

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
**FABIO PEREIRA FABRETTE**

**ACIONAMENTO MICROCONTROLADO PARA  
MOTOR BRUSHLESS**

Itatiba  
2011

**Fabio Pereira Fabrette – RA. 002200500840**

**ACIONAMENTO MICROCONTROLADO PARA  
MOTOR BRUSHLESS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.  
Orientador: André Renato Bakalereskis

Itatiba  
2011

*À minha mãe, irmãos e amigos pelo apoio  
recebido durante a elaboração deste trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e em especial minha mãe, Creuza Maria Pereira Fabrette, que apesar de não estar mais presente, sempre cuidou e zelou por mim estando do meu lado nos momentos mais difíceis e me encorajando a seguir em frente e continuar lutando, pois ela nunca deixou de acreditar em mim.

Também agradeço a minha irmã Daniela, ao meu irmão André, a minha namorada Betiane pela paciência e compreensão que tiveram comigo.

Ao Prof. Renato Franco de Camargo e Prof. André Renato Bakalereskis por compartilharem comigo seus conhecimentos, pela dedicação, colaboração e atenção no decorrer desta pesquisa, sempre apresentando observações e comentários pertinentes a este trabalho.

A todos meus amigos que mesmo não participando diretamente na elaboração deste trabalho sempre torceram e deram força pra que eu nunca desistisse.

## **RESUMO**

Os motores de imã permanente sem escovas, também chamados de motor Brushless vêm ganhando espaço nos últimos anos pela sua eficiência em relação os outros tipos de motores, redução nos custos de manutenção e redução de ruídos. Neste trabalho é desenvolvido um controle para o acionamento trifásico do motor. Através de um microcontrolador e um circuito de potência, responsáveis pelo seu funcionamento. Este projeto foi desenvolvido com o auxílio de alguns softwares voltados à área de eletrônica embarcada.

Palavras chaves: Brushless. Controle. Funcionamento.

## **ABSTRACT**

The permanent magnet motors, brushless, also called brushless motor are gaining ground in recent years for its effectiveness with other types of motors, reducing maintenance costs and noise reduction. In this work we developed a control for three phase motor drive. Using a microcontroller and a power circuit, responsible for its operation. This project was developed with the help of some software focused on the area of embedded electronics.

Keywords: Brushless. Control. operation.

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USF	Universidade São Francisco
BLDC	Brushless Motor DC
CPU	Central Processing unit
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
RAM	Random Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
A/D	Analógico para Digital
D/A	Digital para Analógico
I/O	Input / Output
PWM	Pulse Width Modulation
PCI	Placa de circuito impresso

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – componentes do motor brushless. (2) .....	13
Figura 2 - Densidade de fluxo rotor cilíndrico de dois pólos (2). .....	14
Figura 3 – Esquema motor Corrente Contínua (3). .....	15
Figura 4 – Motor de ímãs permanentes (6) .....	16
Figura 5 – Fluxo magnético em função da posição angular (3). .....	16
Figura 6 – Força eletromotriz versus posição angular (3). .....	17
Figura 7 – Corrente em função de $\theta$ (3). .....	17
Figura 8 - Torque versus posição $\theta$ (3). .....	18
Figura 9 – Motor com três bobinas (6). .....	19
Figura 10 – Torque produzido pelo torque de cada bobina (3). .....	19
Figura 11 – Esquema dos torques do motor DC (3). .....	20
Figura 12 – Ripple de torque (3). .....	21
Figura 13 – Pinagem do pic 18F4520 (7). .....	23
Figura 14 – Circuito de Acionamento .....	25
Figura 15 – Circuito de Acionamento completo .....	26
Figura 16 – Circuito de acionamento alta potência (1) .....	27
Figura 17 – Protótipo de controle para motor brushless .....	27
Figura 18 – Forma de onda sentido horário (1). .....	30
Figura 19 - forma de onda sentido anti-horário (1). .....	30
Figura 20 – Forma de onda gerada na simulação com software proteus sentido horário .....	34
Figura 21 – Forma de onda gerada na simulação com software proteus sentido anti-horário .....	34
Figura 22 - Função do motor para impressoras laser (12). .....	39
Figura 24 – Brushless dc motor para uma impressora Laser(12). .....	40
Figura 25 - Um exemplo de unidade de disco rígido (12) .....	42
Figura 26 – Brushless dc motor utilizado em disco rígido (12) .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela verdade do circuito de acionamento.....	26
Tabela 2 – Relação sensor com saída para as bobinas do motor sentido horário.....	28
Tabela 3 - Relação sensor com saída para as bobinas do motor sentido anti-horário.....	29
Tabela 4 - Características dos motores sem escovas trifásicos (12).....	40
Tabela 5 - Comparação de um a motor síncrono e um motor brushless dc para uma unidade de disco rígido (12) .....	41
Tabela 6 - Características de um motor trifásico unipolar projetado para uma unidade de disco rígido (12).....	43

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação 1 – Tensão na bobina pela lei de Faraday.....17

## SUMARIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	12
2.1 Motores brushless.....	12
2.1.1 Características Físicas .....	13
2.1.2 Funcionamento .....	15
2.2 Microcontroladores .....	21
2.2.1 Microcontroladores Pic .....	22
2.2.2 O Pic 18F4520.....	22
<b>3 PROJETO</b> .....	25
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	35
<b>5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	36
<b>APÊNDICE A – Aplicações</b> .....	38
A.1 Impressora a Laser.....	38
A.2 Unidade de disco rígido.....	39

# 1 INTRODUÇÃO

Os servomotores Brushless se desenvolveram através de uma notável combinação de tecnologias: mecânica, elétrica, eletrônica e microeletrônica, tanto o funcionamento como aplicação do motor conta com muitos fatores interdependentes. Neste projeto falarei do motor com três fases, o mais comum do tipo brushless com a utilização de sensores de efeito hall. Para criar as instruções necessárias para seu acionamento, utilizarei de um circuito microcontrolador e um circuito de potência e proteção do microcontrolador.

O objetivo deste projeto é realizar o acionamento do motor brushless DC utilizando microcontrolador. O acionamento consiste em fazê-lo girar sentido horário e anti-horário e pará-lo a qualquer instante.

Com o auxílio de um microcontrolador, que irá receber a posição do motor por meio de sensores e enviar pulsos para o circuito de potência responsável pelo acionamento do motor. Esse circuito deve criar uma defasagem entre às fases A, B, C para o motor funcionar.

Este trabalho pode ser dividido em duas partes: na primeira algumas informações a respeito do motor brushless, sua característica física e seu funcionamento e um pouco sobre microcontroladores. Na segunda, sobre o desenvolvimento do projeto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Motores brushless

Os Motores de imã permanente sem escovas também conhecido como motor brushless DC (BLDC) vem nos últimos anos se destacando nas mais variadas aplicações como: Hd's, drives de cd's, na aeronáutica, aeromodelismo, sistemas de refrigeração. Isso porque houve grandes avanços na área de materiais magnéticos, eletrônica de potência, microcontroladores. Ligado a isto, o ganho de eficiência deste motor se destaca quando comparado com outras tecnologias de máquinas elétricas.

