos. O enrolamento de armadura de um motor CC convencional pode ser facilmente utilizado como estator de um BDCM de rotor externo (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

2.2.3 Rotor interno

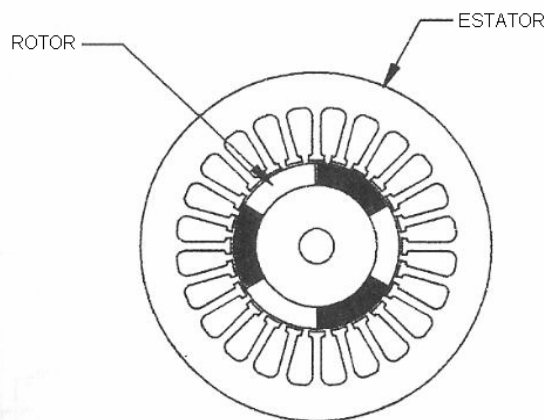


Figura 5: Motor de rotor interno (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

Quando se necessita de alto torque em baixas rotações é necessária a configuração com rotor interno, com ímãs de ferrita ou terras-raras e múltiplos pólos. Em motores de maior porte é possível alojar mecanismos, cabos ou sistemas para resfriamento no centro de seu rotor. Em geral, o estator de um motor CA de indução pode ser utilizado como armadura de um BDCM de rotor interno. Porém, quando se necessita de alta performance e rendimento se faz necessário o projeto de um estator com laminação adequada ao alto fluxo magnético dos ímãs de terras raras (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

2.2.4 Número de fases

Grande parte dos BDCM possuem três fases, mas não é a única configuração existente. Um dos primeiros BDCM lançados no mercado foi um motor de quatro fases fabricado pela Siemens, no início da década de 1960. Seu controlador possuía oito transistores, sendo dois por fase. Porém, tal configuração é muito rara atualmente. Há ainda, alguns BDCM de duas fases que são utilizados nos pequenos ventiladores usados na refrigeração de circuitos eletrônicos (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

Os motores com trifásicos se mostram mais interessantes por combinarem torque com baixa oscilação, melhor utilização dos condutores e menor número de comutadores eletrônicos, conforme é exibido na Tabela 1.

Tabela 1: Desempenho do BDCM com número de fases diferentes

Número de fases	Utilização de condutores %	Número de comutadores eletrônicos	Oscilação do torque %
1	50	2	100
2	50	4 ou 8	30
3	67	6 ou 3	15
4	75	8	10
6	83	12	7
12	92	24	3

Fonte: HENDERSHOT; MILLER, 1994

Além das outras vantagens, os motores trifásicos dispõem da flexibilidade de poder ter suas bobinas ligadas em Y ou Δ , sendo operados através de apenas três condutores sem perda na flexibilidade de controle. Podem trabalhar com ampla variedade de configurações dos ímãs e enrolamentos, sejam eles de distribuição senoidal ou não senoidal, utilizando-se das mesmas tecnologias para resfriamento de enrolamentos desenvolvidas para motores CA de indução e motores CC convencionais. Ainda podem ser operados com estratégias *sensorless*, que dispensam o uso de sensores de posição (GONELLA, 2006).

2.2.5 Número de ranhuras do estator e pólos

O número de pólos é determinado por fatores como o material dos ímãs, tipo de rotor (externo, interno, entreferro axial), montagem dos ímãs no rotor, velocidade de rotação de trabalho e características inerciais do rotor.

Deve-se considerar que o número de pólos é inversamente proporcional à velocidade máxima de rotação. Para velocidades muito altas, motores de dois ou quatro pólos são mais adequados, buscando redução das perdas por chaveamento excessivo e das perdas no ferro do estator. Quando se necessita de torque sem oscilações em baixas velocidades, o motor deverá ter um número grande de pólos (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

2.3 Comutação eletrônica

Para um BDCM trifásico, o circuito inversor utilizado é uma ponte inversora trifásica com seis dispositivos eletrônicos que são acionados como chaves e seis diodos de roda livre que protegem as chaves eletrônicas no momento em que são abertas. Estando as fases conectadas em Y ou Δ , o mesmo circuito inversor poderá ser utilizado, bastando apenas alterar o algoritmo de controle dos disparos de cada chave.

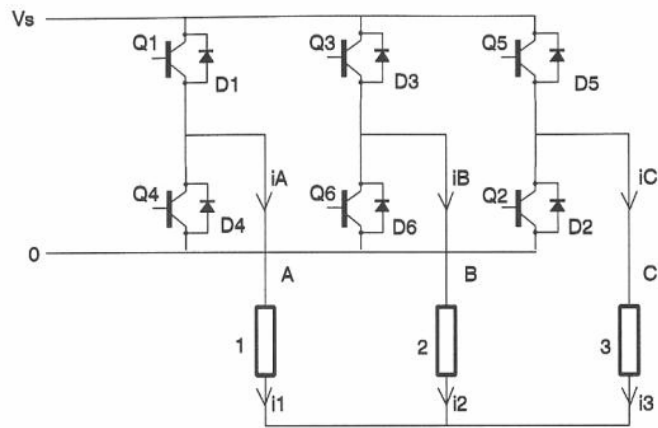


Figura 6: Circuito da ponte inversora trifásica (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

No acionamento elétrico de um BDCM conectado em Y (Figura 6), o controle do circuito de disparo dos transistores do inversor deve ser tal que cada fase do estator seja percorrida por uma corrente com a forma de onda quadrada. As formas de onda de cada uma das fases devem estar defasadas de 120° uma da outra.

Os disparos dos transistores são feitos de modo que sempre duas chaves estão fechadas, formando um circuito tal que a cada 60° elétricos o par de fases percorridas pela corrente se alterne e cada chave permanece em condução durante 120° elétricos. Na Figura 7 são representadas graficamente as formas de onda das correntes ideais de cada fase, o período de condução de cada chave eletrônica e o sentido da corrente nas bobinas do BDCM.

