

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**MOTORES DC BRUSHLESS:
PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES**

Área de Engenharia Elétrica

por

Mateus Azevedo Spartano

Ely Carneiro de Paiva, Dr.
Orientador

Campinas (SP), Dezembro de 2006

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MOTOR DC BRUSHLESS
FUNCIONAMENTO E CONTROLE

Área de Engenharia Elétrica

por

Mateus Azevedo Spartano

Relatório apresentado à Banca Examinadora do
Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
Elétrica para análise e aprovação.
Orientador: Ely Carneiro de Paiva, Dr.

Campinas (SP), Dezembro de 2006.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, pelo incentivo ao estudo e dedicação. Dedico também a minha namorada que esteve em todos os momentos ao meu lado. Por fim dedico ao meu professor orientador e aos meus amigos acadêmicos que estiveram envolvidos diretos e indiretamente na conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço meu professor e orientador Ely Carneiro de Paiva pela dedicada orientação para a realização deste trabalho.

Agradeço também meus colegas de graduação e professores que participaram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE EQUAÇÕES.....	VIII
RESUMO.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. INTRODUÇÃO:.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
1.1.1. Objetivo Geral.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos.....	3
2. MOTOR DC CONVENCIONAL (BRUSHED).....	3
2.1. Aspectos Construtivos.....	3
2.2. Princípio de Funcionamento.....	5
3. MOTOR BLDC: FUNDAMENTOS.....	8
3.1. Aspectos Construtivos:.....	8
3.2. Construção do estator.....	9
3.3. Construção do rotor:.....	12
3.4. Sistema de operação do motor brushless:.....	13
4. MOTOR BLDC: SENSORES E REALIMENTAÇÃO.....	15
4.1. Sensores de Efeito Hall.....	15
4.2. Força contra eletromotriz (f.c.e.m).....	17
4.2.1. Característica do torque versus velocidade.....	19
5. MOTORES BLDC: ACIONAMENTO E CONTROLE.....	20
5.1. Controle da comutação do motor através do sensor Hall.....	21
5.2. Controle de comutação através da f.c.e.m (Sensorless).....	24
6. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MOTORES DC CONVENCIONAIS E MOTORES BLDC.....	27
7. CARACTERÍSTICAS DE TORQUE DE UM BLDC.....	29
7.1. Requerimento de torque de pico.....	29
7.2. Torque RMS.....	30
7.3. Limites de velocidade.....	30
8. APLICAÇÕES DE MOTORES BLDC.....	30
8.1. Aplicação com cargas constantes.....	31
8.2. Aplicações com cargas variáveis.....	31
8.3. Aplicação de posicionamento.....	31
8.3.1. Considerações finais.....	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
GLOSSARIO.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USF	Universidade São Francisco
BLDC	<i>Brushless direct current.</i>
DC	<i>Direct current.</i>
CC	Corrente contínua.
POLO N	Pólo Norte.
POLO S	Pólo Sul.
PM	<i>Permanent magnetic.</i>
F.c.e.m	Força contra eletromotriz.
Nd	<i>Neodymium.</i>
Sm	<i>Samarium.</i>
Co	<i>Cobalt.</i>
NdFeB	Liga entre Neodymium, Ferro e Boro.
REF	Referencia
PWM	<i>Pulse Width Modulated.</i>
Tp	Torque de pico.
Tr	Torque constante.
PID	Controle proporcional, integrativo e derivativo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Desenho (a) e foto (b) de um motor CC de 2 pólos.	4
Figura 2 Sistema de Comutação.....	5
Figura 3 Princípio de funcionamento do motor CC.	5
Figura 4 Comutador e escovas.	7
Figura 5 Motor Brushless desmontado (“da esquerda para direita” rotor, estator e sensor Hall).	9
Figura 6 Estator de um BLDC.....	10
Figura 7 f.c.e.m trapezoidal.....	11
Figura 8 f.c.e.m senoidal.	11
Figura 9 Rotor de ímã permanente.....	13
Figura 10 Seqüência de energização de um motor BLDC.....	14
Figura 11 Seção transversal de um motor brushless.	16
Figura 12 Curva característica torque versus velocidade.....	19
Figura 13 Típica forma de onda da corrente em um motor BLDC.....	20
Figura 14 Acionamento típico de um motor Brushless.....	21
Figura 15 Diagrama em blocos do controle de um BLDC (sensor Hall).....	23
Figura 16 Diagrama em blocos de um motor BLDC sensorless.....	25
Figura 17 Sinal do sensor Hall, contra f.e.m, torque de saída e fase da corrente.....	26
Figura 18 Curva trapezoidal da velocidade.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Sequência de comutação do motor BLDC [2].....	24
Tabela 2 Sequência de comutação do motor BLDC [2].....	24
Tabela 3 Comparação entre motor dc BLDC e motor dc convencional (Brushed) [2].....	28

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1:.....	17
Equação 2:.....	29
Equação 3:.....	29
Equação 4:.....	30

RESUMO

AZEVEDO SPARTANO, Mateus. **Brushless: Princípios e aplicações.** Campinas, Ano. 2006 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Campinas, 2006.

Motores dc brushless estão sendo usados largamente pela indústria automotiva, médica e outras, devido a sua eficiência, tamanho reduzido, baixo ruído e manutenção, silenciosa operação, eficiência e durabilidade. A grande vantagem destes tipos de motores é a possibilidade de controle preciso da rotação e torque. Sistemas de controle baseados na posição do rotor ou na força contra eletromotriz gerada no enrolamento do estator são grandes focos de pesquisa e estudos. Com o surgimento de novas tecnologias os sistemas de controle destes tipos de motores serão barateados e sua utilização em diversos ramos do mercado poderá aumentar.

Este trabalho apresenta uma síntese sobre a estrutura e os modos de controle e operação do motor dc brushless. Apresenta-se também um estudo comparativo com o motor dc convencional com escovas, listando suas vantagens e desvantagens. Será dada ênfase na aplicação do motor brushless em bomba de combustível em automóveis.

PALAVRAS-CHAVE: Motores sem escovas, motor DC, máquinas elétricas, servomotores.

ABSTRACT

The importance of Brushless dc motors is increasing in the last years, with many new applications in the industry as automotive, medical and others. The main reasons for that are their efficiency, low size, low noise generation, reduced maintenance, and greater durability. The great precision in the torque and speed control are other important advantages of this kind of electrical machine. The feedback control based on position sensors or the counter electromotive force (emf) are important areas of research under investigation. With the development of new technologies for the control of this kind of motors, their costs will be reduced and the range of applications will spread to different areas of the industry.

KEYWORDS: *dc motor, brushless dc motor, BLDC motor, motor control.*

1. INTRODUÇÃO:

Motores elétricos de brushless (BLDC) e seus drivers de controle estão ganhando grande popularidade no mercado de eletrodomésticos, automações industriais e automotivas nos últimos anos, devido à sua alta eficiência, silenciosa operação, forma compacta e baixa manutenção. Motores BLDC não utilizam escovas para comutação, porém utilizam um dispositivo eletrônico que faz a comutação baseando-se na posição do rotor através de um sensor de detecção de posição [1].

Embora o sistema de controle de velocidade do motor brushless seja complexo e tenha o custo elevado, pesquisas na área de semicondutores e drivers de controle estão criando tecnologias mais baratas para controle do motor BLDC possibilitando assim um aumento do uso deste tipo de motor.

A aplicação deste tipo de motor inclui: lavadora de roupas, ar condicionado, geladeiras, ferramentas elétricas, portões automáticos além de aplicações industriais. No mercado automotivo também há uma crescente demanda pelo controle eletrônico dos motores elétricos utilizados no automóvel, o que proporciona uma grande vantagem para os motores BLDC [2]. Como exemplo, podemos citar as bombas de combustível que atualmente são controladas por motores elétricos convencionais. Um motor de bomba de combustível com escovas tem em média uma vida útil estimada de 6.000 horas, devido ao desgaste das escovas. Para quem utiliza muito o automóvel esta estimativa pode significar menos de um ano de uso. Um motor BLDC tem uma estimativa de vida de mais de 15.000 horas aumentando a vida útil da bomba de combustível em aproximadamente 3 vezes. Esta mesma analogia é aplicável aos eletrodomésticos que utilizam motores dc convencionais ou motores a indução [1] [2].

As vantagens do uso do motor BLDC com relação ao motor convencional são inúmeras, citando-se algumas como:

- Melhor característica entre torque versus velocidade;
- Alta eficiência;
- Maior durabilidade;
- Baixo ruído;

- Altas taxas de velocidade.

Outra grande vantagem é a razão entre o torque fornecido e o tamanho do motor o que proporciona ao motor BLDC uma vasta utilidade, pois pode ser utilizado em aplicações onde o espaço físico disponível é um fator crítico.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Realizar um estudo prospectivo sobre os fundamentos e aplicações de motores DC sem escovas (BLDC), bem como um estudo comparativo com os motores DC convencionais com escovas.

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Realizar um levantamento detalhado sobre a construção física, componentes, modos de operação e princípios de funcionamento de motores BLDC.
- Realizar um levantamento sobre os modos de controle de um motor BLDC através de sensor Hall e através da força contra-eletromotriz (*sensorless*).
- Apresentar um estudo comparativo entre motor elétrico convencional, com escovas (brushed), e o BLDC.
- Apresentar o panorama de aplicações de BLDC.

2. MOTOR DC CONVENCIONAL (BRUSHED)

2.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

O motor de corrente contínua [5] (DC) é composto de duas estruturas magnéticas:

- Estator (enrolamento de campo ou ímã permanente);
- Rotor (enrolamento de armadura).

O estator é composto de uma estrutura ferromagnética com pólos salientes aos quais são enroladas as bobinas que formam o campo, ou de um ímã permanente. A figura 1 mostra o desenho de um motor DC de 2 pólos com enrolamento de campo [3] [4] [5].

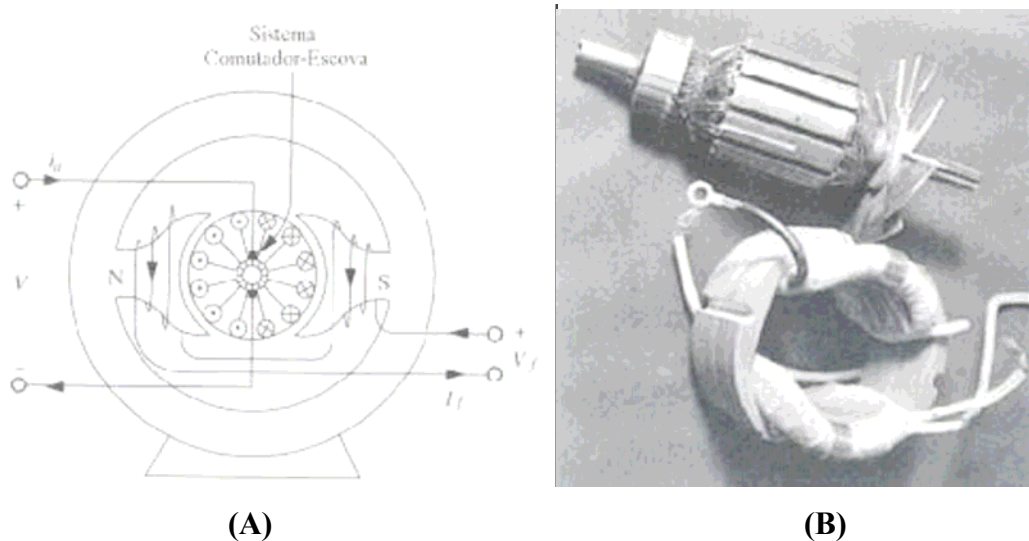


Figura 1 Desenho (a) e foto (b) de um motor DC de 2 pólos.