Além disto, existem algumas razões que explicam o crescente aumento na sua utilização, as quais são descritas abaixo:

- Produção de imãs permanentes cerâmicos em larga escala, com altos valores de energia magnética com menor custo.
- Componentes eletrônicos de estado sólido mais confiável a altas temperaturas, com alta velocidade de chaveamento e alta densidade de corrente a um custo menor.
- Novos materiais com alta força de adesão e colagem, utilizados na adesão do imã a superfície.
- A evolução de programas computacionais permitindo a completa modelagem e reduzindo custos de prototipagem
- Controle de velocidade, pois seu acionamento e feito eletronicamente.
- Menos ruído e vibração
- Melhor eficiência se comparado com outros motores, contribuindo para o uso sustentável de energia.

### 2.1.1 Características Físicas

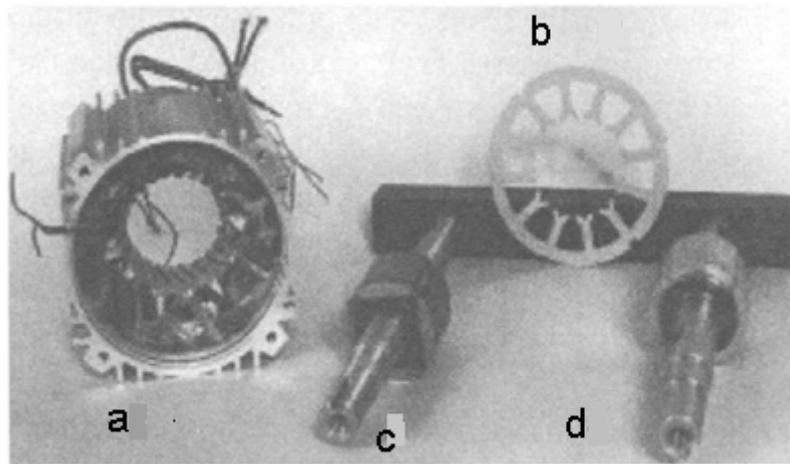


Figura 1 – componentes do motor brushless. (2)

O núcleo do estator (a) é feito de aço silício, com ranhuras para os condutores de passagem de corrente. O núcleo é laminado em ordem para minimizar as correntes parasitas. As laminas (b) como mostrado na figura 1 são ranhuradas, presente em grande parte da área total da laminação, e tem o efeito de interromper a uniformidade do caminho do fluxo. O efeito é reduzido se as ranhuras são distorcidas em relação ao eixo do estator, como pode ser visto na figura. A inquinação apresenta uma sobreposição de ranhura padrão e um caminho menos irregular ao fluxo que entra e sai do núcleo radialmente. Os enrolamentos podem às vezes produzir ruído audível como eles vibram sob as forças de operação do motor. Uma construção alternativa é possível, onde o estator é rigidamente ligado por um molde de resina, que reduz sua vibração (3).

O cubo do rotor carrega os ímãs permanentes é pressionado na posição do eixo do motor. O cubo pode ser fabricado a partir de um sólido aço de baixo carbono ou montado a partir de laminas perfuradas ao centro na chapa de aço usada para a laminação do estator. O rotor(c,d) também é mostrado na figura 1, é de quatro pólos. Um deles tem ímãs de uma forma cilíndrica, e os outros têm ímãs com superfície não circular. Para um rotor de dois pólos com ímãs cilíndricos, a densidade de fluxo ideal em torno da circunferência do pólo poderia variar como uma onda ciclo único retangular como mostrado na figura 2. Na pratica alguma irregularidade permanece no circuito magnético, mesmo quando as faixas foram distorcidas, e a linha pontilhada ao longo do topo da onda de fluxo no entreferro. Ímãs com uma densidade de fluxo elevado são utilizados para maximizar a relação torque/volume do rotor BLDC (3).

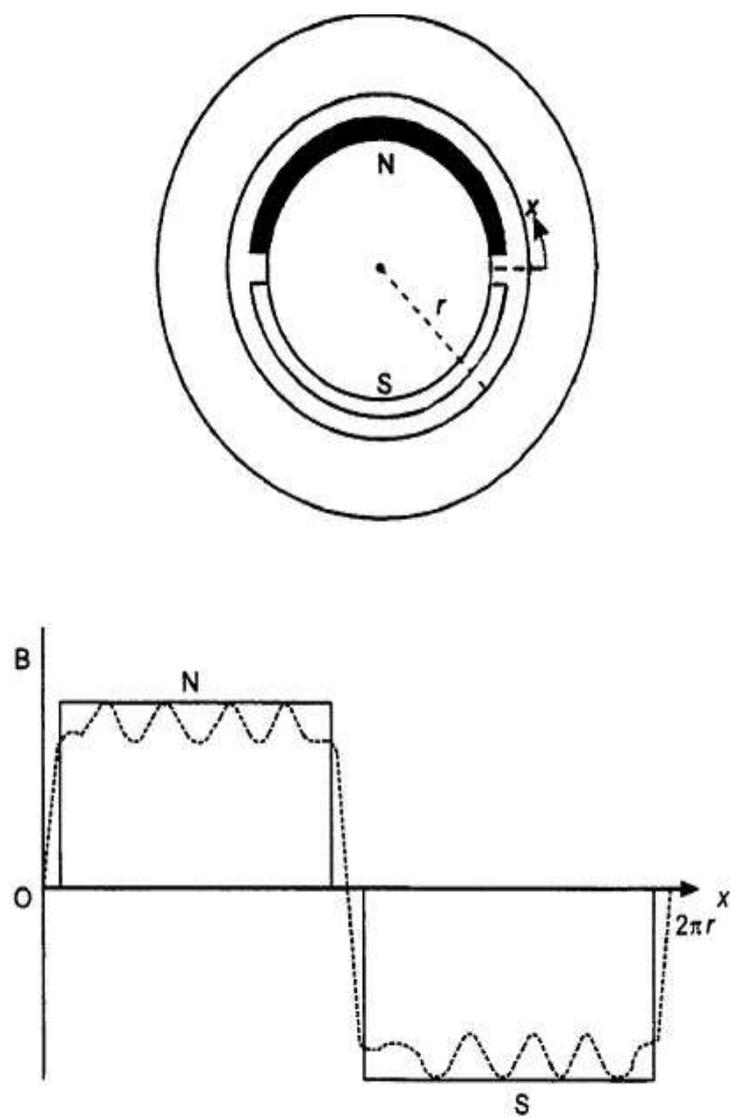


Figura 2 - Densidade de fluxo rotor cilíndrico de dois pólos (2).