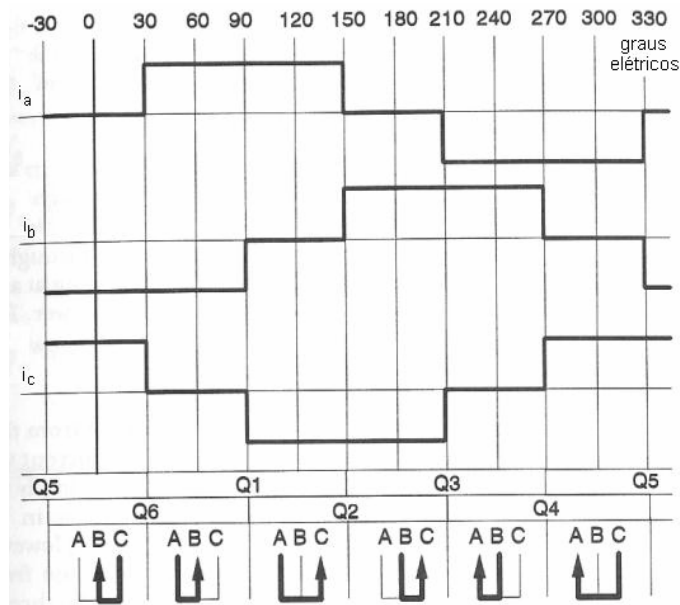


Figura 7: Forma de onda da corrente por fase e chaves em condução (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

3. Modelagem

O circuito elétrico equivalente de um BDCM é muito simples, sendo constituído de três fases simétricas e equilibradas, sendo cada uma constituída por uma resistência de enrolamento, uma auto-indutância, resultante da interação entre sua indutância própria e as indutâncias mútuas das outras fases, e uma fonte de tensão que representa a força eletromotriz (f.e.m.) trapezoidal produzida pelo deslocamento do fluxo do rotor nos enrolamentos do estator (MONTEIRO, 1997).

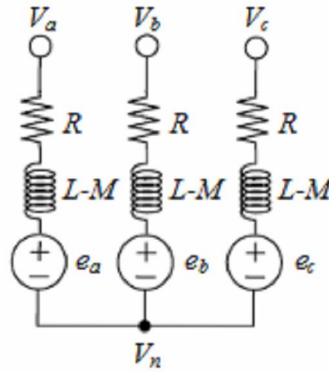


Figura 8: Circuito equivalente de um BDCM em Y

Da lei das tensões de Kirchhoff, o valor instantâneo da tensão da fase a do motor pode ser representada pela seguinte expressão:

$$V_a = e_a + R \cdot i_a + (L - M) \cdot \frac{di_a}{dt} - V_n \quad 3.1$$

onde e_a é o valor instantâneo da f.e.m. induzida pela excitação do ímã permanente em uma única fase do enrolamento de armadura, i_a é a corrente instantânea na fase a , R é resistência da armadura por fase, L é a indutância por fase e M é a indutância mútua.

Portanto, equação matricial do motor é:

$$[V] = [R] \cdot [I] \cdot [i] + [L - M] \cdot [I] \cdot \frac{d}{dt} [i] + [e] - [V_n] \quad 3.2$$

onde I é uma matriz identidade 3×3 .

3.1 Perdas por enrolamento

A corrente eficaz de armadura de um BDCM quando alimentado por uma onda quadrada de 120° é (GIERAS; WING, 2002):

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} i_a^2(t) dt} = I_a^{(sq)} \sqrt{\frac{2}{3}} \quad 3.3$$

onde $I_a^{(sq)}$ é o valor do patamar superior da forma de onda da corrente I_a e considerada igual à corrente de entrada do inversor.

Desta forma, as perdas no enrolamento de armadura trifásico ligado em Y podem ser expressas pela equação 3.4.

$$\Delta P_a = 2R \cdot [I_a^{(sq)}]^2 \quad 3.4$$

3.2 Torque eletromagnético de um BDCM

A seguir são apresentadas as equações do torque eletromagnético de um BDCM e sua equação mecânica.

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \quad 3.5$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - T_L - B\omega_r}{J} \quad 3.6$$

onde T_e é o torque eletromagnético, ω_r é a velocidade angular do motor, T_L é o torque da exercido pela carga acoplada ao eixo do BDCM, B é o coeficiente de atrito viscoso e J é o momento de inércia do rotor.

3.2.1 Curvas Torque x Velocidade

Considerando-se um BDCM ideal com as suas fases conectadas em Y, em que as comutações são perfeitas, as formas de onda das correntes quadradas e a fonte de alimentação é ideal, é possível representar sua tensão terminal como (GIERAS; WING, 2002):

$$V = E + 2R \cdot I \quad 3.7$$

onde E é a soma das f.e.m. das fases conectadas em série.

A equação 3.7 é a mesma de um motor CC convencional. A queda de tensão através dos comutadores eletrônicos é desprezada, considerando-os como ideais.

Com a equação 3.7 e a equação do torque eletromagnético (3.5), as características de torque e velocidade podem ser obtidas por:

$$\omega = \omega_0 \left[1 - \frac{T}{T_0} \right] \quad 3.8$$

onde a velocidade em vazio é

$$\omega_0 = \frac{V}{k\Phi} \text{ rad / s} \quad 3.9$$

O torque e a corrente com o rotor bloqueado são dados por

$$T_0 = k\Phi I_0 \quad 3.10$$

$$I_0 = \frac{V}{2R} \quad 3.11$$

3.2.2 Oscilação do torque

O torque instantâneo de um motor elétrico pode ser representado pela equação 3.12.

$$T(\alpha) = T_0 + T_r(\alpha) \quad 3.12$$

Ele possui duas componentes (Figura 9):

- Constante ou média T_0 .
- Periódica $T_r(\alpha)$, que é uma função do tempo ou do ângulo α , sobreposta na componente constante.

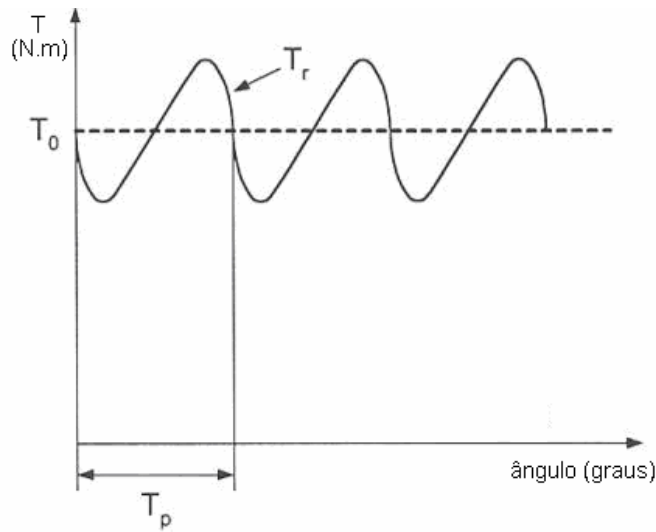


Figura 9: Componentes do torque de um BDCM (GIERAS; WING, 2002)

A componente periódica provoca uma pulsação no torque chamada de oscilação do torque (*torque ripple*). A oscilação do torque pode ser definida de diversas maneiras, a mais simples delas é:

$$t_r = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \quad 3.13$$

onde T_{\max} corresponde ao valor máximo atingido pelo torque instantâneo e T_{\min} é o seu valor mínimo.

3.2.3 Fontes de pulsação no torque

Há três fontes de oscilação no torque geradas pelas características construtivas do BDCM analisado, são elas:

- Efeito *cogging* (efeito de borda), isto é, a interação entre o fluxo magnético do rotor e a variação da permeabilidade magnética do entreferro devido à geometria das ranhuras do estator (GIERAS; WING, 2002).
- Distorção da distribuição trapezoidal da densidade de fluxo magnético no entreferro.
- A diferença entre a permeabilidade magnética do entreferro nos eixos d e q.