O rotor é um eletroímã constituído de um núcleo de ferro com enrolamentos em sua superfície que são alimentados por um sistema mecânico de comutação (figura 2). Esse sistema é formado por um comutador, solidário ao eixo do rotor, que possui uma superfície cilíndrica com diversas lâminas às quais são conectados os enrolamentos do rotor; e por escovas fixas, que exercem pressão sobre o comutador e que são ligadas aos terminais de alimentação [4]. O propósito do comutador é o de inverter a corrente na fase de rotação apropriada de forma a que o conjugado desenvolvido seja sempre na mesma direção.

Os enrolamentos do rotor compreendem bobinas de n espiras. Os dois lados de cada enrolamento são inseridos em sulcos com espaçamento igual ao da distância entre dois pólos do estator, de modo que quando os condutores de um lado estão sob o pólo norte, os condutores do outro devem estar sob o pólo sul. As bobinas são conectadas em série através das lâminas do comutador, com o fim da última conectado ao início da primeira, de modo que o enrolamento não tenha um ponto específico.

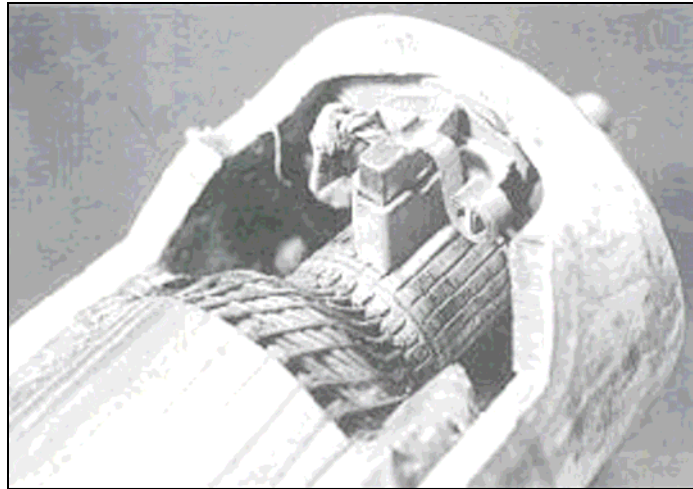


Figura 2 Sistema de Comutação

2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A figura 3 mostra, de maneira simplificada, o funcionamento do motor DC de dois pólos.

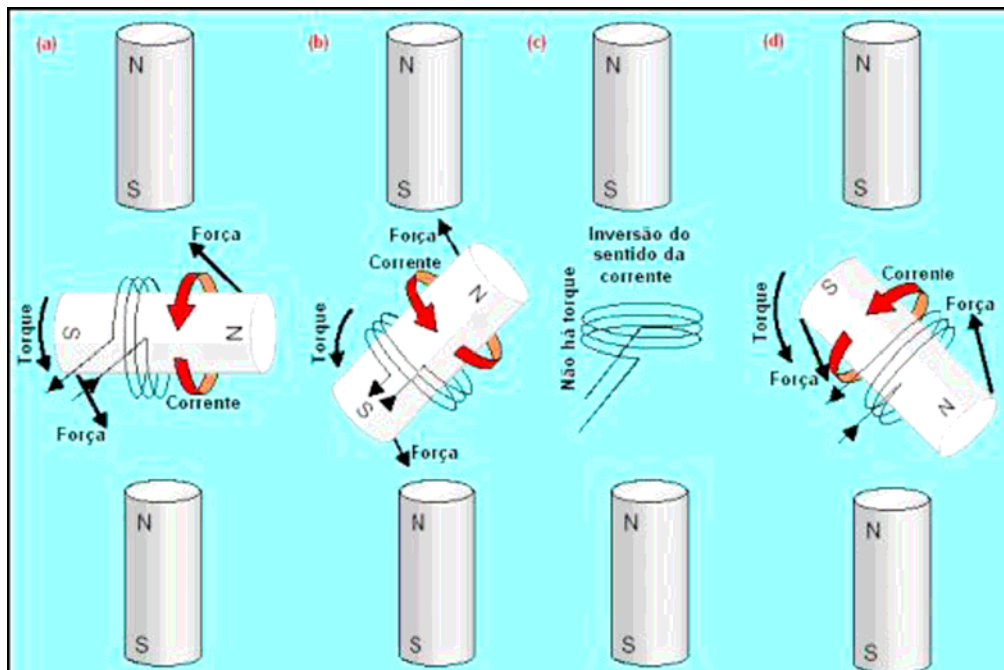


Figura 3 Princípio de funcionamento do motor DC.

A figura 3 acima é um desenho esquemático simples de um motor onde o estator é constituído por ímãs permanentes e o rotor é uma bobina de fio de cobre esmaltado por onde circula uma corrente elétrica [5]. Uma vez que as correntes elétricas produzem campos magnéticos, essa bobina se comporta como um ímã permanente, com seus pólos N (norte) e S (sul) como mostrados na figura.

A situação ilustrada em (a) onde a bobina apresenta-se horizontal. Como os pólos opostos se atraem, a bobina experimenta um torque que age no sentido de girar a bobina no sentido anti-horário. A bobina sofre aceleração angular e continua seu giro para a esquerda, como se ilustra em (b).

Esse torque continua até que os pólos da bobina alcancem os pólos opostos dos ímãs fixos (estator) [3]. Nessa situação (c) – a bobina girou de 90° – não há torque algum, uma vez que os braços de alavanca são nulos (a direção das forças passa pelo centro de rotação); o rotor está em equilíbrio estável (força resultante nula e torque resultante nulo). Esse é o instante adequado para inverter o sentido da corrente na bobina. Agora os pólos de mesmo nome estão muito próximos e a força de repulsão é intensa. Devido à inércia do rotor e como a bobina já apresenta um momento angular “para a esquerda”, ela continua girando no sentido anti-horário (semelhante a uma “inércia de rotação”) e o novo torque (agora propiciado por forças de repulsão), como em (d), colabora para a manutenção e aceleração do movimento de rotação [4] [5].

Mesmo após a bobina ter sido girada de 180° , situação não ilustrada na figura, o movimento continua, a bobina chega na “vertical” – giro de 270° –, o torque novamente se anula, a corrente novamente inverte seu sentido, há um novo torque e a bobina chega novamente à situação (a) – giro de 360° . E o ciclo se repete.

Essas atrações e repulsões bem coordenadas é que fazem o rotor girar. A inversão do sentido da corrente (comutação), no momento oportuno, é condição indispensável para a manutenção dos torques “favoráveis”, os quais garantem o funcionamento dos motores. A comutação consiste na mudança de uma lâmina do comutador, onde as bobinas são ligadas em série, para a próxima. Durante esta comutação a bobina é momentaneamente curto-circuitada pelas escovas, o que ajuda a liberar a energia armazenada, antes de a corrente fluir no sentido oposto [5]. Porém, como essa inversão de corrente não é instantânea, uma força eletromotriz é induzida na espira, o que origina uma corrente de curto-circuito

que circula no comutador, nas espiras e nas escovas. Após o curto-circuito, a interrupção dessa corrente dá origem ao aparecimento de faíscas nos contatos das escovas com o coletor, que podem gerar arcos elétricos perigosos e que danificam o coletor, devendo, portanto ser eliminadas [5].

A fim de eliminar as faíscas, torna-se necessário induzir na espira, durante o curto-circuito, uma força eletromotriz que anule a resultante do processo de comutação, conseguido através dos pólos de comutação, de menores dimensões e situados sobre a linha neutra e percorridos pela mesma corrente do rotor. No entanto estes pólos, além de anularem o fenômeno da comutação, enfraquecem o fluxo do estator – fenômeno chamado de “reação magnética do rotor” [4]. Nas máquinas de grandes dimensões esse fenômeno é eliminado através dos enrolamentos de compensação que, ligados em série com o rotor e colocados na periferia dos pólos do estator, geram um fluxo com a mesma intensidade e sentido contrário do fluxo de reação, anulando-o. A figura 4 mostra um desenho esquemático bastante simplificado de um motor DC com apenas uma bobina, o comutador e as escovas.

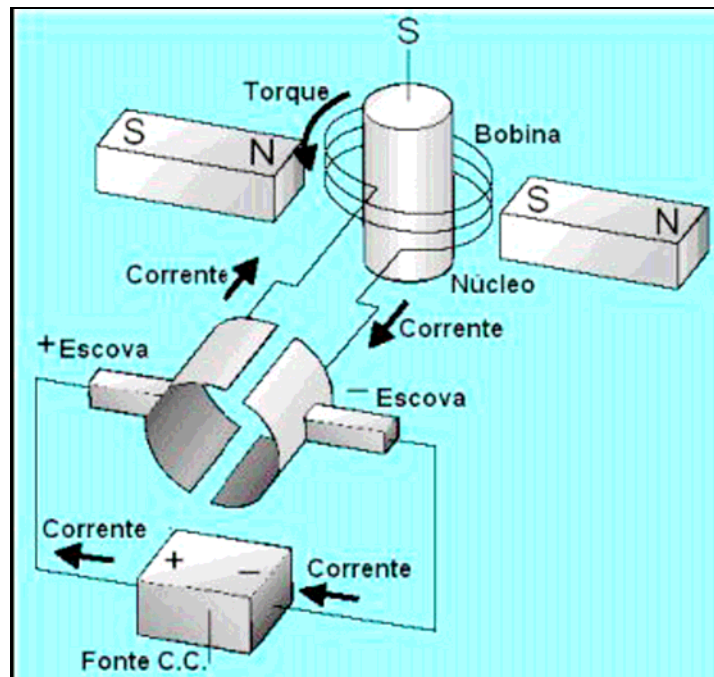


Figura 4 Comutador e escovas.

Em sua forma mais simples [5], o comutador apresenta duas placas de cobre encurvadas e fixadas (isoladamente) no eixo do rotor; os terminais do enrolamento da bobina são soldados nessas placas. A corrente elétrica “chega” por uma das escovas (+), “entra” pela placa do comutador, “passa” pela bobina do rotor, “sai” pela outra placa do comutador e “retorna” à fonte pela outra escova (-). Nessa etapa o rotor realiza sua primeira meia-volta. Nessa meia-volta, as placas do comutador trocam seus contatos com as escovas e a corrente inverte seu sentido de percurso na bobina do rotor. E o motor CC continua girando, sempre com o mesmo sentido de rotação [3] [5].

3. MOTOR BLDC: FUNDAMENTOS

3.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS:

O motor dc sem escovas (BLDC) é um tipo de motor síncrono, ou seja, ele recebe energia trifásica no estator e fornece energia mecânica ao eixo [6]. Isto significa que o campo magnético gerado pelo estator e o campo magnético gerado pelo rotor possuem a mesma frequência, ou seja, giram em sincronia e não é observado o escorregamento normalmente visto em motores a indução.

O motor síncrono AC recebe energia elétrica trifásica no estator e fornece energia mecânica ao eixo. Este tipo de motor apresenta as seguintes características:

- Velocidade constante;
- Velocidade dependente da frequência da rede;
- Baixa capacidade de arranque.

O BLDC [2] possui o mesmo princípio do motor síncrono, porém é um motor dc. O motor síncrono é ligado direto na rede trifásica, já o BLDC é ligado em uma fonte DC e uma eletrônica é responsável por comutar as fases no estator e fazer o motor girar. Falaremos mais sobre este assunto no capítulo 5.

BLDC são construídos com fase simples, 2 fases ou 3 fases. Correspondendo a este tipo de construção, o estator também terá 1, 2 ou 3 fases. Esta conclusão corresponde ao enrolamento do

estator, onde serão gerados os campos magnéticos. Este trabalho será focado nos motores com 3 fases, por serem mais populares e comumente usados.