### 2.1.2 Funcionamento

Para se entender o seu funcionamento, vamos começar com o motor CC convencional, portanto, considerando um motor escovado. Segue Figura de um motor escovado representado pela figura 3:

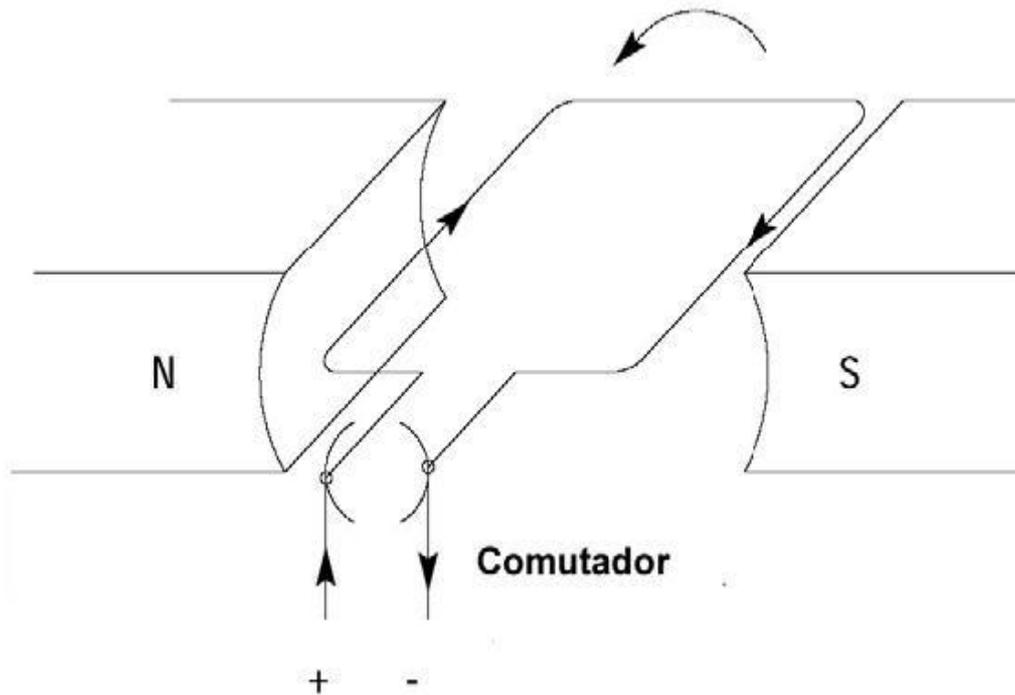


Figura 3 – Esquema motor Corrente Contínua (3).

Este tipo de motor é constituído de um rotor bobinado, onde na figura 3 é representado por uma bobina somente, o qual está imerso em um campo magnético constante fornecido por um ímã permanente. No instante do alinhamento ou quando a bobina está na posição vertical, ocorre à inversão do sentido da corrente através do anel coletor, bipartido, para assim manter o mesmo sentido da rotação (3).

Fazendo uma equivalência para um motor CC convencional com comutador, considerando a bobina imersa em um campo gerado pelo estator, onde estão fixados os ímãs, temos a configuração da Figura 4:

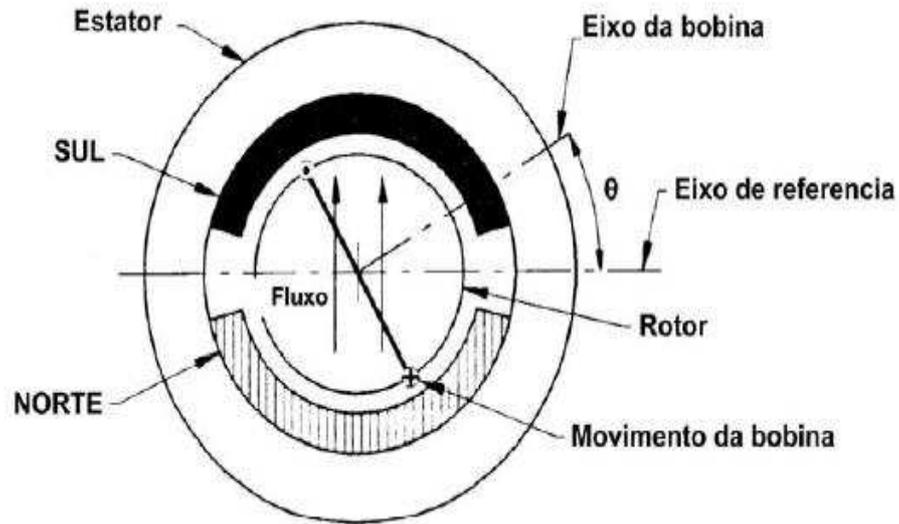


Figura 4 – Motor de ímãs permanentes (6)

A densidade de fluxo magnético do estator é constante e gerado pelos ímãs, sendo este motor de 2 pólos. O pólo norte é identificado pela área ranchurada e o pólo sul indicado pela região escura na parte superior. A bobina está representada com um deslocamento  $\theta$  em relação ao eixo horizontal. Quando  $\theta$  é igual à zero ou  $180^\circ$ , temos que nenhum fluxo do campo magnético dos ímãs está atravessando a bobina, portanto neste instante o fluxo concatenado é zero. À medida que a bobina se movimenta e o ângulo  $\theta$  aumenta, temos que o fluxo magnético concatenado pela bobina aumenta até atingir o valor máximo com  $60^\circ$ . A partir deste ponto, o fluxo começa a ter seu valor diminuído e ao atingir o espaço vazio entre os dois ímãs, ou seja, o gap entre os mesmos em  $180^\circ$ , seu valor é zero. A partir deste instante, ocorre a inversão do fluxo concatenado pela bobina e o seu valor aumenta até um valor máximo negativo. Isto pode ser visualizado na Figura 5, onde se tem a variação do fluxo em função da posição do rotor (3):

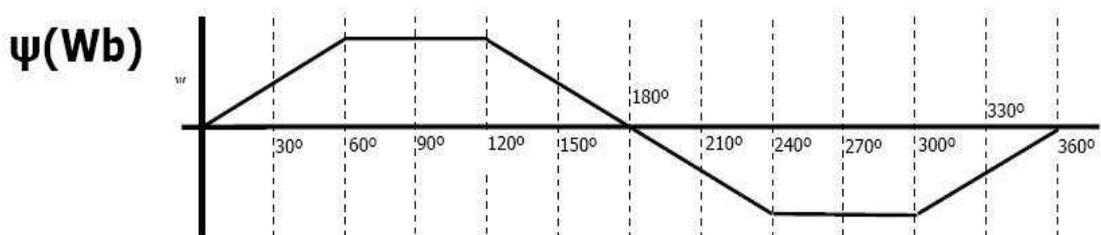


Figura 5 – Fluxo magnético em função da posição angular (3).