O efeito *cogging* produz o também chamado torque *cogging*, os harmônicos de alta ordem do fluxo magnético do entreferro produzem o torque eletromagnético do campo das harmônicas e a permeabilidade magnética desigual nos eixos d e q produzem o torque de relutância (GIERAS; WING, 2002).

As pulsações do torque também podem ser causadas por fatores externos à máquina, como oscilações na corrente de alimentação e a comutação entre as fases.

3.3.4 Minimização das oscilações no torque

As oscilações no torque podem ser minimizadas tanto no próprio desenvolvimento do motor quanto no controle do motor. Medidas que minimizam a oscilação do torque no projeto do motor incluem a eliminação de ranhuras, laminações do estator e ranhuras com formato especial, seleção do número de ranhuras do estator de acordo com o número de pólos, ímãs excêntricos, ímãs de desenho especial, substituição de um ímã por segmentos de ímãs, dimensionamento da largura do ímã, correta magnetização dos ímãs permanentes.

4. Ensaio

Neste capítulo são descritos os ensaios realizados e apresentados os resultados obtidos a partir do protótipo desenvolvido por Teixeira (2006). A configuração deste motor é tal que o seu rotor é interno, com quatro ímãs de ferrita em forma de arco e seu estator possui três fases, cada uma delas constituída por quatro bobinas, distribuídas em vinte e quatro ranhuras. Alguns dos parâmetros do motor são mostrados na Tabela 2, onde R é a resistência do enrolamento de cada fase, k_e é a constante elétrica do motor, V_{fn} é a tensão de fase nominal, T_n é o torque nominal e v_{ang} é a rotação nominal do motor.

Tabela 2: Parâmetros do protótipo

R (Ω)	k_e (V.s)	V_{fn} (V)	T_n (N.m)	v_{ang} (rpm)
4,31	0,41	150	4,62	4500

Fonte: TEIXEIRA, 2006

O protótipo foi fixado em um suporte com um motor de indução trifásico de maneira que os eixos de ambos permanecem mecanicamente acoplados (Figura 10). No motor de indução há um braço que transmite o torque aplicado pelo BDCM para um dinamômetro. Desta forma, torna-se possível obter o torque gerado pelo BDCM através da força medida no dinamômetro. Para variar a carga mecânica exercida contra o movimento do BDCM, o motor de indução teve os bornes de duas de suas três fases conectadas a uma fonte de tensão contínua variável.

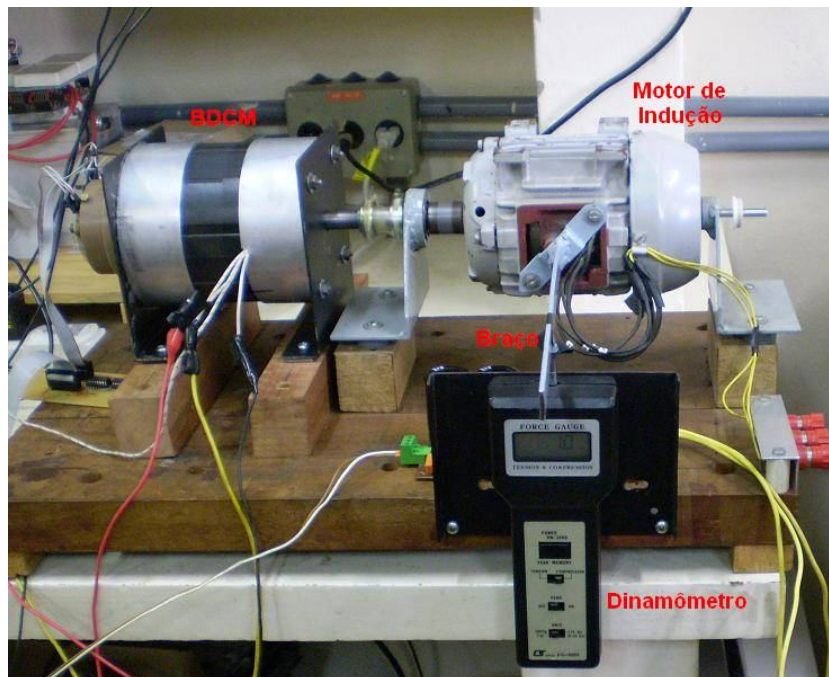


Figura 10: Montagem para os ensaios

O circuito de controle e a ponte inversora utilizados para o acionamento elétrico são exibidos na Figura 11. A tensão CC fornecida ao circuito inversor é obtida através de um circuito retificador,

que é alimentado por um regulador de tensão trifásico (VARIAC), permitindo que a tensão de saída do retificador possa ser ajustada. Na Figura 12 o esquema de alimentação utilizado é representado através de um diagrama de blocos.



Figura 11: Circuito de controle e ponte inversora



Figura 12: Esquema utilizado para alimentação do BDCM

Foram realizadas quatro séries de medições. Todos os ensaios foram realizados submetendo o BDCM a tensões e cargas inferiores às nominais, visando não ocasionar possíveis danos ao mesmo.

Na primeira série, o regulador de tensão foi ajustado de modo que a ponte retificadora fornecesse uma tensão contínua de 50V ao circuito inversor. Nas séries seguintes foram aplicadas as tensões de 70, 80 e 90V, respectivamente.

Em cada série de medições, ou seja, com tensão de alimentação fixa, a carga mecânica aplicada sobre o eixo do BDCM foi variada, obtendo-se para cada ponto a corrente fornecida pelo circuito retificador e a potência elétrica consumida pelo acionamento, além da velocidade, torque e potência mecânica do BDCM. Na Tabela 3 são apresentados os valores obtidos.

Com os pontos obtidos foi possível plotar trechos da curva torque x velocidade do protótipo (Figura 13). No mesmo gráfico, foram plotados os pontos da curva do modelo ideal, obtido através das equações 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11, quando submetido às mesmas condições de tensão e torque.