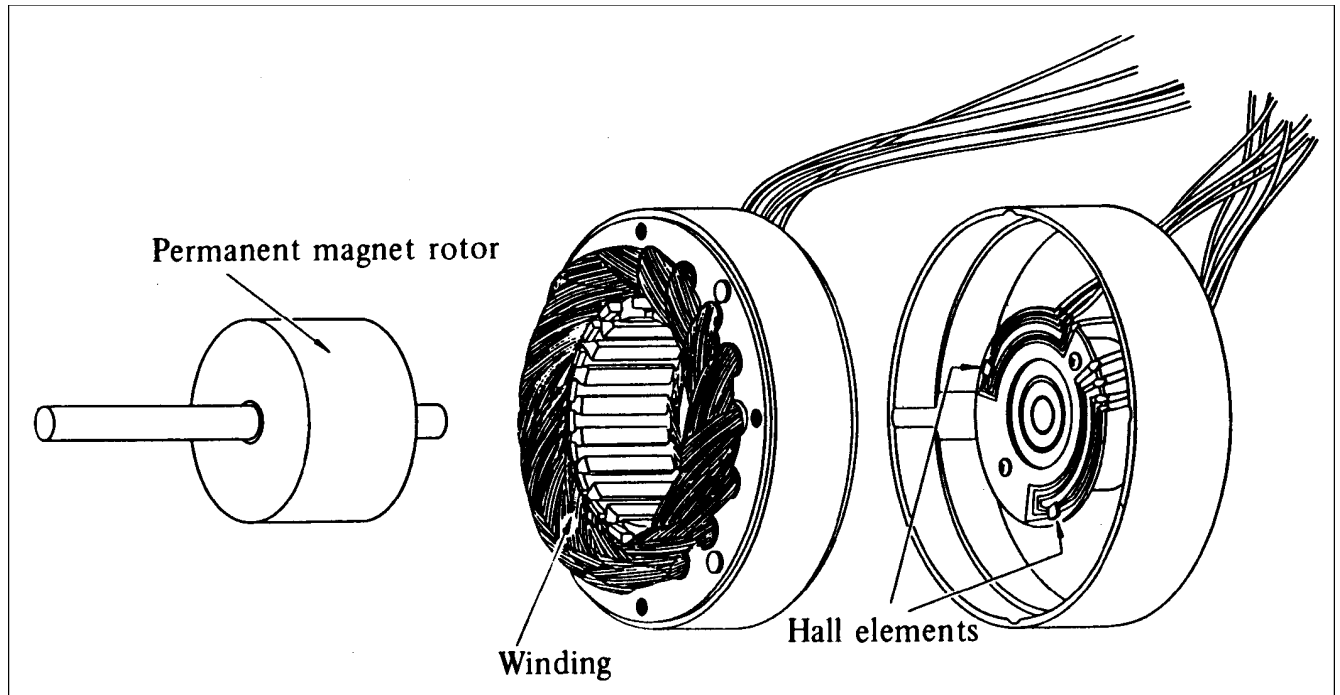


Figura 5 Motor Brushless desmontado (“da esquerda para direita” rotor, estator e sensor Hall).

3.2. CONSTRUÇÃO DO ESTATOR

O estator do motor BLDC é construído com finas lâminas de aço silício constituídas de sulcos (canais) e dentes. Estas lâminas são empilhadas e formam um conjunto chamado de pacote. Tradicionalmente, o estator do BLDC possui a mesma forma de um motor de indução, embora o enrolamento das bobinas que geram o campo elétrico seja distribuído de forma diferente. A maioria dos motores BLDC possui três enrolamentos de estator ligados de forma similar. Cada um destes enrolamentos é construído com numerosas bobinas de cobre de modo a formarem a bobina do estator. Estas bobinas são colocadas nos canais do estator e são ligadas formando assim o enrolamento do estator. Cada um destes enrolamentos é distribuído por todo o estator e formam os pólos do motor.

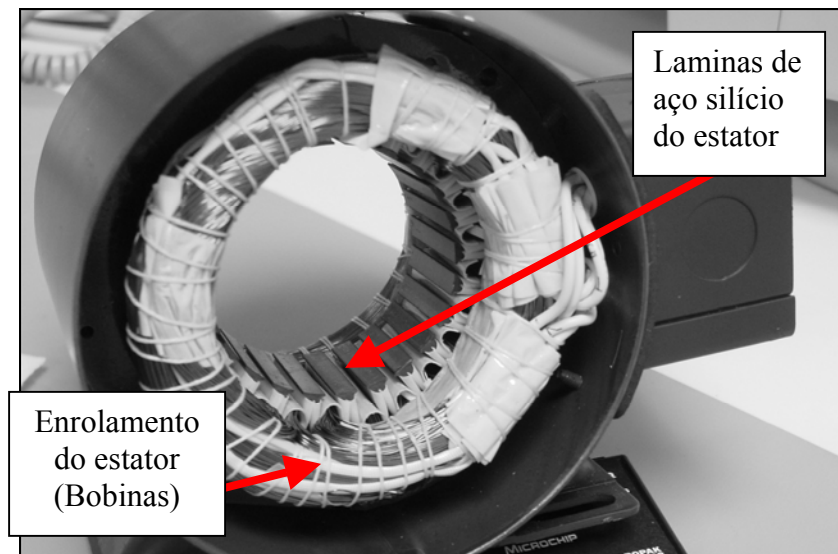


Figura 6 Estator de um BLDC

Existem duas formas diferentes de enrolamento do estator: Motores trapezoidais (Figura 7) e senoidais (Figura 8). Esta diferenciação é feita na forma como as bobinas são interligadas no enrolamento do estator, para obter diferentes tipos de força contra eletromotriz [2] [11].

O nome atribuído ao motor está associado à forma de onda da força contra eletromotriz que este gera. Portanto, o motor trapezoidal gera uma força contra eletromotriz (f.c.e.m) trapezoidal e o senoidal uma força contra eletromotriz senoidal. A corrente da fase também possui a forma trapezoidal ou senoidal. Isto faz com que o torque de saída do motor senoidal seja mais homogêneo e suave do que o motor com ligação trapezoidal, embora o preço de construção aumente, pois o motor com ligação senoidal tem um número maior de bobinas interligadas no estator, aumentando assim a quantidade de cobre empregado no enrolamento.

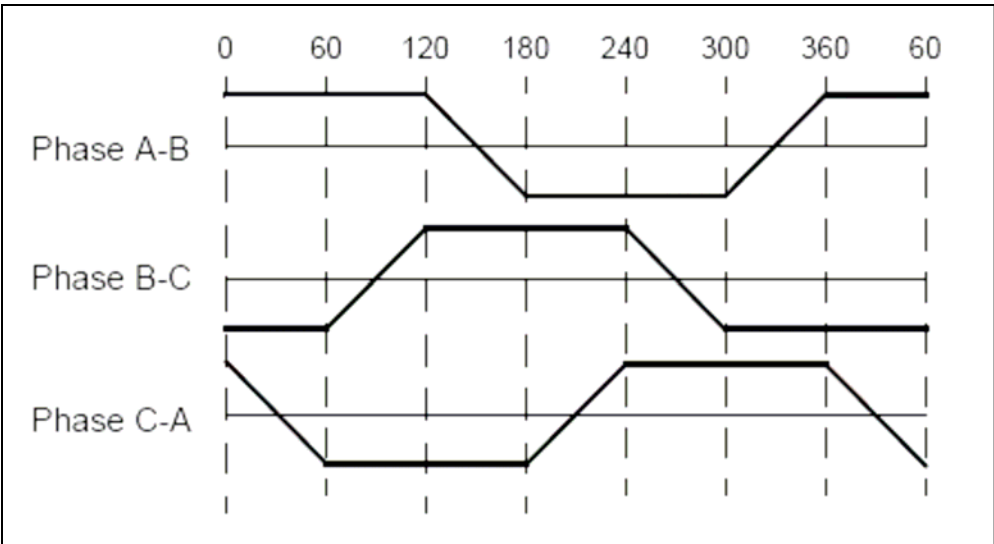


Figura 7 f.c.e.m trapezoidal

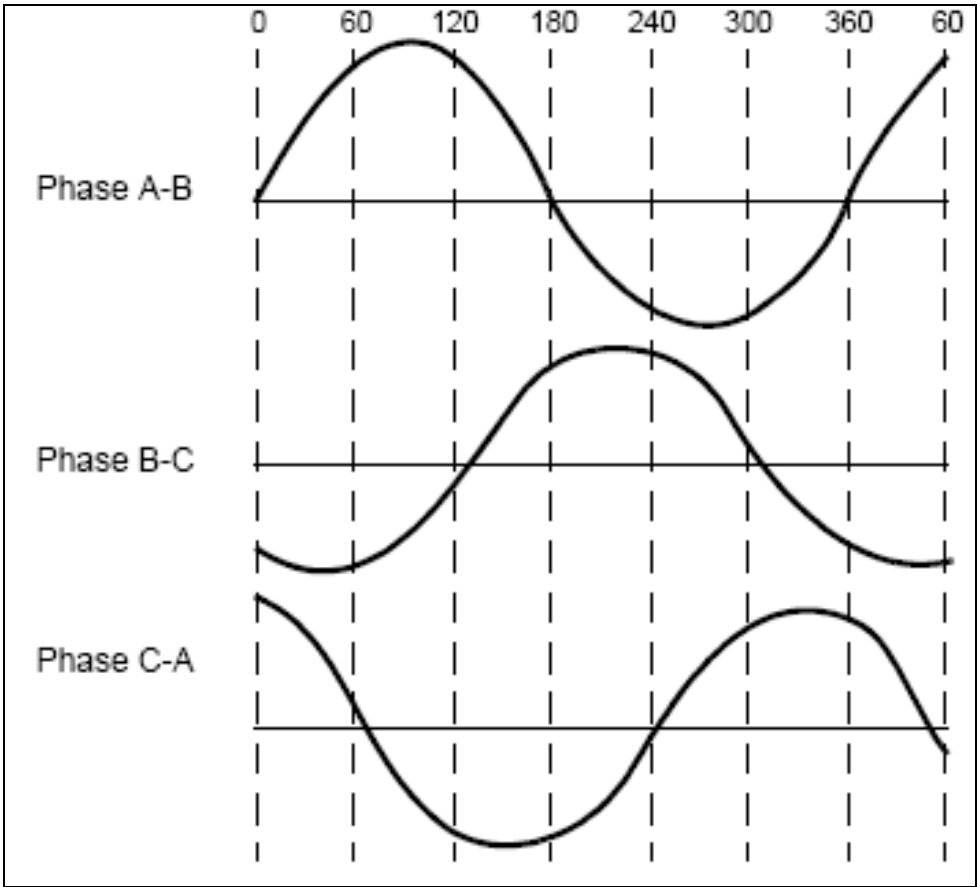


Figura 8 f.c.e.m senoidal.

3.3. CONSTRUÇÃO DO ROTOR:

O rotor é construído com ímãs permanentes em torno de um eixo, conforme figura 9 abaixo. A disposição dos ímãs no rotor pode variar de dois a oito pólos, sempre intercalados entre pólos norte (N) e pólos sul (S). Basicamente, o magneto usado é o Ferrite, por ser um material comum e barato.

Baseando-se na densidade de campo magnético no rotor, um material magnético apropriado é escolhido para a sua fabricação. O ímã de ferrite é o material mais comumente usado para a construção do rotor. Pesquisas na área de materiais magnéticos estão desenvolvendo materiais que possuem uma maior densidade de fluxo magnético por volume [2]. O ferrite tem a vantagem de ser barato, porém concentra uma baixa densidade de fluxo magnético, isso significa que o volume de material magnético empregado na construção do rotor tem de ser maior para produzir o mesmo torque que um motor construído com materiais de fluxo magnético maior. Isso faz com que a dimensão dos motores construídos com ferrite seja maior.

Neodymium (Nd), Samarium Cobalt (SmCo), e uma junção de Neodymium, Ferrite e Boro (NdFeB) são alguns exemplos de materiais magnéticos encontrados na natureza com grande capacidade de densidade de fluxo magnético [11]. Estes compostos são raros e extremamente caros. Pesquisas contínuas estão em andamento para desenvolver novos materiais com maior densidade de fluxo magnético para diminuir o tamanho do rotor. Materiais com grandes densidade de fluxo magnético são utilizados em motores de alta performance, pois proporcionam um alto torque, tanto na partida quanto em regime de funcionamento melhorando o rendimento do motor.