Como se tem então uma bobina imersa em um campo magnético constante e girando a uma velocidade qualquer, pela lei de Faraday, tem-se uma tensão gerada na bobina equivalente à taxa de variação do fluxo concatenado, sendo dado pela seguinte expressão (3):

$$e = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\varphi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega_m \times \frac{d\varphi}{d\theta} \quad (1)$$

Onde  $\omega_m$  é igual à velocidade angular, ou seja, a variação do ângulo  $\theta$  em função do tempo. Partindo-se do gráfico da Figura 5, e calculando a derivada do fluxo pela posição angular, tem-se uma força eletromotriz constante quando há variação do fluxo e zero quando o fluxo é constante. Isto pode ser mais bem visualizado na Figura 6, onde a linha tracejada entre  $60^\circ$  e  $120^\circ$  e  $240^\circ$  e  $300^\circ$  representa a curva trapezoidal obtida (3):

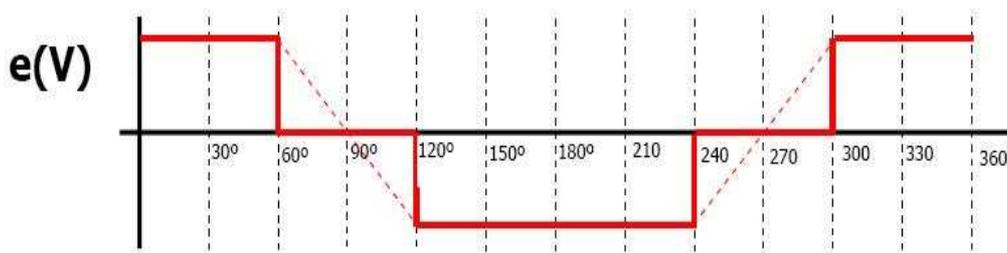


Figura 6 – Força eletromotriz versus posição angular (3).

No motor CC, o comutador tem a função de fornecer corrente  $I$  com mesma polaridade da tensão da força eletromotriz e nos mesmos instantes, como mostrados na Figura 7 (3):

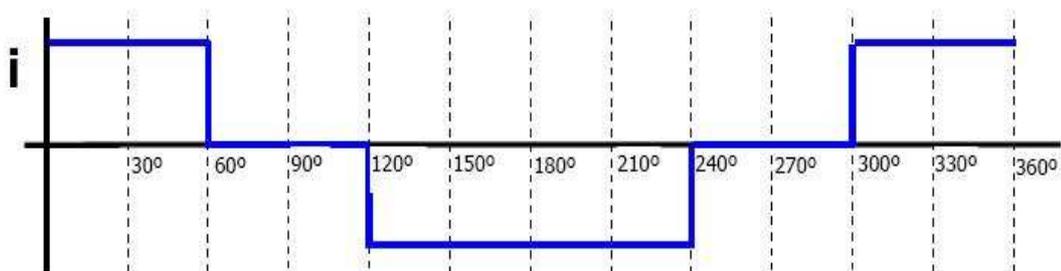


Figura 7 – Corrente em função de  $\theta$  (3).

A potência total fornecida, desprezando-se as perdas, é o produto da tensão pela corrente, sendo esta potência elétrica transformada em potência mecânica pelo produto do torque pela velocidade angular. O torque obtido é então, unidirecional e esta representado na Figura 8 (3):

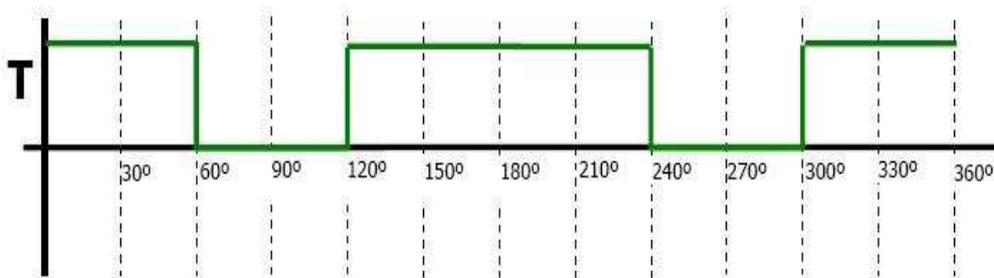


Figura 8 - Torque versus posição  $\theta$  (3).

Como se pode observar no gráfico acima, o torque produzido no motor representado anteriormente, o qual é constituído de uma bobina somente, não é constante, ou seja, apresenta regiões onde o torque é nulo. Os valores de torque ocorrem na posição da bobina onde ocorre variação do fluxo concatenado. Para contornar este problema, o motor é construído com três bobinas defasadas em  $120^\circ$  entre si, o torque produzido também esteja defasado em  $120^\circ$ . Esta construção pode ser vista na Figura 9 (3).

Os torques são produzidos por cada bobina e o torque total do motor, podem ser visualizados na Figura 10:

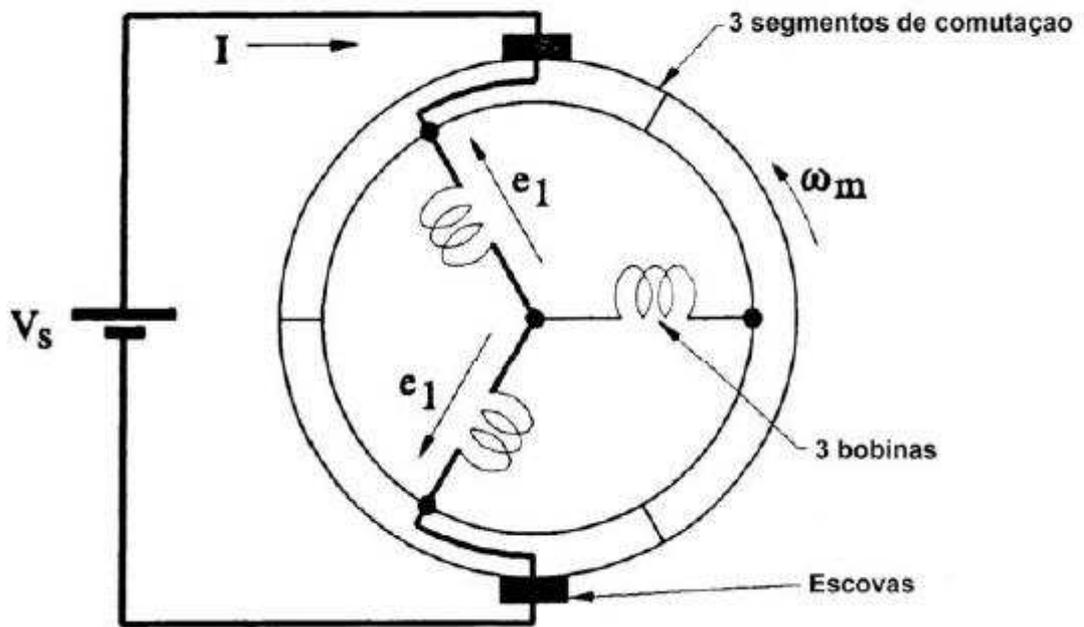


Figura 9 – Motor com três bobinas (6).