Tabela 3: Desempenho do protótipo

Tensão de saída do retificador (V)	Corrente de saída do retificador (A)	Potência Elétrica (W)	Velocidade (rpm)	Torque (N.m)	Potência Mecânica (W)
50	0,28	14,23	1245	0,031	4,02
	0,35	17,69	1210	0,060	7,55
	0,50	25,15	1100	0,109	12,55
70	0,30	20,79	1705	0,027	4,77
	0,35	24,24	1666	0,047	8,25
	0,49	33,53	1576	0,092	15,26
80	0,30	24,11	1965	0,035	7,19
	0,48	38,17	1825	0,090	17,28
	0,61	48,26	1727	0,138	24,90
	0,66	52,14	1681	0,152	26,77
90	0,30	27,21	2216	0,031	7,15
	0,38	34,29	2128	0,058	12,82
	0,59	52,73	1957	0,134	27,37
	0,63	56,20	1930	0,148	29,90

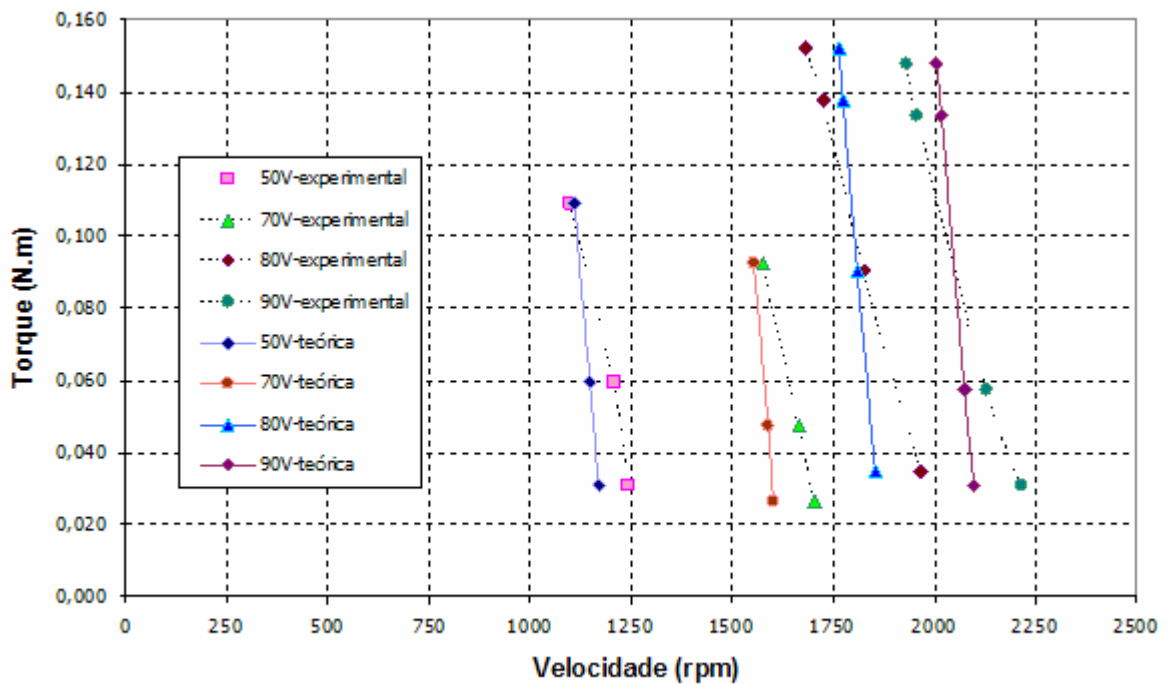


Figura 13: Curva torque x velocidade

O rendimento do BDCM (Equação 4.1) quando submetido a cada condição de carga foi calculado de maneira a comparar os valores experimentais com os do modelo ideal. Na Figura 14 são representados os valores obtidos.

$$\eta = \frac{P_{mecânica}}{P_{elétrica}} \cdot 100\% \quad 4.1$$

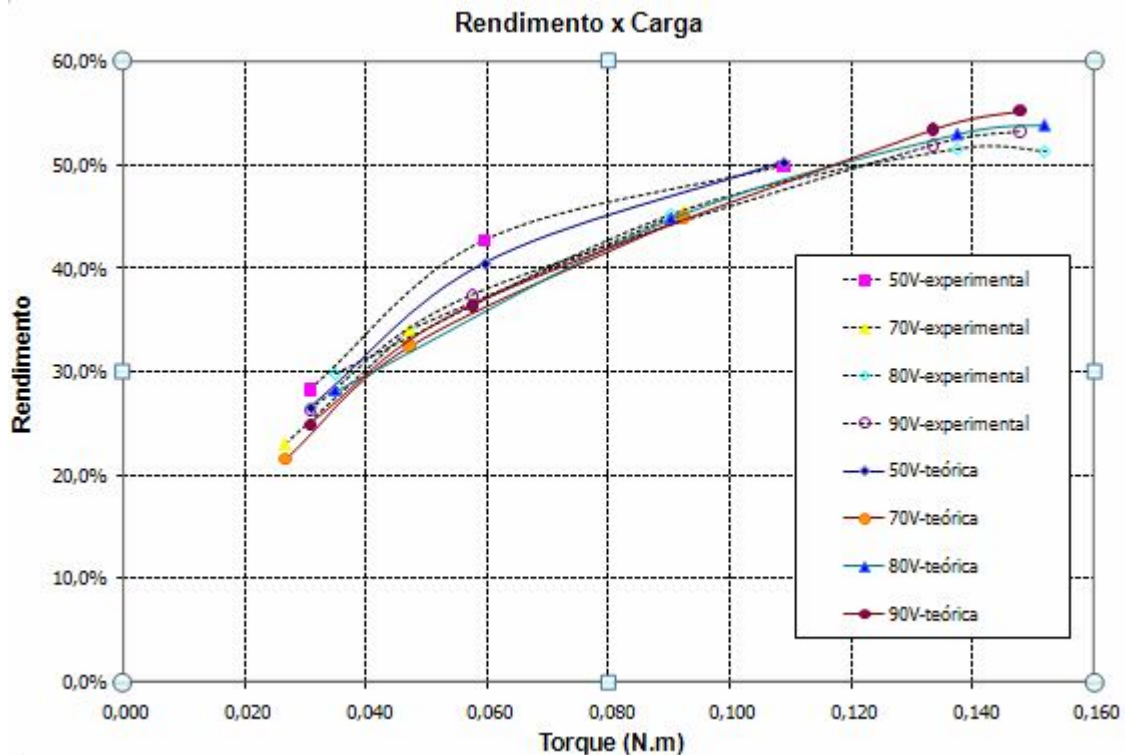


Figura 14: Curva rendimento x torque

Observando os gráficos da Figura 13 e da Figura 14, fica clara a coerência entre os resultados obtidos experimentalmente e os valores calculados para o modelo ideal. Os desvios entre os valores práticos e teóricos podem ser atribuídos às perdas no chaveamento dos componentes do circuito inversor, desconsiderados no modelo ideal.

Quanto ao rendimento relativamente baixo apresentado pelo protótipo, o mesmo pode ser justificado atribuindo-o às condições em que foi avaliado, submetido a condições de carga muito inferiores à nominal. Inclusive, fica claro o maior rendimento do motor nos pontos em que o torque mecânico aplicado ao eixo é maior.

5. Conclusões

São claros os benefícios gerados pela utilização de motores brushless DC em diversas aplicações em que outros tipos de motores são tipicamente empregados. O motor brushless DC traz consigo a vantagem de unir os pontos fortes dos motores de indução e os dos motores CC com comutadores, de maneira a eliminar os principais pontos críticos de cada um deles. Um BDCM tem o alto rendimento de um motor CC unido à construção simples, semelhante à de um motor de indução, e baixa manutenção trazida pela eliminação do conjunto comutador-escova.