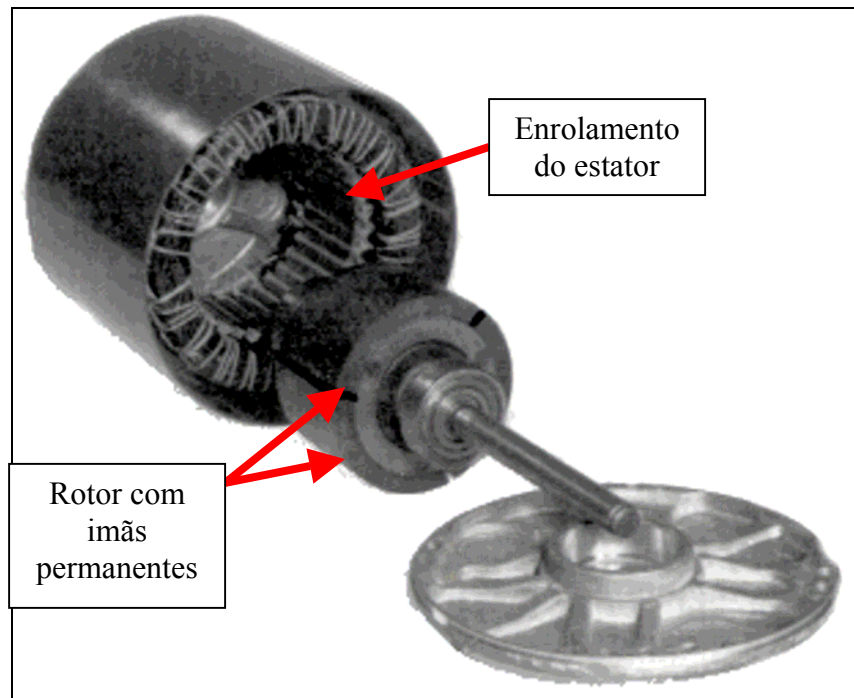


Figura 9 Rotor de ímã permanente.

3.4. SISTEMA DE OPERAÇÃO DO MOTOR BRUSHLESS:

As bobinas do estator são energizadas sequencialmente de forma a gerar um campo magnético girante no estator. O campo magnético gerado pelo ímã permanente do rotor em conjunto com o campo girante do estator produz um torque responsável pela rotação do rotor.

Quando um dos enrolamentos é energizado positivamente (a corrente entra no enrolamento) o segundo enrolamento está ligado negativamente (a corrente sai pelo enrolamento) e o terceiro fica não energizado (flutuando), conforme figura 10 abaixo [2] [11]. O torque é produzido por causa da interação entre o campo magnético gerado pelas bobinas de estator e o ímã permanente do rotor.

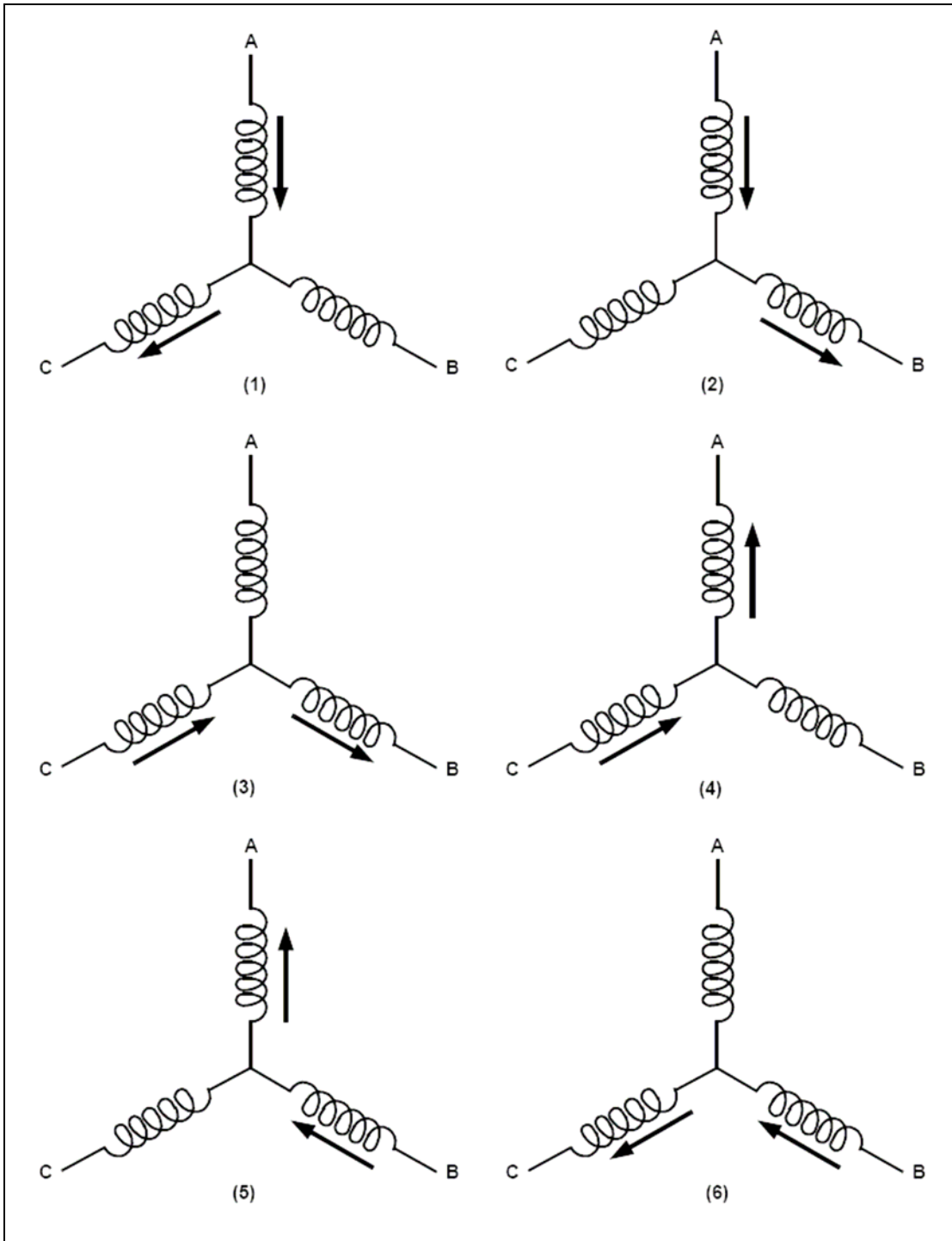


Figura 10 Seqüência de energização de um motor BLDC.

Idealmente o pico de torque ocorre quando estes dois campos estão a 90° e é nulo quando os campos movem-se juntos. Para manter o motor girando, o campo magnético produzido pelo enrolamento do estator deve mudar (comutar) de posição com o movimento do rotor. Deve-se observar uma sincronia (90°) entre o campo magnético do rotor e o enrolamento do estator para se obter um torque constante. Esta seqüência de comutação é conhecida como as “seis etapas da comutação”, a qual define a seqüência e energização das bobinas.

4. MOTOR BLDC: SENSORES E REALIMENTAÇÃO

Motores brushless apresentam um controle preciso de velocidade e posição do rotor. Este controle pode ser implementado de duas formas distintas: através de sensores baseados no efeito Hall, ou pela avaliação da força contra eletromotriz (f.c.e.m). Faremos uma breve síntese destas duas abordagens na seqüência.

4.1. SENSORES DE EFEITO HALL

Se uma corrente elétrica atravessa um condutor e este condutor é colocado em um campo magnético perpendicular ao sentido da corrente, é gerada uma diferença de potencial na parte mais externa do cabo (superfície superior e inferior). Esta diferença de potencial pode ser medida. Este efeito ocorre por causa do desvio de trajetória das cargas elétricas devido à força de Lorentz [4].

Diferentemente dos motores DC convencionais, a comutação nos BLDC é feita eletronicamente. Para o motor girar corretamente, as bobinas do estator devem ser energizadas em uma seqüência correta, e por este motivo [8] é importante saber qual a posição do rotor, a qual é estimada através do sensor de efeito Hall.

Quando os pólos magnéticos do rotor passam perto do sensor Hall, é gerada uma tensão alta ou baixa no sensor, indicando pólo N ou pólo S. Normalmente os motores BLDC são construídos com três sensores Hall localizados no eixo do rotor próximo aos pólos [11]. Baseando-se nesta combinação de três sensores Hall, a seqüência exata da comutação pode ser determinada.

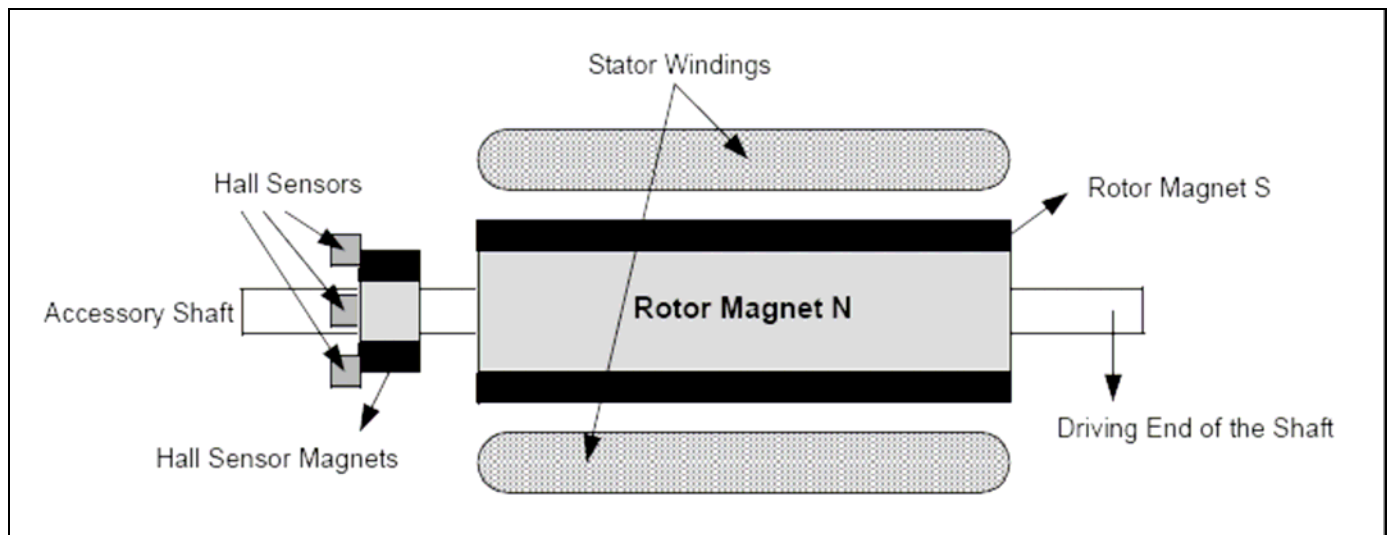


Figura 11 Seção transversal de um motor brushless.

A figura 11 mostra um corte transversal em um motor brushless, a qual possui alternados pólos N e S. O sensor Hall é montado dentro de uma parte estacionaria do motor. Montá-los dentro do estator desta forma é um processo complexo, porque qualquer desalinhamento de posição nestes sensores pode gerar um erro na determinação da posição do rotor. Para simplificar este processo de montagem dentro do estator, alguns motores possuem um pequeno magneto, réplica do ímã permanente do rotor, montados juntos aos sensores Hall. Quando o motor gira este magneto proporciona o mesmo efeito que o ímã permanente do rotor. A única diferença é que ele é montado próximo aos sensores Hall, reduzindo a praticamente zero o erro de posição. Normalmente, o sensor Hall é montado em uma placa de circuito impresso e é protegido por uma capa protetora vedada. Ele é instalado na parte não acoplada do motor [8] .

Baseando-se na posição física dos sensores Hall, existem duas versões de configuração de sinal do sensor Hall. Os sensores devem ser montados em torno do eixo equidistantes 60 ou 120 graus um do outro. De acordo com esta configuração o fabricante define a seqüência de comutação, a qual deve ser seguida para controlar o motor [2].