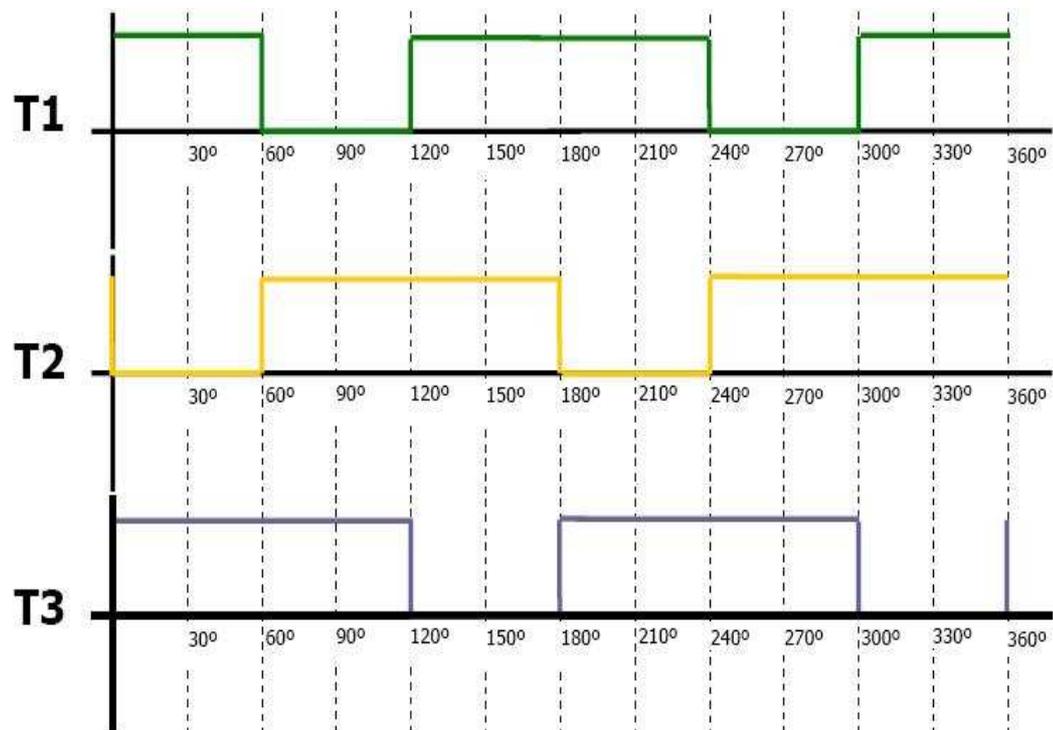


Figura 10 – Torque produzido pelo torque de cada bobina (3).

Considerando o torque concatenado de cada fase  $T_1=T_2=T_3=T$ , temos a soma dos torques constante e igual a  $2T$ , visualizado na Figura 11.

Na verdade, o funcionamento do motor BLDC se assemelha muito a este tipo de motor, porém com algumas modificações. Difere pela substituição dos comutadores do motor por um circuito eletrônico, conversor elétrico, que realiza a operação de chaveamento baseado na informação do posicionamento do rotor e também pela montagem dos imãs, os quais são colocados no rotor ao invés do estator (3).

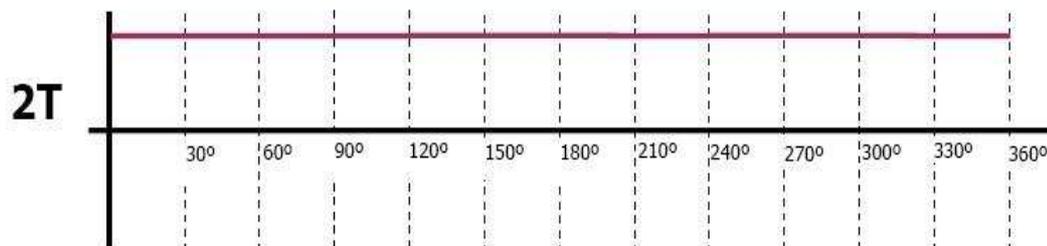


Figura 11 – Esquema dos torques do motor DC (3).

A corrente fornecida pelo conversor para cada bobina deve ter a sua polaridade invertida ao longo de sua operação, não podendo ser aplicada diretamente uma tensão CC ao longo do tempo (3).

Assim, para que o torque do motor tenha sempre o mesmo sentido, as bobinas são energizadas / chaveadas em uma ordem seqüencial, sendo aplicada em uma bobina tensão positiva, a segunda bobina com tensão negativa e a outra bobina permanecendo desenergizada para cada instante de funcionamento. Esta é uma das principais características dos motores BLDC, ou seja, somente duas bobinas são energizadas ao mesmo tempo, sendo que a outra permanece desligada (3).

Esta análise foi feita considerando que as correntes são aplicadas e desligadas exatamente em determinadas posições do rotor, desprezando-se efeitos de relutância do motor, ou seja, a característica de não linearidade do torque foi desconsiderada (3).

Na prática não se obtém um torque idealmente constante, mais sim com certo ripple de torque em torno do valor máximo, podendo ser mais bem evidenciado girando o motor a baixas velocidades, com pode-se observar na Figura 12 (3):

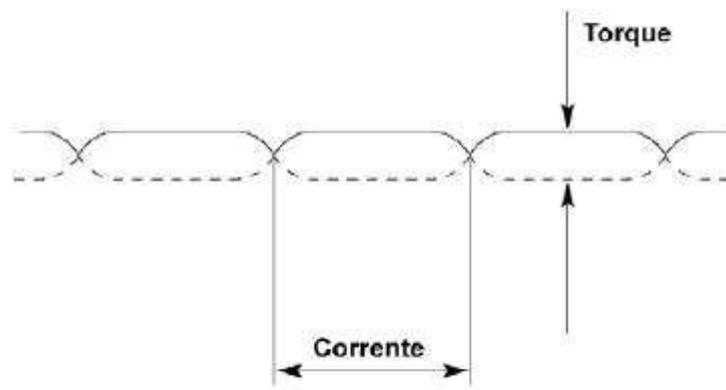


Figura 12 – Ripple de torque (3).

## 2.2 Microcontroladores

Os microcontroladores são o fruto de anos de avanços tecnológicos, são utilizados para controlar diversos tipos de sistemas e máquinas através de uma combinação de código binário compilado em linguagem de máquina. Sua grande vantagem é a possibilidade de alteração e atualização rápida e simples, bastando para isso à criação de um novo programa.

O seu principal alvo é o controle autônomo de sistemas, dessa forma geralmente procura-se que eles sejam baratos e pequenos. Para atingir esse objetivo, é inserido no mesmo encapsulamento a CPU e diversos periféricos internos, isso reduz muito o espaço físico na PCI, barateando o projeto e tornando atualizações e modificações um processo mais simples e rápido. Dependendo da aplicação é possível se escolher o microcontrolador mais adequado observando a lista de periféricos que ele possui.

Periféricos internos são sub-circuitos presentes na mesma pastilha de silício da CPU, hoje podemos encontrar incorporado aos microcontroladores uma grande lista de periféricos internos como, por exemplo:

- Memórias (EEPROM, RAM).
- Temporizadores / contadores.
- Canal de comunicação serial (uart,...).
- Conversores (A/D e D/A).
- Sistemas de interrupções.
- Portas de I/O.
- Canal PWM.
- Sensores.
- Comparadores.