Através da literatura consultada durante a realização deste trabalho foram identificadas as principais características construtivas e configurações existentes, de modo a relacioná-las aos requisitos de projeto e aplicações a que se destinam, seja no que se refere à velocidade nominal de trabalho, torque ou rendimento.

Diversos modelos matemáticos foram encontrados nas publicações existentes, sendo apresentado neste trabalho o modelo por fase, graças à sua simplicidade de compreensão e utilização mais difundida. Além disso, foram apresentadas as principais equações de desempenho do BDCM. Ênfase especial foi dada à caracterização das oscilações do torque gerado, crítico em certas aplicações que exigem torque constante.

Nos ensaios realizados foi possível obter algumas medições que, apesar de terem sido realizadas submetendo-se o protótipo a condições diferentes daquelas estabelecidas em projeto, não se distanciaram do comportamento do modelo ideal calculado quando submetido às mesmas condições de operação.

Referências Bibliográficas

GARCIA, A. G. P. **Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria.** 2003. 127 f. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/>>. Acesso em: 09 de novembro de 2009.

GIERAS, J. F.; WING, M. **Permanent Magnet Motor Technology.** First Edition. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002. 589 p.

GONELLA, M. C. **Acionamento e Controle Sensorless para Motores Brushless DC Aplicados a Compressores Herméticos para Refrigeração Doméstica.** 2006. 115 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/>>. Acesso em: 09 de novembro de 2009.

HENDERSHOT JUNIOR, J. R.; MILLER, T. J. E. **Design of Brushless Permanent-Magnet Motors.** First Edition. New York: Oxford University Press, 1994.

JULIANI, A. D. P. **Análise do campo magnético de um motor de ímã permanente no rotor utilizando o método dos elementos finitos.** 2007. 136 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/>>. Acesso em: 09 de novembro de 2009.

KENJO, T.; NAGAMORI, S. **Permanent-Magnet and Brushless DC Motors.** First Edition. New York: Oxford University Press, 1984. 194 p.

MILLER, T. J. E. **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives.** First Edition. London: Oxford University Press, 1989. 207 p.

MONGEAU, P. High Torque Density Propulsion Motors. In: ELECTRIC MACHINES TECHNOLOGY SYMPOSIUM, 2004. Philadelphia. **Naval Engineers Journal.** Virginia: American Society of Naval Engineers, 2005. p. 53-57. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com>>. Acesso em: 09 de novembro de 2009.

MONTEIRO, J. R. B. A. **Estratégias de Acionamento e Controle em Máquinas CA de Ímã Permanente com Fluxo Não Senoidal.** 1997. 120 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MONTEIRO, J. R. B. A. **Transformação DQ Não Senoidal para Máquinas Síncronas com Ímã Permanente no Rotor.** 2002. 108 f. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

TEIXEIRA, F. H. P. **Metodologia para Projeto, Construção e Ensaio em Máquina Síncrona de Ímã Permanente – MSIP.** 2006. 103 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/>>. Acesso em: 09 de novembro de 2009.

APÊNDICE A - Materiais Magnéticos

A.1 Ímãs permanentes

Serão apresentadas a seguir características, parâmetros e equações relacionadas aos ímãs permanentes. Curvas de magnetização, influência da temperatura e produto de energia são exemplos do que são apresentados.

A.1.2 A curva de histerese e as características de desmagnetização

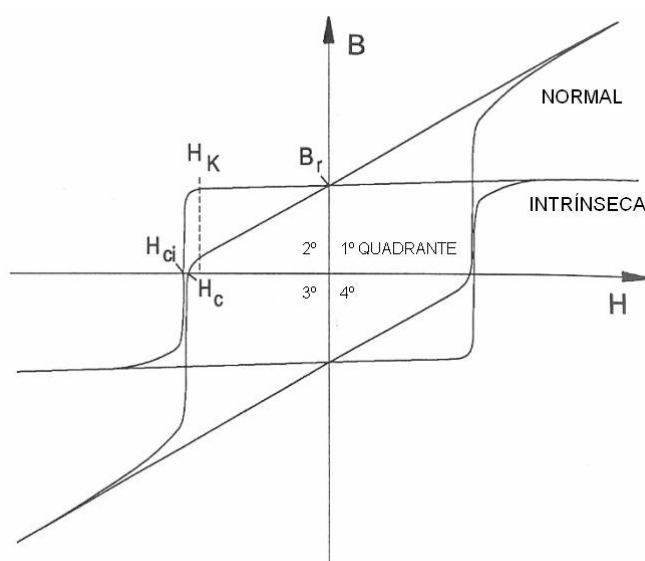


Figura 15: Curva de histerese (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

Na Figura 15 é exibida uma curva de histerese típica nas formas normal e intrínseca. A curva normal exibe a densidade de fluxo magnético total B_M como um função do campo magnético externo aplicado H_M e da magnetização intrínseca M do próprio material. Já a curva intrínseca exibe a polarização intrínseca J . A relação entre tais parâmetros é dada pelas seguintes equações (HENDERSHOT; MILLER, 1994):

$$B_M = \mu_0 \cdot H_M + J \quad \text{A.1}$$

$$J = \mu_0 \cdot M \quad \text{A.2}$$

$$B_M = \mu_0 \cdot (H_M + M) \quad \text{A.3}$$

Os pontos mais relevantes num loop de histerese são:

- Remanência: B_r – Valor correspondente ao fluxo magnético quando o campo magnético externo é nulo, $H_M=0$. Tal condição se equipara a um “curto-circuito magnético”, que poderia ser obtido caso o ímã fosse envolvido por um meio de permeabilidade infinita. Quanto maior o valor da indução remanente, maior será o campo magnético produzido pelo ímã (JULIANI, 2007).

- Coercividade: H_c – Valor da força magnética necessária para tornar o fluxo magnético nulo, isto é, o valor de H_M quando $B_M=0$.
- Coercividade Intrínseca: H_{ci} – Valor da força magnética que deve ser aplicada para que a polarização intrínseca seja reduzida a zero, ou seja, é o valor de H_M quando $J=0$. Quanto maior for o valor de H_{ci} , maior será a resistência à desmagnetização (JULIANI, 2007).
- Permeabilidade relativa *recoil*: μ_{rec} – gradiente da curva BH no ponto B_r e relativo a μ_0 . A permeabilidade relativa *recoil* de materiais magneticamente duros fica entre 1,0 e 1,1, isto é, muito próxima da permeabilidade do ar. Esta propriedade, apesar de contrariar o senso comum, contribui para que o efeito de desmagnetização da reação da armadura seja limitado (HENDERSHOT; MILLER, 1994).
- Limite de magnetização ou joelho da curva normal: H_k – o valor de H_M no segundo quadrante em que a curva J/H_M torna-se não linear. Caso o ponto de operação do ímã seja deslocado para a esquerda deste ponto haverá um decremento em sua magnetização, que poderá ser restabelecida apenas numa nova magnetização.