4.2. FORÇA CONTRA ELETROMOTRIZ (F.C.E.M)

Segundo a lei de Lenz, ao aproximarmos um dos pólos de um ímã perto de uma espira, uma tensão induzida é gerada na espira, proporcionando a circulação de corrente. O sentido da corrente é tal que seus efeitos se opõem às ações que a originam [4]. Quando aproximamos o pólo N de um ímã em uma espira, uma corrente induzida é gerada na espira a qual cria na face da espira um pólo N. Este pólo N se opõe ao pólo N do ímã (pólos iguais se repelem) de modo que é necessária certa energia para conseguir aproximar o ímã da espira. A energia assim despendida não se perde, aparece na espira na forma de energia elétrica. O mesmo efeito é observado quando afastamos o ímã, porém, nesse caso a espira inverte a corrente e cria em sua face um pólo S, que tenta segurar o ímã. Em suma, o sentido da corrente [2] é tal que origina um fluxo magnético induzido, que se opõe a variação do fluxo magnético indutor.

Quando um motor Brushless [10] está rodando, cada bobina gera uma tensão conhecida como força contra eletromotriz (f.c.e.m), a qual se opõe à tensão da fonte de acordo com a lei de Lenz. A polaridade da f.c.e.m tem direção oposta à tensão da fonte. Esta força depende principalmente de três fatores:

- Velocidade angular;
- Campo magnético gerado pelo rotor;
- Número de espiras do enrolamento do estator.

EQUAÇÃO 1:

$$\text{f.c.e.m} = (E) \propto N l r \omega$$

Onde:

N é o número de espiras do enrolamento do estator por fase;

l é o comprimento do rotor;

r é o raio do rotor;

B é a densidade de campo magnético do rotor;

ω e a velocidade angular do rotor (rad/s).

Uma vez que o motor está definido, o número de espiras do enrolamento do estator e o campo magnético do rotor já são conhecidos. O único fator que deve ser considerado para o cálculo da f.c.e.m é a velocidade angular. Se a velocidade do rotor aumenta a f.c.e.m também aumenta.

A diferença de potencial em um enrolamento pode ser calculada subtraindo-se o valor da tensão da f.c.e.m da tensão da fonte. Os motores brushless são projetados com uma tensão f.c.e.m constante de forma que quando estão rodando em uma velocidade constante, a diferença de potencial entre a f.c.e.m e a tensão da fonte será suficiente para que a corrente flua pelo enrolamento e forneça torque ao motor. Se o motor roda além da velocidade taxada, a tensão f.c.e.m deve aumentar substancialmente, diminuindo a diferença de potencial no enrolamento, reduzindo o fluxo de corrente o qual resulta em uma queda na curva de torque [2]. O último ponto sobre a velocidade do rotor é quando a tensão da fonte é igual à soma da f.c.e.m e as perdas no motor. Isso resulta em corrente e torque iguais a zero.

4.2.1. Característica do torque versus velocidade

Existem dois parâmetros de torque usados para definir um motor BLDC: Torque de pico (T_p) e torque nominal (T_r). Durante a operação contínua o motor roda em torque nominal. Em um motor BLDC o torque permanece constante para velocidades acima da velocidade nominal. O motor pode rodar acima da velocidade máxima, a qual pode ser 150% da velocidade nominal (“*rated speed*” da figura 12), porém, a partir daí o torque começa a cair. Aplicações onde é freqüente ligar e desligar o motor, ou ligar o motor com rotação reversa com carga no eixo, é necessária a utilização de um torque maior que o toque nominal. Esta necessidade de torque alto aparece em um curto período de tempo, especialmente quando o motor parte da completa inércia e durante a aceleração. O motor pode fornecer um alto torque até o torque de pico, conforme a curva abaixo [2].

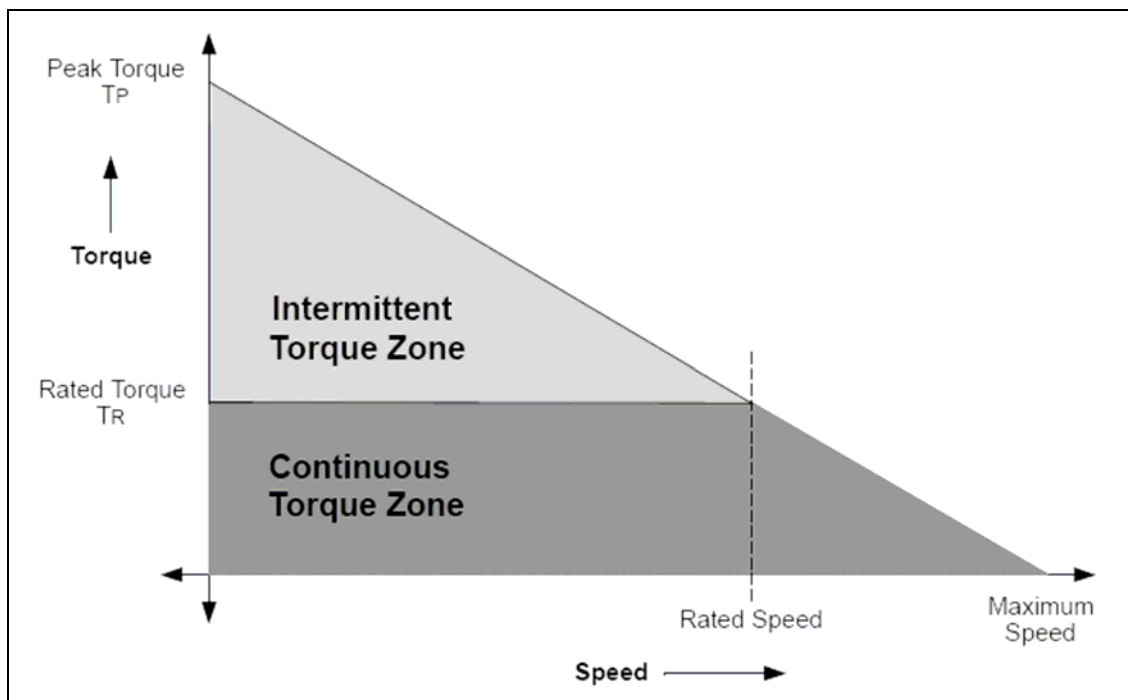


Figura 12 Curva característica torque versus velocidade.

5. MOTORES BLDC: ACIONAMENTO E CONTROLE

Tipicamente, um motor BLDC [10] é comandado por um inversor de fase. Como dito anteriormente a inversão de fase é conhecida como as seis etapas da comutação. O intervalo de condução para cada fase é de 120 graus elétricos [10]. A seqüência de fases da comutação pode ser descrita da seguinte maneira: AB-AC-BC-BA-CA-CB. Cada estágio da condução de corrente é chamado de 1 etapa.

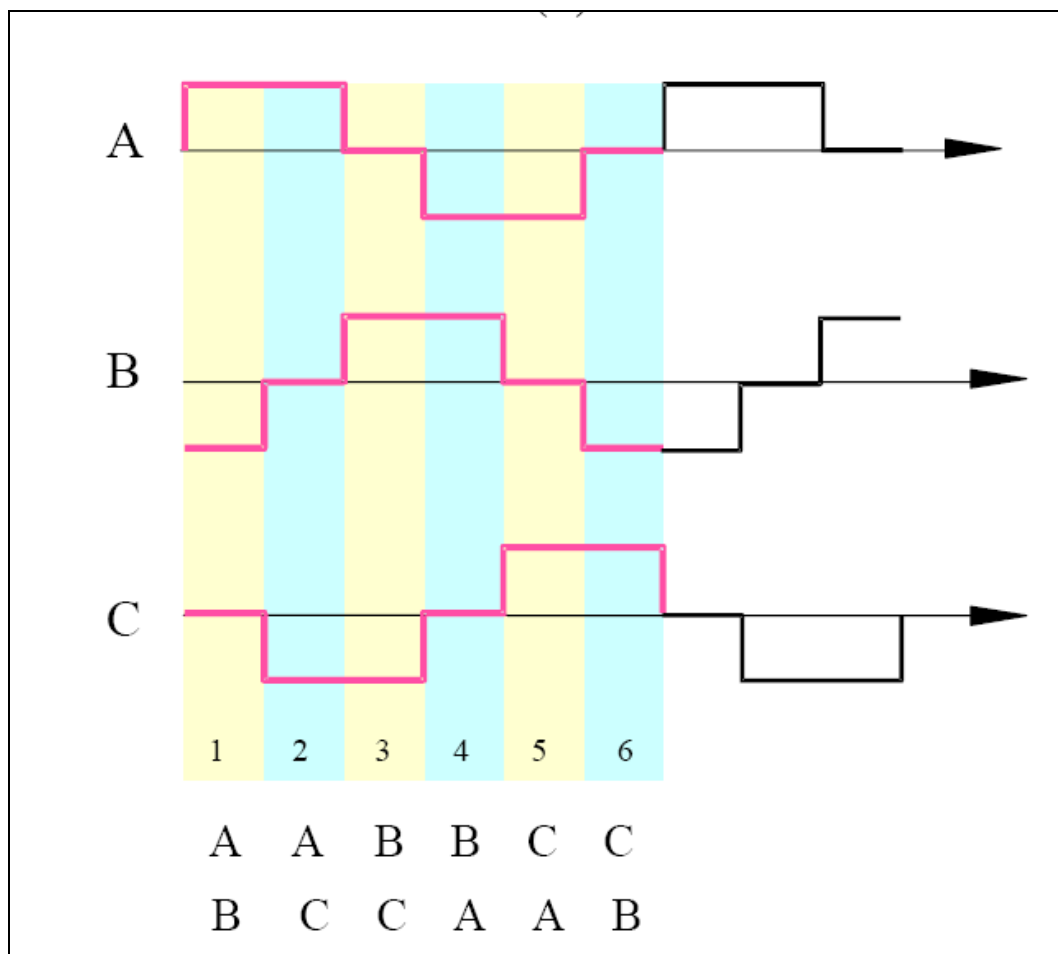


Figura 13 Típica forma de onda da corrente em um motor BLDC

Como já descrito, somente duas fases conduzem corrente a cada comutação deixando a terceira fase flutuando. Para produzir o máximo torque, o inversor deve comutar a cada 60 graus, assim a corrente estará em fase com a f.c.e.m. O tempo de comutação é determinado pela posição do rotor, que

pode ser feita através do sensor Hall, ou estimada através de parâmetros do motor, como por exemplo, a f.c.e.m na bobina que está em estado de flutuação (não energizada). Este último exemplo é conhecido como motor BLDC *sensorless*. Ambos os casos são discutidos na seqüência [10].