### **2.2.1 Microcontroladores Pic**

Os microcontroladores PIC são fabricados pelo Microchip. Existem basicamente quatro famílias de PICS diferenciadas pelo tamanho da memória de programa: 12, 14, 16 e 32bits. Eles possuem arquitetura interna tipo Harvard. A diferença entre essa arquitetura e as tradicionais do tipo Von Neumann, é que ela possui um barramento para programa e outro para os dados.

### **2.2.2 O Pic 18F4520**

Para este projeto foi escolhido o pic 18F4520, segue algumas de suas características:

- Possui 40 pinos
- 3 Pinos de Interrupção externa

- 16384 bytes de memória FLASH
- 1536 bytes de memória RAM
- 256 bytes de memória EEPROM
- Processamento de até 10 milhões de instruções por segundo
- 13 canais A/D
- 4 Temporizadores/contadores

A figura Abaixo descreve seus pinos.

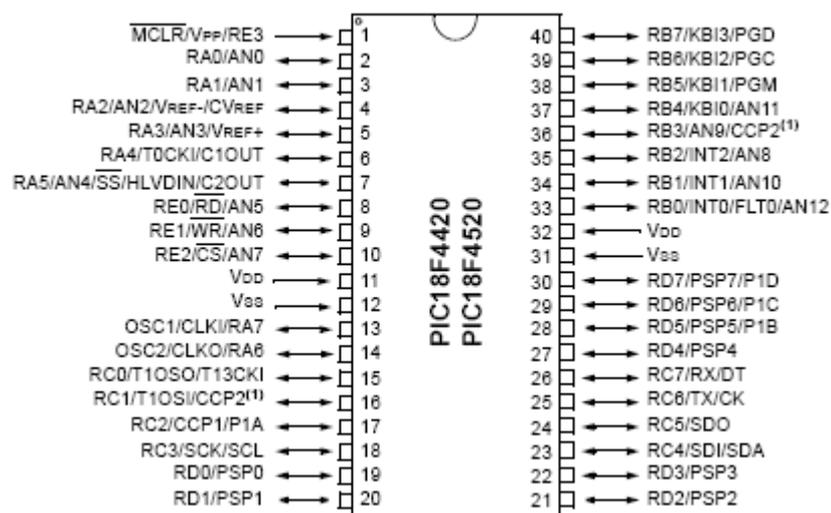


Figura 13 – Pinagem do pic 18F4520 (7)

Pode se dizer que possui 34 pinos de entrada e saída divididos em PORTA, PORTB, PORTC, PORTD, PORTE descritos abaixo

- PORTA: 8 pinos do RA0 ao RA7 que podem ser utilizados como I/O de uso geral ou como conversor A/D, além de possuir a função de detecção de baixa tensão e referencia do A/D.
- PORTB: 8 pinos do RB0 ao RB7 como I/O de uso geral, possui três interrupções externas, modulo capture e compare e pinos de gravação e debugger.

- PORTC: 8 pinos do RC0 ao RC7 como I/O de uso geral, saída do oscilador do timer, modulo capture e compare, clock e data para os modos de comunicação serial.
- PORTD: 8 pinos do RD0 ao RD7 como I/O de uso geral ou ser configurado como porta de comunicação paralela.
- PORTE: 3 pinos do RE0 ao RE2 como I/O de uso geral ou utilizar os pinos de controle de escrita e controle de seleção para acesso ao modo paralelo.

### 3 PROJETO

O objetivo do projeto é criar um circuito para acionar o motor BLDC utilizando um microcontrolador pic.

Para acionar as bobinas do motor e necessário um circuito como o abaixo.

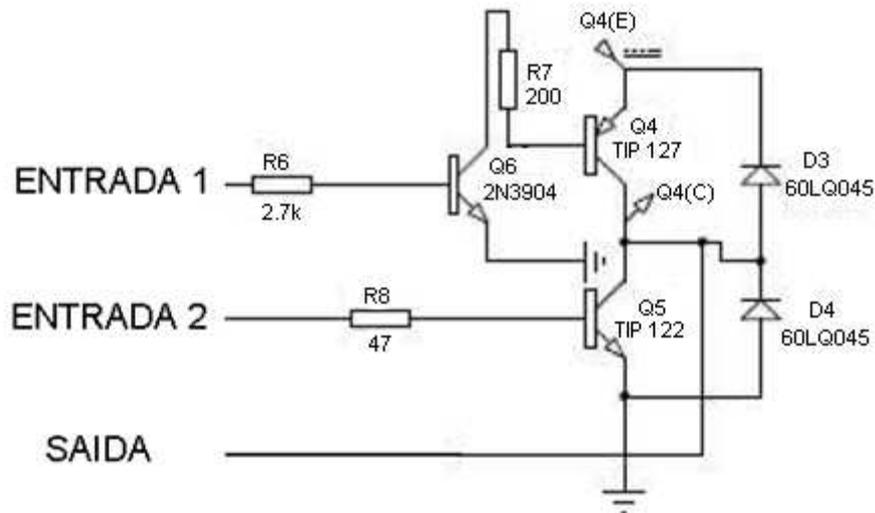


Figura 14 – Circuito de Acionamento

Este circuito irá gerar os sinais necessários para seu acionamento. Os resistores R6 e R8 receberão os sinais do PORTC do microcontrolador que pode ser 0 (zero volts) ou 1 (cinco volts). Quando o resistor R6 receber 1 e R8 receber 0 a saída para o motor irá gerar a tensão máxima no caso 12V, com R6 recebendo 1 e R8 1 a saída ficará no ponto de flutuação que gera aproximadamente 6V, por fim com R6 recebendo 1 e R8 recebendo zero a saída irá para zero conforme é ilustrado na tabela abaixo:

Tabela 1 – Tabela verdade do circuito de acionamento

Entrada1	Entrada2	Saída
R6	R8	motor
1	0	12V
1	1	6V
0	1	0V

E necessário um circuito para cada bobina ficando da seguinte forma:

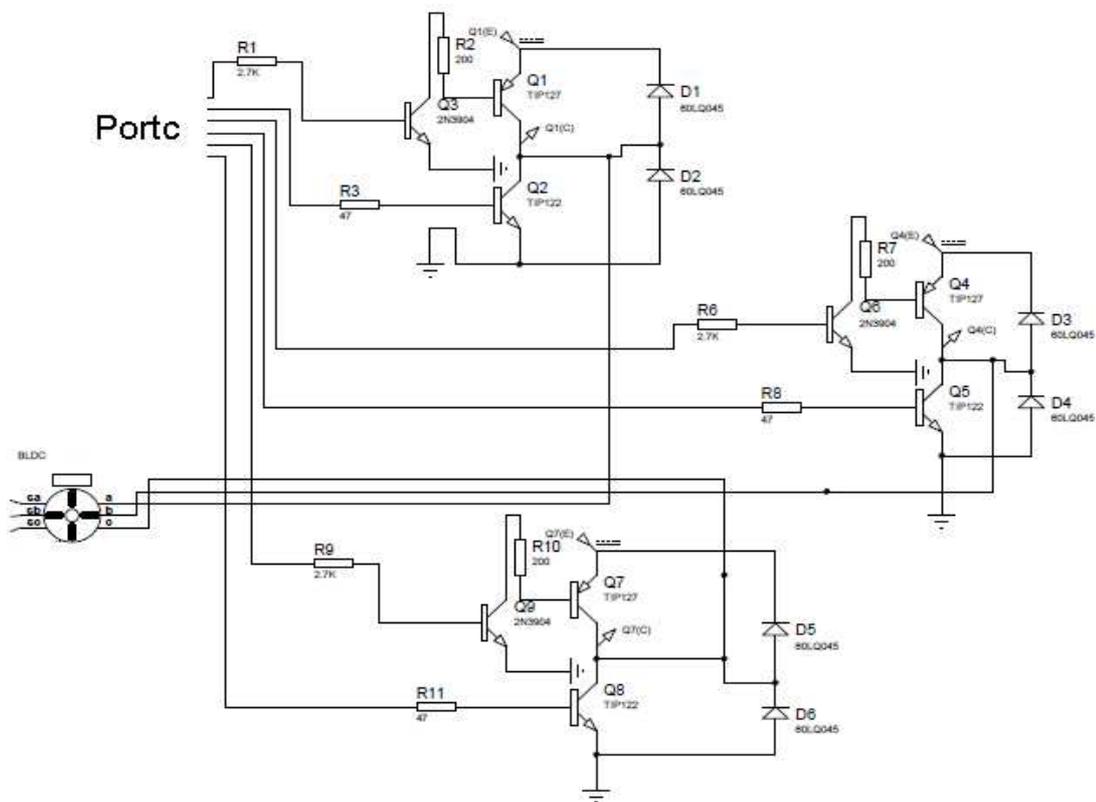


Figura 15 – Circuito de Acionamento completo

Este esquema é para um motor de baixa potência, para um motor de alta potência pode se usar mosfets na seguinte configuração:

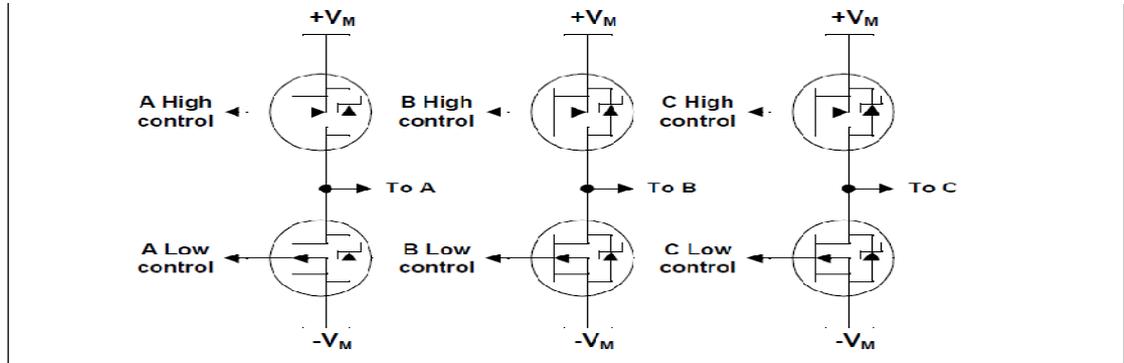


Figura 16 – Circuito de acionamento alta potência (1)

Este projeto foi desenvolvido para baixa potência e com o auxílio do software proteus.

Após a ligação do circuito de potência ao motor, ligamos ao PORTC do PIC 18f4520 escolhido para este projeto. Os sensores e chaves são ligados ao PORTB do microcontrolador conforme figura abaixo:

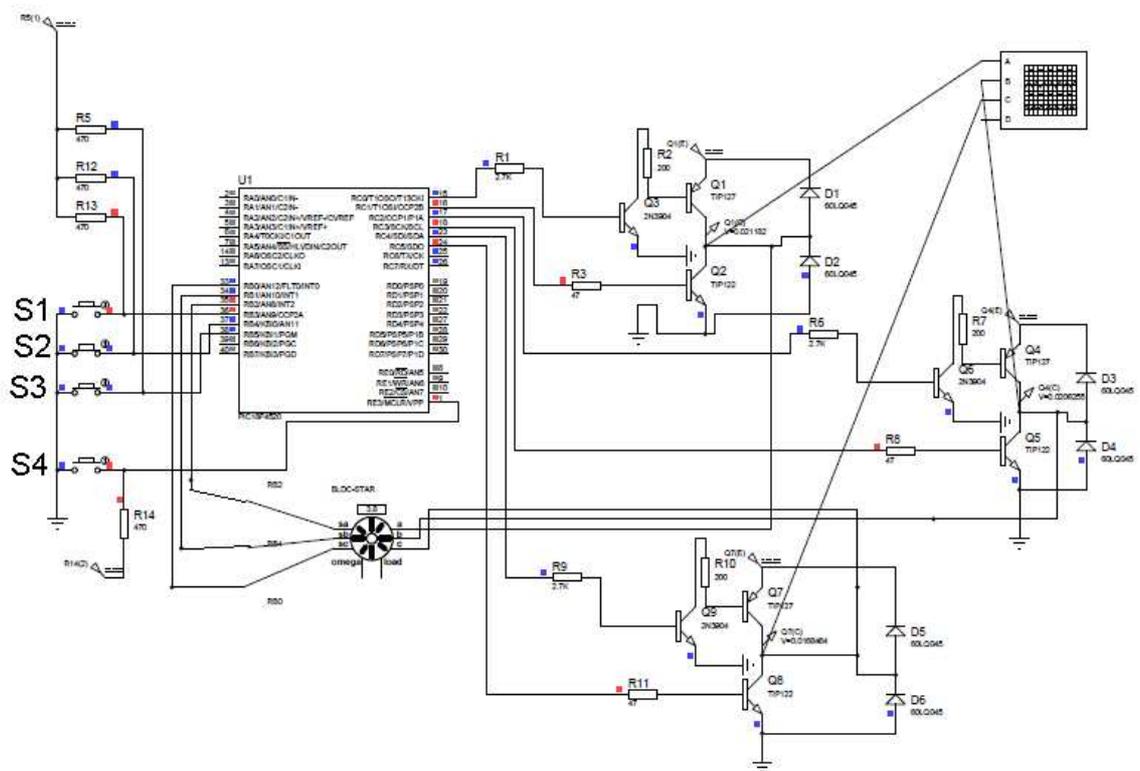


Figura 17 – Protótipo de controle para motor brushless

O circuito funciona da seguinte forma: os sensores de efeito hall interno ao motor, irão enviar os sinais de posição do motor para o microcontrolador, que através do PORTC enviara os sinais para o motor seguindo a Tabela 2 para sentido horário e Tabela 3 para anti-horário. Todas as chaves são do tipo push Button, a chave S1 determina o sentido de rotação, S2 determina se o motor esta girando ou parado, S3 determina a velocidade, S4 o reset do Microcontrolador.