Os materiais magnéticos podem ter a forma isotrópica ou anisotrópica. São isotrópicos aqueles materiais que apresentam as mesmas propriedades em todas as direções. Já os anisotrópicos têm uma direção ideal na qual deve ser feita a magnetização, para que se tenha maior remanência e coercividade (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

Na Figura 16 são exibidos o primeiro e segundo quadrantes de uma curva de histerese típica. Inicialmente o material está sem magnetização, no ponto A. Com a aplicação de um campo magnético externo ($H_M > 0$) o ponto de operação é levado até o ponto B através da curva de magnetização inicial. Ao ser removido o campo externo, o ponto de operação se deslocará para o ponto C, no segundo quadrante. A localização do ponto C é determinada pela forma do ímã e pela permeância do circuito magnético em que ele está inserido. É possível determiná-la através da linha de carga. O segundo quadrante da curva de histerese maior é chamado de curva de desmagnetização. Caso o campo magnético aplicado seja insuficiente para magnetizar o ímã completamente, este operará no loop menor.

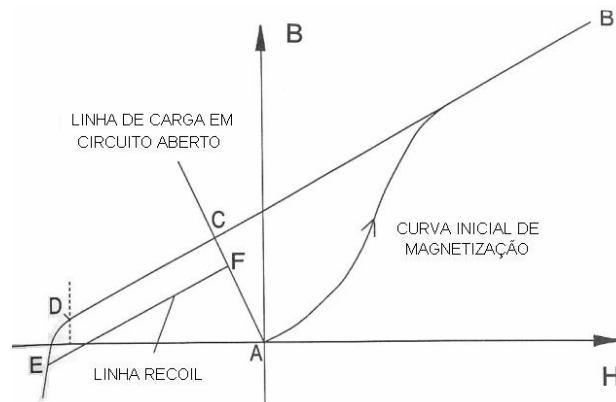


Figura 16: Segundo quadrante da curva de histerese (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

O ponto de operação pode ser deslocado para um ponto abaixo da curva de histerese com a aplicação de um campo externo desmagnetizante ($H_M < 0$). Desde que o ponto de trabalho não seja levado abaixo do joelho D, a redução de B_M será reversível, de tal modo que com a remoção do campo externo, o ponto de operação voltará ao ponto C. Caso o ponto de trabalho seja levado abaixo do ponto D, quando o campo externo for retirado o ponto de operação não voltará a sua posição original, não mais percorrendo a curva de desmagnetização. O ponto de operação se deslocará para um ponto da linha *recoil*, com menor densidade de fluxo. A linha *recoil* é representada por uma reta de inclinação igual à permeabilidade *recoil* $\mu_0 \cdot \mu_{rec}$ (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

Se o ponto de operação for levado abaixo do joelho D, o ímã perderá parte de sua desmagnetização de forma definitiva.

Após ser submetido a tais procedimentos, o ímã estará imune a uma eventual desmagnetização causada por campos magnéticos externos de intensidade inferiores ao maior valor negativo de H_M .

A .1.2 Materiais de ímãs permanentes

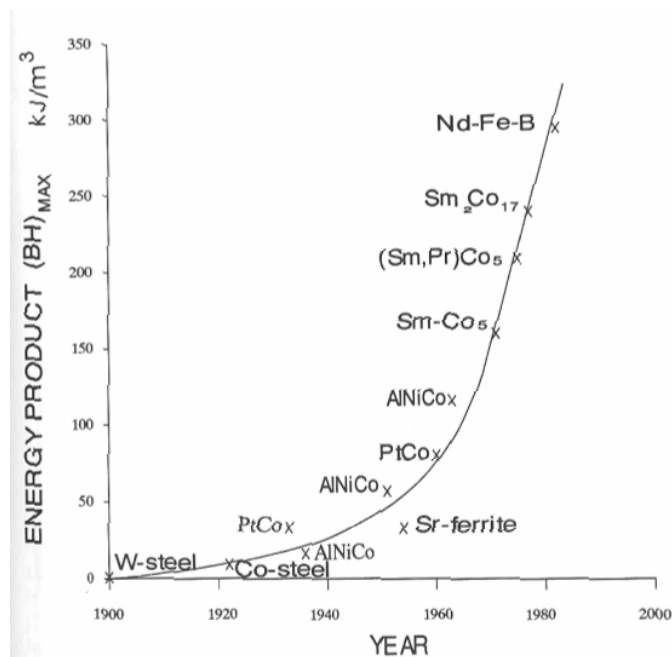


Figura 17: Evolução dos ímãs permanentes desde 1900 (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

Muitos dos recentes progressos no desenvolvimento de motores de ímãs permanentes sem escovas podem ser atribuídos às consideráveis melhorias nas propriedades de materiais magnéticos. Na Figura 17 é ilustrado o avanço na tecnologia de materiais magnéticos, é percebido o crescimento aproximadamente exponencial do valor do produto de energia ao longo dos anos. Na Tabela 4 são apresentadas as principais propriedades de alguns materiais.

Tabela 4: Principais propriedades de materiais magnéticos

Propriedade	Unidades	Alnico	Ferrita anisotrópica	Sm-Co sinterizado	Nd-Fe-B sinterizado
<i>Remanência B_r</i>	T	0,6 a 1,35	0,35 a 0,43	0,7 a 1,05	1,0 a 1,3
<i>Coercividade intrínseca (H_{ci})</i>	kA/m	40 a 130	180 a 400	800 a 1500	800 a 1900
<i>Permeabilidade recoil (μ_{rec})</i>		1,9 a 7,0	1,05 a 1,15	1,02 a 1,07	1,04 a 1,10
<i>$(BH)_{max}$</i>	kJ/m^3	20 a 100	24 a 36	140 a 220	180 a 320
<i>Força magnetizante</i>	kA/m	200 a 600	600 a 1700	1600 a 4000	2000 a 3000
<i>Resistividade</i>	$\mu\Omega\text{cm}$	47	$>10^4$	86	150
<i>Dilatação térmica</i>	$10^{-6}/^\circ\text{C}$	11,3	13	9	3,4
<i>Coefficiente de temperatura para B_r</i>	$\%/^\circ\text{C}$	-0,01 a -0,02	-0,2	-0,045 a -0,05	-0,08 a -0,15
<i>Coefficiente de temperatura para H_{ci}</i>	$\%/^\circ\text{C}$	-0,02	0,2 a 0,4	-0,2 a -0,25	-0,5 a -0,9
<i>Temperatura máxima de trabalho</i>	$^\circ\text{C}$	500 a 550	250	250 a 350	80 a 200
<i>Temperatura Curie</i>	$^\circ\text{C}$	850	450	700 a 800	310 a 350
<i>Densidade</i>	kg/m^3	7300	4900	8200	7400

Fonte: HENDERSHOT; MILLER, 1994

Desde a criação dos ímãs de ferrita, em 1953, constantes desenvolvimentos vêm sendo realizados de modo que os produzidos atualmente estão muito próximos de suas características teóricas limite e têm uma posição consolidada por ser o material com melhor custo-benefício para diversas aplicações (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

Os ímãs de Samário-Cobalto (Sm-Co) surgiram em meados da década de 1970. Estes ímãs apresentam maior produto de energia que os de ferrita e suportam maiores temperaturas. Porém, seu custo maior limita o seu uso predominante em situações que exigem operação sob temperaturas elevadas.