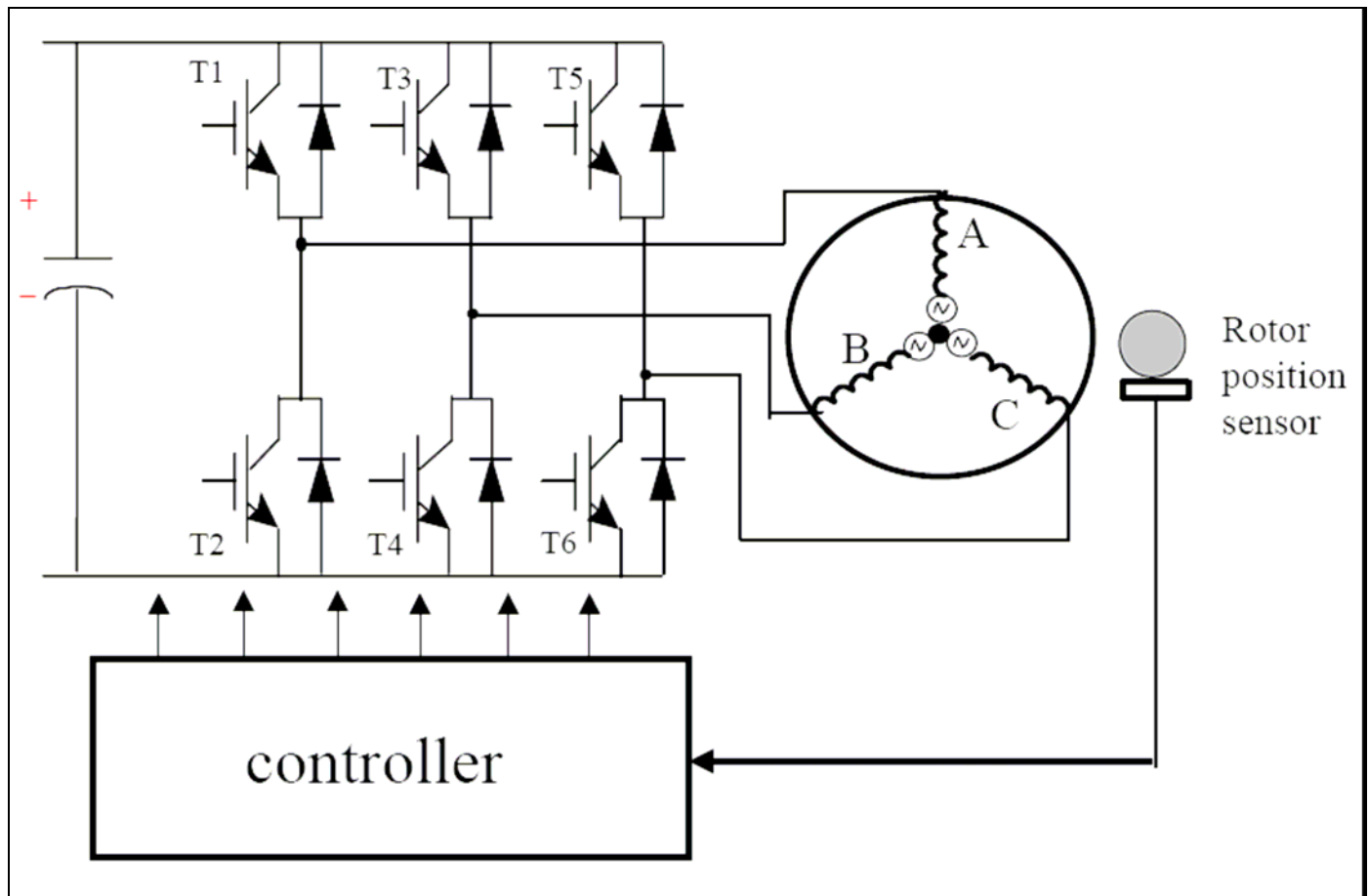


Figura 14 Acionamento típico de um motor Brushless.

5.1. CONTROLE DA COMUTAÇÃO DO MOTOR ATRAVÉS DO SENSOR HALL

A cada 60° elétricos de rotação, um dos sensores Hall muda de estado. Partindo deste princípio, leva-se seis etapas para completar um ciclo elétrico. Em sincronia com cada 60 graus elétricos, a fase da corrente deve mudar no enrolamento do estator. Entretanto, um ciclo elétrico não corresponde a um giro completo do motor. Para se ter uma volta completa do motor deve-se levar em consideração o

número de par de pólos do motor. Para cada par de pólos do motor um ciclo elétrico é completado, portanto o número de ciclos elétricos / rotação é igual ao número de par de pólos do rotor.

A figura 14 mostra um diagrama em blocos de um controle de um motor BLDC. T1 até T6 são as chaves de potência (transistores) controlados por um microcontrolador. Dependendo da tensão e corrente do motor, as chaves de potência podem ser MOSFETS, IGBTs ou simples transistores bipolares.

As tabelas 1 e 2 mostram a seqüência que estas chaves de potência devem ser ligadas, com base nos sinais de entrada dos sensores Hall A, B e C. A tabela 1 conta a rotação do motor no sentido horário e a tabela 2 conta a rotação no sentido anti-horário. Este é um exemplo de um sinal do sensor Hall com equidistância de 60 graus em torno do eixo do motor. Como já discutimos antes, o sensor Hall deve ser montado com equidistância de 60 ou 120 graus um do outro. Ao se escolher um controle para um motor BLDC, esta configuração de sensor Hall deve ser levada em consideração.

Referindo-se à figura 15, se os sinais marcados com PWMx são habilitados ou não de acordo com a seqüência, o motor irá girar em uma velocidade constante. Para isto, considera-se que a tensão no enrolamento do motor é a mesma que a fornecida pela fonte dc, somadas às perdas através das chaves de potência. Para variar a velocidade do motor, estes sinais devem ser modulados por largura de pulso (PWM), com uma freqüência muito maior que a freqüência de rotação do motor. Como regra a freqüência do PWM dever ser no mínimo dez vezes maior que a freqüência máxima de rotação do motor. Quando o *duty cycle* do PWM é variado dentro das seqüências, a média da tensão fornecida para o estator diminui, reduzindo assim a velocidade. Outra vantagem de se usar o PWM é que, se a tensão fornecida for maior que a tensão fixada pelo fabricante, o motor pode ser controlado limitando-se a porcentagem do fator de trabalho (*duty cycle*) do sinal PWM, atendendo-se assim à tensão de operação do motor estipulada pelo fabricante.

Existem diferentes tipos de controle. Se os sinais PWM são limitados no microcontrolador, as chaves superiores podem ser ligadas permanentemente durante a correspondente seqüência de comutação, e as correspondentes chaves inferiores podem ser controladas por um requerido duty cycle do PWM.

O potenciômetro (indicado como REF na figura 15) é enviado a um conversor analógico digital, e usado para ajustar a velocidade do motor. O fator de trabalho do PWM é calculado com base nesta tensão de entrada do potenciômetro.

A velocidade do motor pode ser controlada em um circuito realimentado pela medição da velocidade real do motor. O erro de velocidade é enviado a um controlador tipo PID cuja saída é usada para ajustar o duty cycle do PWM.

Para reduzir o custo de fabricação, e para aplicações onde se requer baixo controle da velocidade, os sensores Hall são usados para estimar a velocidade. Um temporizador é usado para contar a transição entre dois sensores Hall. Com esta contagem, a velocidade atual do motor é calculada. Para exatidão na medição de velocidade um codificador ótico pode ser usado. Montado dentro do motor, ele obtém dois sinais diferentes em fase de 90 graus. Usando estes sinais, a velocidade e direção de rotação são determinadas [2].

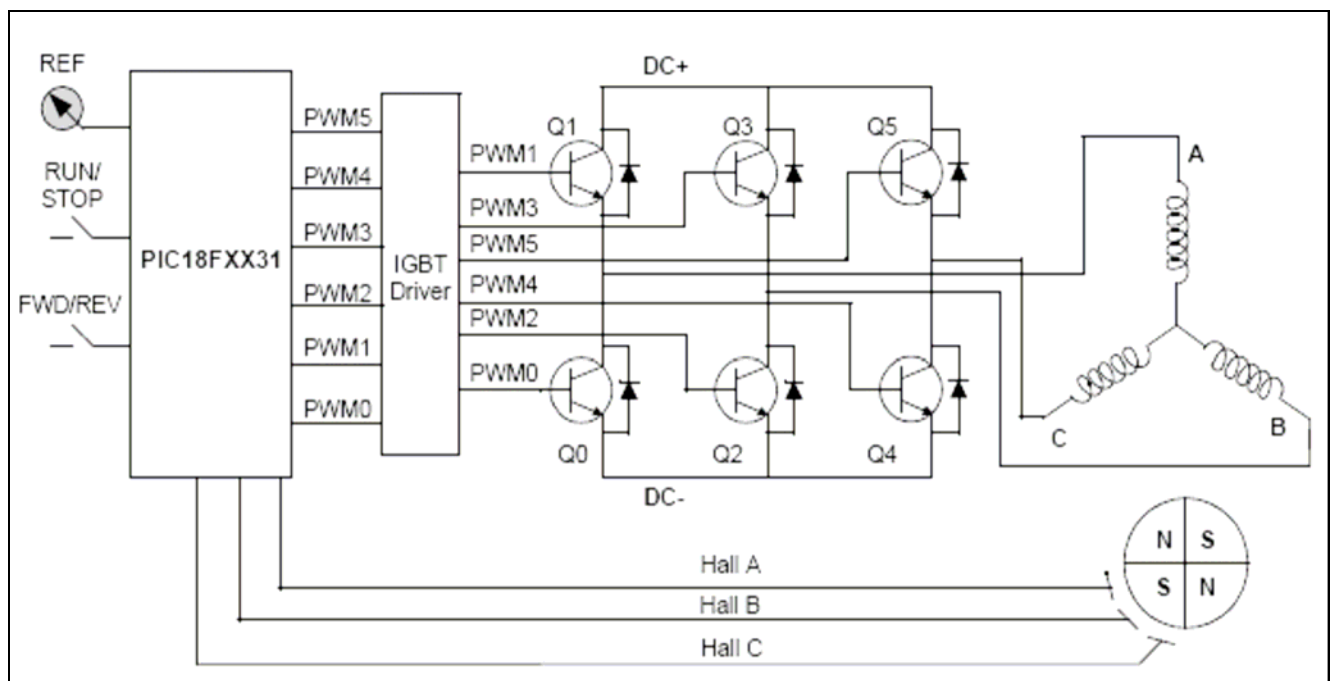


Figura 15 Diagrama em blocos do controle de um BLDC (sensor Hall).

Tabela 1 Seqüência de comutação do motor BLDC [2].

Seqüência	Seqüência sensor Hall			PWM Ativos		Fase da corrente		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC+	Off	DC-
2	0	0	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	Off
3	1	0	0	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	Off	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	Off	DC+
5	1	1	1	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC+	Off
6	0	1	1	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	Off	DC+	DC-

Tabela 2 Seqüência de comutação do motor BLDC [2].

Seqüência	Seqüência sensor Hall			PWM Ativos		Fase da corrente		
	A	B	C			A	B	C
1	0	1	1	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	Off	DC-	DC+
2	1	1	1	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	Off
3	1	1	0	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC+	Off	DC-
4	1	0	0	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	Off	DC+	DC-
5	0	0	0	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC+	Off
6	0	0	1	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	Off	DC+

5.2. CONTROLE DE COMUTAÇÃO ATRAVÉS DA F.C.E.M (SENSORLESS)

Até agora retratamos a comutação baseada na posição do rotor através dos sinais do sensor Hall. Motores BLDC podem ser controlados pelo monitoramento dos sinais da f.c.e.m ao invés do sensor Hall. A relação entre os sensores Hall e a f.c.e.m, com respeito à fase da tensão, é mostrada na figura 16. Como já discutimos nos capítulos anteriores, em cada seqüência da comutação uma das bobinas do estator está energizada positivamente, a segunda negativamente e a terceira permanece não energizada (flutuando). Como mostrado na figura 16, o sinal do sensor Hall muda de estado quando a polaridade da f.c.e.m atravessa do positivo para o negativo ou vice e versa [8]. Em casos ideais isto acontece quando a f.c.e.m está trocando de estado, exatamente quando a f.c.e.m cruza o zero, ou seja, seu valor é instantaneamente zero. Na prática existe um atraso de mudança devido às características do enrolamento do estator. Este atraso deve ser compensado pelo microcontrolador. A figura 16 mostra o diagrama em blocos de um motor BLDC *sensorless*, ou seja, controlado apenas pela f.c.e.m [9] [10].