A geração mais recente de ímãs de terras raras surgiu na década de 1980. Os ímãs de Neodímio-Ferro-Boro (Nd-Fe-B) têm produto de energia superior ao dos ímãs de Sm-Co e são produzidos a partir de matéria-prima de menor custo. Porém, tais ímãs não são tão estáveis termicamente como os de Sm-Co e ainda são suscetíveis à corrosão (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

A.1.3 Efeitos da variação de temperatura

As características de todos os ímãs permanentes variam com a temperatura, em maiores ou menores proporções, de acordo com o material de que são constituídos. Os efeitos da variação da

temperatura são representados pelos coeficientes de temperatura de remanência (τB_r) e de coercividade intrínseca (τH_{ci}).

Na Tabela 4, apresentada anteriormente, fica claro que os ímãs de Ferrita e de Nd-Fe-B são os mais sensíveis às variações de temperatura e por isso são indicados para trabalhar sob temperaturas inferiores a 100°C (MILLER, 1989). Nas aplicações em temperaturas elevadas e que exigem alto desempenho magnético, ou motores em que há limitações na ventilação, os ímãs de Sm_2Co_{17} são os mais amplamente utilizados (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

Além disso, quando os ímãs são colados no rotor é importante observar-se o limite suportado pelo material adesivo utilizado. Dentre os adesivos de tecnologia mais avançada, o limite de temperatura suportada é de 180°C (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

A.1.4 Produto de Energia

O resultado do produto da densidade de fluxo magnético B pela intensidade de campo magnético H é o chamado produto de energia (JULIANI, 2007). Tal valor está relacionado com a densidade de energia do material, de modo que quanto maior for o produto BH menor será o volume necessário de material para a produção de um determinado campo magnético.

Geralmente, a qualidade do ímã é avaliada pelo valor máximo do produto de energia $(BH)_{max}$. Porém, tal valor pode ser considerado apenas quando se está trabalhando em um circuito magnético estático, onde não existe força magnetomotriz desmagnetizante proveniente de corrente elétrica. Já em motores elétricos, a corrente de armadura pode produzir forças desmagnetizantes de grande intensidade em condições de falha (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

Por isso, no projeto do motor é considerada a condição de circuito aberto ou em vazio, para que o ímã suporte as condições extremas de desmagnetização. Além disso, muitas vezes o produto $B_r H_k$ é preferido em relação ao $(BH)_{max}$, principalmente quando os ímãs ficam suscetíveis a fortes campos de desmagnetização. Este produto avalia a capacidade de produção de fluxo e a resistência à desmagnetização de um ímã quando submetido a uma força magnetomotriz externa.

A.1.5 Magnetização

O valor da força magnetizante H necessária para saturar um ímã varia de acordo com o material. A força magnetizante de saturação pode ser estimada pela multiplicação do valor da coercividade intrínseca por um fator k . Para materiais anisotrópicos seu valor é próximo de três e para materiais isotrópicos é aproximadamente igual a cinco (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

Na Tabela 4 são fornecidos valores típicos de forças magnetizantes para os materiais mais comuns. Os ímãs que possuem maior produto de energia necessitam de dispositivos especiais e de alta potência para sua magnetização, razão pela qual são adquiridos já magnetizados.

A.2 Materiais ferromagnéticos moles

Os aços usados na fabricação dos rotores e estatores de máquinas elétricas são chamados de moles por possuírem curvas de histerese estreitas, baixa coercividade e alta permeabilidade, essencial para que este material cumpra sua função como guia do fluxo magnético, absorvendo o mínimo possível de força magnetomotriz.

A baixa coercividade é necessária para minimizar as perdas por histerese, uma vez que em um BDCM o ferro da armadura é submetido a um fluxo alternado de alta frequência. A densidade de fluxo remanente destes materiais é relativamente alta, porém ela se justifica pela necessidade de uma alta densidade de fluxo de saturação, para que se possa suportar o máximo de fluxo numa seção menor, e com menor massa (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

APÊNDICE B - Sensores de posição angular

A posição do rotor dos BDCM é detectada através de sensores de posição, ou seja, sensores de efeito Hall, encoders e resolvers. Em máquinas girantes, os sensores de posição fornecem sinais ou respostas proporcionais à posição angular do rotor.

B.1 Sensores de efeito Hall

Os sensores de efeito Hall são sensores de campo magnético. Quando colocados em um campo magnético estacionário e alimentados com corrente contínua, geram uma tensão de saída (GIERAS; WING, 2002):

$$V_H = k_H \frac{1}{\delta} I_C B \cdot \sin\beta \quad \text{B.1}$$

onde k_h é a constante de efeito Hall em m^3/C , δ é a espessura do semicondutor, I_c é a corrente aplicada, B é a densidade de fluxo magnético e β é o ângulo entre o vetor de B e a superfície do sensor de efeito Hall. A polaridade depende de onde está o sensor, se no pólo Norte ou no pólo Sul. Desta forma ele pode ser usado como um detector de fluxo magnético (Figura 18).

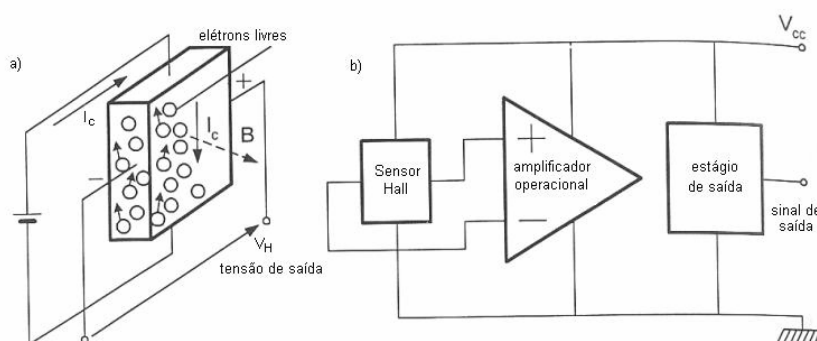


Figura 18: Sensor Hall: a) princípio de funcionamento; b) diagrama de blocos do circuito integrado de um sensor Hall (GIERAS; WING, 2002)

Para a determinação da posição angular do rotor de um motor *brushless DC* de três fases são necessários três sensores de efeito Hall (Figura 19). Todos os componentes necessários são frequentemente fabricados em um motor trifásico de dois pólos, os sensores, a princípio, devem estar defasados de 120° , entretanto, eles podem também estar posicionados em intervalos de 60° . Os sensores de efeito Hall são montados de modo que cada um deles gere uma onda quadrada defasada de 120° uma da outra, durante um ciclo elétrico do motor.