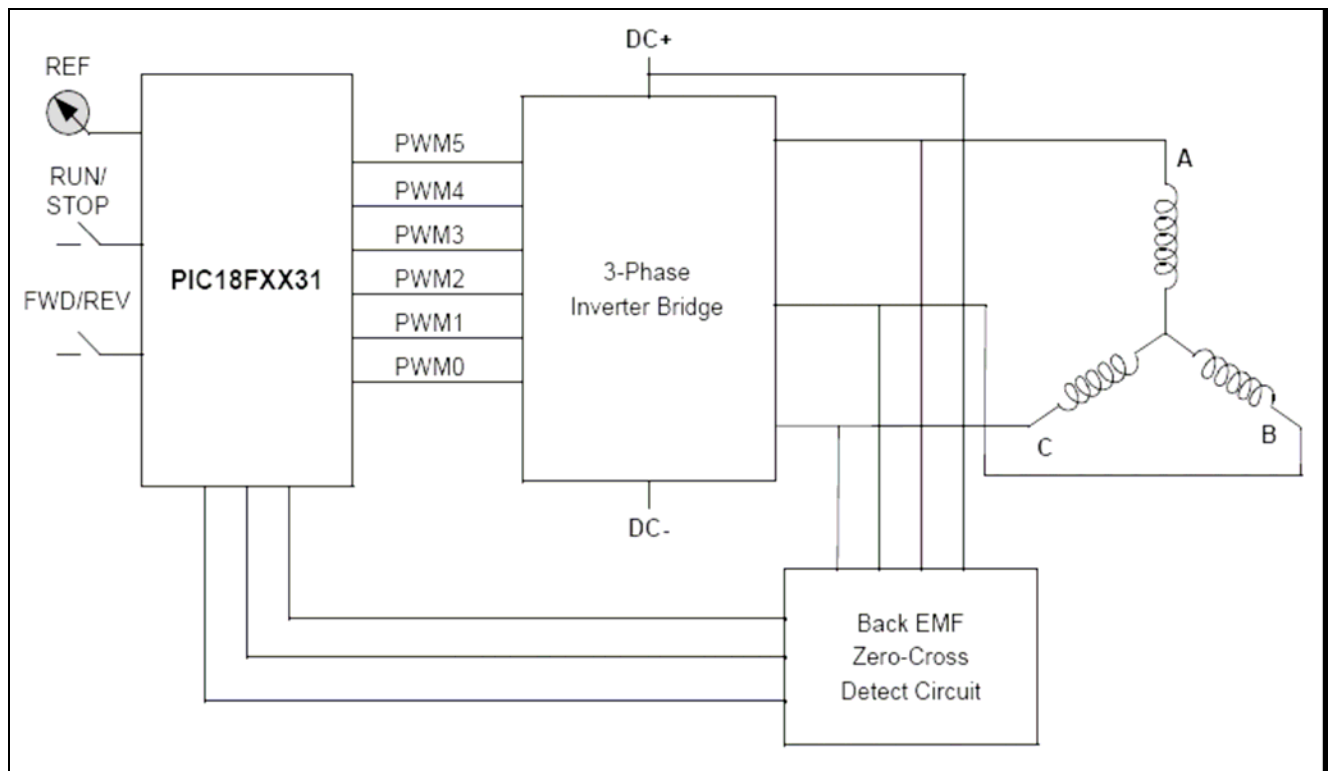


Figura 16 Diagrama em blocos de um motor BLDC sensorless.

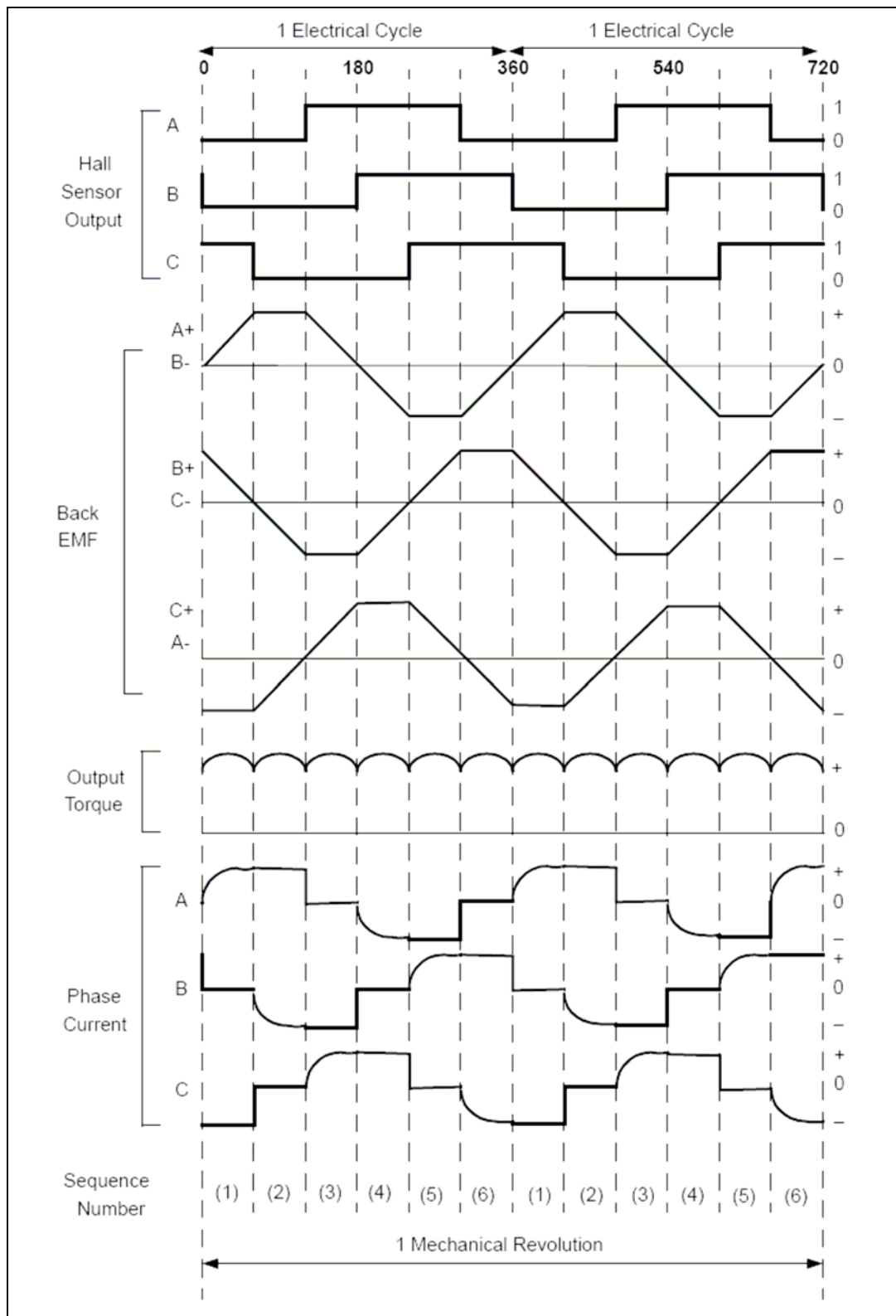


Figura 17 Sinal do sensor Hall, contra f.e.m, torque de saída e fase da corrente.

Outro aspecto a ser considerado é a detecção da f.c.e.m em velocidades muito baixas. A f.c.e.m é proporcional à velocidade de rotação, e em baixas velocidades a amplitude da contra f.e.m é muito baixa para ser detectada. O motor tem que partir em malha aberta [2], da completa inércia, e quando suficiente f.c.e.m é construída para ser detectada seu ponto zero, o motor muda para a detecção da posição através da f.c.e.m, operando então em malha fechada. A mínima velocidade a qual o motor consegue detectar a f.c.e.m é calculada a partir da f.c.e.m constante do motor.

Com este método de comutação, os sensores Hall podem ser eliminados, e em alguns motores, o magneto montado junto com os sensores Hall também é eliminado. Isto simplifica a construção do motor e reduz custos de fabricação [2]. Isto é vantajoso se o motor é operado em ambientes oleosos ou com muita poeira, onde limpezas ocasionais são requeridas para manter os sensores Hall funcionando corretamente. A mesma vantagem é observada se o motor é montado em um lugar de difícil acesso.

6. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MOTORES DC CONVENCIONAIS E MOTORES BLDC

Comparando-se o motor BLDC com o motor dc convencional, o motor BLDC possui muitas vantagens e poucas desvantagens. Motores sem escovas requerem menos manutenção, e possuem vida útil maior que os motores com escovas [11]. Motores BLDC produzem mais torque de saída que motores dc convencionais quando comparados em tamanho da carcaça. Isso é devido ao rotor ser construído com um ímã permanente o qual proporciona uma inércia de rotor menor. Este fato aumenta as características de aceleração e desaceleração do rotor, diminuindo o ciclo de operação.

Outra vantagem é a curva linear de torque versus velocidade do motor BLDC. Este fato proporciona uma regulação precisa da velocidade de rotação do motor. Como o motor é fabricado sem escovas, sua manutenção é bem mais fácil, ou até mesmo dispensável, fazendo do BLDC uma máquina adaptável a lugares de difícil acesso para eventuais manutenções [11]. O motor BLDC opera silenciosamente, reduzindo interferências eletromagnéticas. Motores de baixa tensão são ideais para

operar com baterias, equipamentos portáteis e aplicações médicas. A tabela abaixo sintetiza melhor uma comparação do motor BLDC com o motor de convencional [2].

Tabela 3 Comparação entre motor de BLDC e motor de convencional (Brushed) [2].

Características	Motor BLDC	Motor de convencional (Brushed)
Comutação	Comutação eletrônica baseado na posição do rotor.	Comutação através das escovas.
Vida Útil	Longa.	Curta.
Torque versus velocidade	Opera em todas as velocidades com carga constante.	Em altas rotações, o atrito entre as escovas e o comutador aumenta, reduzindo o torque.
Torque de saída versus tamanho da carcaça	Alta. Tamanho da carcaça reduzido e boa dissipação térmica. Isso ocorre porque o BLDC possui as bobinas no estator, o que aumenta a dissipação térmica.	Moderada / baixa. A armadura produz muito calor, o que obriga a construção da carcaça ser maior para dissipar o calor. A temperatura alta diminui a potência.
Inércia do rotor	Baixa. Devido ao ímã permanente estar no rotor, isto aumenta a resposta dinâmica.	Alta. A armadura limita a resposta dinâmica.
Velocidade	Alta. Não há resistência mecânica devido às escovas e ao comutador.	Baixa. Devido à comutação. (limitação mecânica)
Ruído Elétrico	Baixo.	Arcos de tensão nas escovas geram ruído e emissões eletromagnéticas.
Custo de Construção	Alto. Rotor com ímã permanente e controle eletrônico gera um custo alto.	Moderado. A construção do comutador pode gerar um custo alto.
Controle	Complexo e caro.	Simple e barato.
Manutenção	Pequena, pois são construídos sem escovas.	Manutenção periódica é exigida devido às escovas.
Eficiência	Alta, não há queda de potência devido às escovas.	Moderada.

7. CARACTERÍSTICAS DE TORQUE DE UM BLDC

Escolher o tipo certo de motor para determinada aplicação é muito importante. A seleção do motor deve ser feita levando-se em conta a característica particular do torque resistente da carga. Existem três parâmetros principais que governam esta escolha.

- Torque de pico requerido para a aplicação.
- Torque RMS.
- Limites de velocidade.

7.1. REQUERIMENTO DE TORQUE DE PICO

O pico, ou máximo torque requerido para uma aplicação, pode ser calculado somando-se o torque da carga (T_L), o torque de inércia (T_j) e o torque de atrito (T_f).

Há outros fatores que contribuem para a soma de torque requerido. Como exemplo, podemos citar a perda de eficiência causada pelo ar no entreferro (espaço entre o rotor e o estator). Este fator é complicado de se calcular, e por este motivo uma margem de segurança de 20% é deixada nos cálculos.

EQUAÇÃO 2:

$$T_p = (T_L + T_j + T_f) * 1.2$$

O torque de inércia é o torque requerido para acelerar a carga da completa inércia ou de baixas velocidades para uma velocidade maior. Isto pode ser calculado através do produto da carga inerte mais o rotor inerte com a carga de aceleração.

EQUAÇÃO 3:

$$T_j = (J_L + M) * \alpha$$

Onde:

$J_L + M$ é a soma da carga no eixo mais a inércia do rotor e α é a aceleração requerida.

Um sistema mecânico acoplado no eixo do motor determina o torque de carga e o torque de atrito.

7.2. TORQUE RMS

O torque RMS pode ser traduzido como a média contínua do torque requerido para uma aplicação. Este tipo de torque depende de muitos fatores. Torque de pico (T_p), torque da carga (T_L), torque de inércia (T_j), Torque de atrito (T_f) e aceleração e desaceleração durante o funcionamento [9] [10].

EQUAÇÃO 4:

$$T_{rms} = \sqrt{[T_p^2 T_A + (T_L + T_f)^2 T_r + (T_j - T_L - T_f)^2 T_D] / (T_A + T_r + T_D)}$$

7.3. LIMITES DE VELOCIDADE

Esta é a velocidade do motor requerida para controlar determinada aplicação. Por exemplo, uma aplicação como ventilador onde a variação da velocidade não é muito freqüente, a velocidade máxima do ventilador pode ser a média da velocidade requerida pelo motor. Há casos onde o sistema deve ser ajustado ponto a ponto, como movimento de esteira de alta precisão ou movimentos de braços robóticos.

Esta aplicação requer um motor com uma alta taxa de operação de velocidade do que o movimento médio de velocidade. As altas taxas de velocidade podem ser contadas para as componentes da curva da velocidade trapezoidal, resultando em uma média de velocidade igual ao movimento de velocidade. A curva trapezoidal é mostrada na figura 18.

8. APLICAÇÕES DE MOTORES BLDC

Motores BLDC encontram aplicações em vários segmentos de mercado. Automotiva, aparelhos em geral, controles industriais, automação, aviação e muitas outras tem aplicação para motores BLDC. Fora disso, podemos categorizar os tipos de motores BLDC em três grandes categorias, as quais são descritas abaixo [2].

8.1. APLICAÇÃO COM CARGAS CONSTANTES

Este é um tipo de aplicação onde a variação de velocidade é mais importante que manter o motor em velocidade constante (exata). As taxas de aceleração e desaceleração não são dinamicamente mudadas. Nestes tipos de aplicação, a carga é acoplada diretamente no eixo do motor. Por exemplo, ventiladores, bombas e exaustores. Esta aplicação demanda baixo custo de controle, normalmente operados em malha aberta [2].

8.2. APLICAÇÕES COM CARGAS VARIÁVEIS

Este tipo de aplicação ocorre onde a carga no motor varia sobre um limiar de velocidade. Esta aplicação demanda uma alta velocidade de controle, exatidão e boas respostas dinâmicas. Aplicações domésticas lavadoras, secadoras e compressores são bons exemplos. No ramo automotivo, bomba de combustível, controle de direção eletrônica, controle eletrônico dos vidros e dos pára-brisas são bons exemplos. Na indústria aeroespacial, existem inúmeras aplicações como bombas centrífugas, controle de braços robóticos, controle de giroscópios e muitos outros. Estes controles usam um sistema de feedback de velocidade, e devem funcionar em circuito de malha fechada ou semi-fechada. Estes sistemas usam avançados algoritmos de controle por isso possuem um complicado controle e custos elevados [2].

8.3. APLICAÇÃO DE POSICIONAMENTO

Aplicações nesta categoria possuem um tipo de transmissão de potência, as quais podem ser engrenagens mecânicas, correias eletrônicas ou simples correias. Nestas aplicações a resposta dinâmica da velocidade e torque é importante. Este tipo de aplicação também possui rotação reversa. Um típico ciclo desta aplicação terá uma fase de aceleração, uma fase de constante velocidade e uma fase de desaceleração como mostra a figura 17. A carga no motor varia durante todas estas fases, causando a necessidade de um complexo controle. Este sistema opera em malha fechada. Existem três controles funcionando simultaneamente: controle de torque, controle de velocidade e controle de posição. Codificadores ópticos são usados para medir a velocidade atual do motor. Em alguns casos, estes sensores são usados para obter informações sobre a posição relativa do motor. De outra forma, outros

sensores de posição são usados para obter a posição absoluta do motor. Controladores numéricos (CNC) é um bom exemplo disso. Processos de controle, maquinário de controle e controles de transmissão tem abundantes aplicações nesta categoria.

Onde:

TA – Tempo de aceleração;

TR – Tempo de velocidade constante;

TD – Tempo de desaceleração.

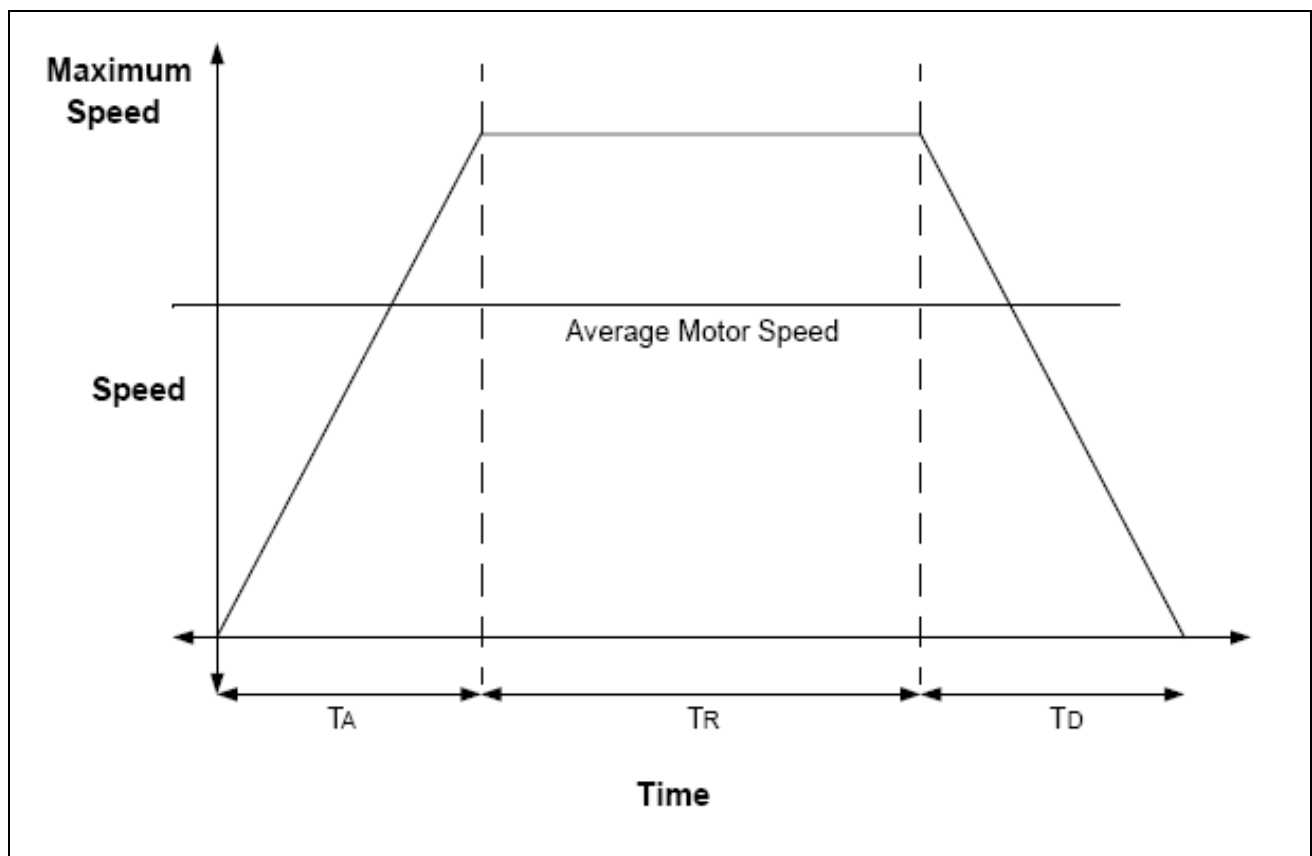


Figura 18 Curva trapezoidal da velocidade

Concluindo, motores BLDC têm vantagens sobre motores de convencionais e motores a indução. Eles possuem melhores características de velocidade versus torque, altas respostas dinâmicas, alta eficiência, longa durabilidade, baixo ruído, altas taxas de velocidade e muito mais. Também podemos ressaltar o torque de saída [8] com relação ao tamanho da carcaça, tornando o BLDC prático em lugares onde tamanho e espaço são fatores críticos. Com estas vantagens, motores BLDC

encontram vastas aplicações no mercado automotivo, eletro-eletrônicos, instrumentação médica, automação industrial, aeroespacial e outros.

8.3.1. Considerações finais

Pretende-se dar continuidade aos estudos dos motores BLDC com o intuito de desenvolver aplicações no ramo automotivo. Um grande desafio da indústria automobilística é construir bombas de combustível mais duráveis e mais seguras que as atuais. Atualmente as bombas de combustível são motores dc convencionais (brushed), e possuem sua durabilidade muito limitada devido ao uso de escovas.

O motor BLDC aplicado como bomba de combustível teria uma vantagem enorme com relação às bombas convencionais, pois não possuem escovas. A desvantagem é que o controle deste tipo de motor ainda é complexo e caro.

O grande desafio para implementação deste tipo de motor na indústria automobilística é baratear a eletrônica de controle do BLDC. Pesquisas nesta área já tornam possível esta implementação. A eletrônica de controle será construída junto ao sistema de injeção eletrônica do automóvel. Este sistema gerencia todo o sistema de combustão do veículo, e passará também a gerenciar a bomba de combustível. Além disso, o tamanho da bomba de combustível pode ser reduzido devido a estudos de materiais que possuem uma densidade de fluxo magnético maior que o ferrite. Com este estudo o tamanho do motor pode ser reduzido mantendo-se a mesma eficiência.

O motor utilizado para esta aplicação seria o BLDC *sensorless*. A bomba é montada dentro do tanque de combustível, ou seja, imersa no meio. Se o motor fosse montado com o sensor Hall teríamos problemas, pois estariam imersos em combustível. O BLDC *sensorless* é o motor ideal para esta aplicação, por ser mais barato e não possuir o sensor Hall para controle.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Thomas Kaporch, "Driving the future," *Appliance Manufacture*, Sept.2001, pp43-46.
- [2] Padmaraja Yedamale "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals" Microchip technology Inc. 2003.
- [3] LOBOSCO, O. S., DIAS, J. L. C. "SELEÇÃO E APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS". McGraw-Hill, Volume 1.
- [4] Feira de Ciências <http://www.feiradeciencias.com.br/> acesso em 20/10/2006
- [5] Unidade de automação e controle - Acionamento e motores elétricos www.siemens.com.br/motores acesso em 20/10/2006
- [6] Escola SENAI Roberto Somonses, "Máquinas Elétricas"
- [7] T. Kenjo, "Permanent magnet and brushless dc motors", Oxford, 1985.
- [8] T.J.E. Miller, "Brushless permanent magnet and reluctance motor drive", Oxford, 1989
- [9] S.Ogasawara and H.Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless dc Motors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.27, No.5, Sept/Oct. 1991.
- [10] Jianwen Shao "Direct Back EMF Detection Method for sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives" Blacksburg, Virginia, 2003.
- [11] A. E. Fitzgerald and C. Kingsley, "*Elec. Machinery*". New York: McGraw-Hill Company.

GLOSSARIO

Motor BLDC	Motor brushless direct current – Motor corrente continua sem escovas.
Velocidade Angular	Velocidade em radianos ($2\pi \times$ frequência \times raio do rotor).
Motor Assíncrono	Tipo de motor onde o fluxo magnético gerado no estator e no rotor possuem diferentes frequências.
Torque	Força de rotação, medida em N/M (Newton por Metro).
Motor síncrono	Tipo de motor onde o fluxo magnético do estator e do rotor possuem a mesma frequência. A fase deve ser mudada.
Rotor	Parte rotativa do motor.
IGBT	Insulated gate bipolar transistor.
MOSFET	Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor.
Air Gap	Espaço uniforme entre o rotor e o estator.