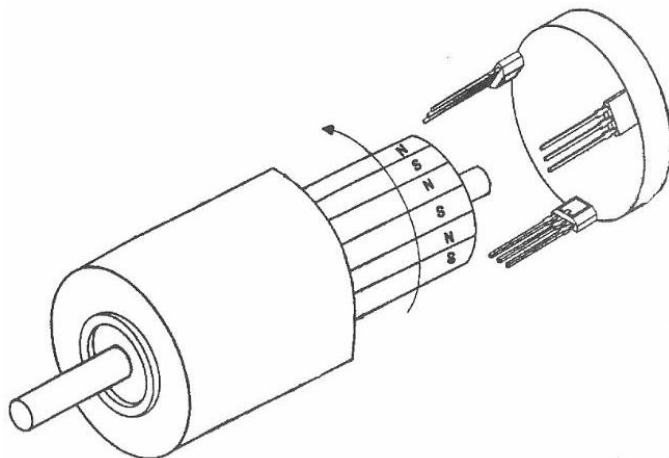


Figura 19: Sensores Hall em um BDCM de três fases (GIERAS; WING, 2002)

B.2 Encoders

Há dois tipos de encoders óticos: absolutos e incrementais.

Nos encoders óticos uma luz passa pela área transparente de uma grade e é captada por um foto detector. Para aumentar a resolução, uma fonte de luz colimada é usada e uma máscara é colocada entre a grade e o detector. A luz só chega ao sensor da seção transparente da grade e da máscara se estiverem alinhadas (Figura 20).

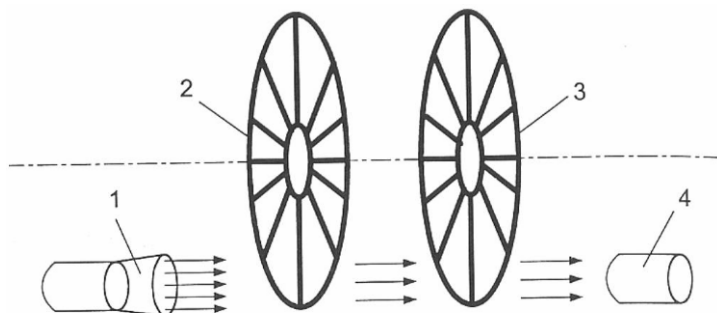


Figura 20: Encoder óptico: 1-fonte de luz colimada; 2-grade; 3-máscara; 4-detector de luz (GIERAS; WING, 2002)

Em um encoder incremental um pulso é gerado por um incremento dado pela posição angular do eixo que é determinada pela contagem dos pulsos de saída somados ou subtraídos de uma posição de referência. Seu disco tem uma única faixa de perfuração. Caso haja um eventual desligamento de sua alimentação, o encoder incremental perde sua referência e deve ser retornado para a posição inicial de referência.

O encoder absoluto é um verificador de posição que gera uma única informação a cada posição angular do eixo. Devido a um determinado número de canais de saída, toda posição angular do eixo é descrita por seu próprio e único código. Um encoder absoluto não é um dispositivo contador como o incremental e não perde sua informação de posição com seu desligamento (GIERAS; WING, 2002).

B.3 Resolvers

Um resolver é um transformador rotativo eletromecânico que fornece saídas em formas de funções trigonométricas de suas entradas. Para detecção da posição do rotor de um BDCM, o enrolamento de excitação, ou primário é acoplado ao rotor do resolver e os enrolamentos de saída, ou secundários são posicionados no núcleo do estator a uma determinada distância angular entre si. Como resultado, os sinais são formas de onda senoidais em quadratura, ou seja, uma onda é uma função senoidal do ângulo de desalinhamento θ e a segunda onda é uma função cossenoidal de θ (Figura 21).

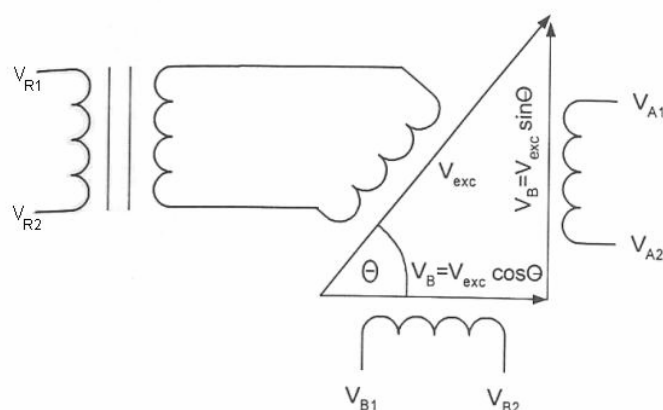


Figura 21: Princípio de funcionamento de um resolver (GIERAS; WING, 2002)

Para cada volta do rotor, é gerado um ciclo elétrico por cada saída do resolver. Tais sinais analógicos de saída são convertidos para a forma digital para que possam ser utilizados no sistema de posicionamento. A diferença entre as duas formas de onda indica a posição do rotor. A velocidade do motor é determinada pelo período das formas de onda geradas e a direção de rotação é obtida da defasagem entre as formas de onda. É comum o uso de um sistema de acoplamento magnético para fornecer a tensão ao enrolamento de excitação do resolver, localizado no rotor, no lugar de escovas e anéis deslizantes (GIERAS; WING, 2002).

B.4 Motores sem sensores

Há uma série de razões para eliminar sensores eletromecânicos de posição:

- Limitações na temperatura de operação dos sensores de efeito Hall.
- Em motores de potência inferior a 1W a energia consumida pelos sensores de posição é relativamente alta, reduzindo a eficiência do motor.
- Em aplicações de dispositivos compactos, por exemplo, discos rígidos de computadores, torna-se inviável a instalação de sensores de posição.

Para motores com ímãs permanentes e com potência de até 10kW, o custo de um encoder representa cerca de 10% dos custos para a construção do motor, variando de acordo com as características da máquina e do tipo de encoder. A eliminação de sensores eletromecânicos e seus

APÊNDICE B – SENSORES DE POSIÇÃO ANGULAR

cabos não apenas aumenta a confiabilidade, mas também simplifica a instalação do sistema (GIERAS; WING, 2002).

A estratégia de controle sem sensores de posição para um BDCM se baseia na detecção da passagem pelo zero da força contra-eletromotriz (f.c.e.m.) induzida no enrolamento da fase não excitada. Como no BDCM de trifásico apenas duas fases são excitadas simultaneamente, é possível medir a f.c.e.m. induzida na terceira fase e assim determinar a posição angular do rotor (GONELLA, 2006).