Tabela 2 – Relação sensor com saída para as bobinas do motor sentido horário

Entrada Sensor hall			Saída Portc do microcontrolador					
S1	S2	S3	RC5	RC4	RC3	RC2	RC1	RC0
1	0	1	1	1	1	0	0	1
0	0	1	1	0	1	1	0	1
0	1	1	1	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	0	1	1	0
1	1	0	0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	1	0	1	1

Tabela 3 - Relação sensor com saída para as bobinas do motor sentido anti-horário

Entrada Sensor hall			Saída Porte do microcontrolador					
S1	S2	S3	RC5	RC4	RC3	RC2	RC1	RC0
1	0	1	1	1	0	1	1	0
0	0	1	0	1	1	1	1	0
0	1	1	0	1	1	0	1	1
0	1	0	1	1	1	0	0	1
1	1	0	1	0	1	1	0	1
1	0	0	1	0	0	1	1	1

O Circuito deve gerar os seguintes sinais nas fases do motor:

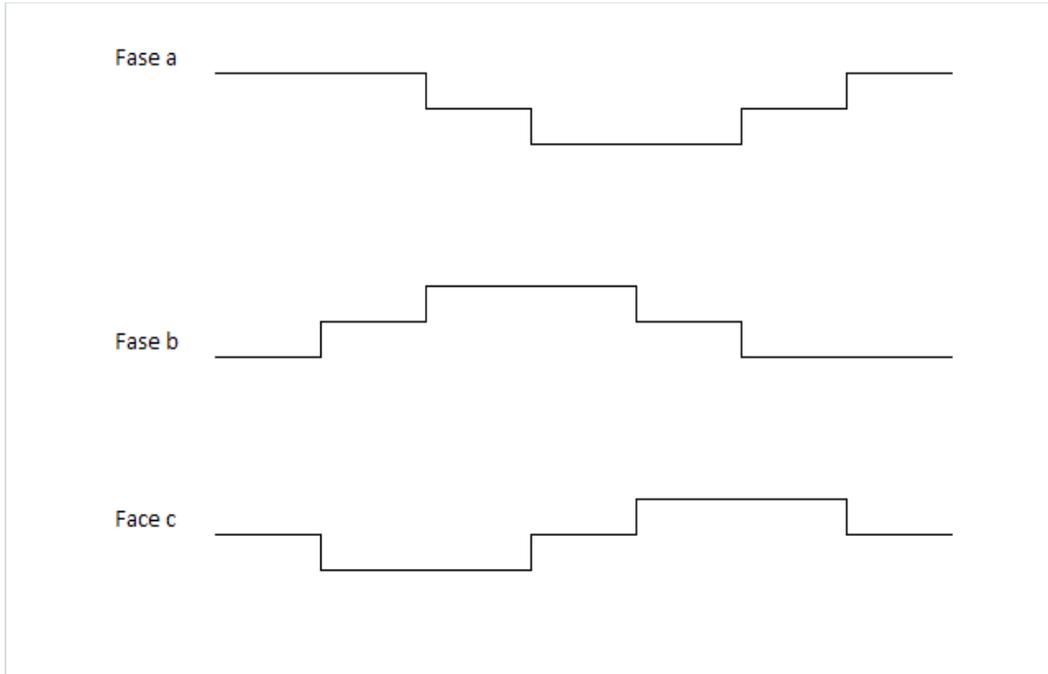


Figura 18 – Forma de onda sentido horário (1)

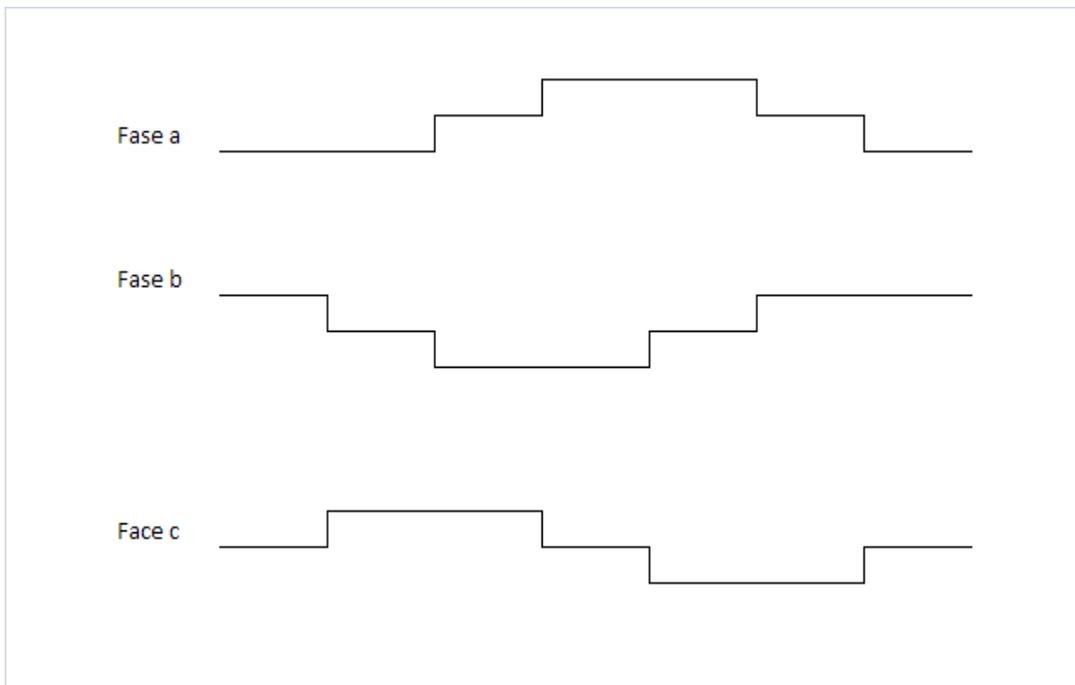


Figura 19 - forma de onda sentido anti-horário (1)

Baseado nas tabelas o programa ficou da seguinte forma:

```

void disponive() {

if (portb.rb3==1){

if((portb.RB0==1)&&(portb.RB1==0)&&(portb.RB2==1 )) //1

PORTC=0B00111001;

if((portb.RB0==0)&&(portb.RB1==0)&&(portb.RB2==1)) //6

PORTC=0B00101101;

if((portb.RB0==0)&&(portb.RB1==1)&&(portb.RB2==1)) //5

PORTC=0B00100111;

if((portb.RB0==0)&&(portb.RB1==1)&&(portb.RB2==0)) //4

PORTC=0B00110110;

if((portb.RB0==1)&&(portb.RB1==1)&&(portb.RB2==0)) //3

PORTC=0B00011110;

if((portb.RB0==1)&&(portb.RB1==0)&&(portb.RB2==0)) //2

PORTC=0B00011011;}

if (portb.rb3==0){

if((portb.RB0==1)&&(portb.RB1==0)&&(portb.RB2==1 )) //1

PORTC=0B00110110;

if((portb.RB0==0)&&(portb.RB1==0)&&(portb.RB2==1)) //6

PORTC=0B00011110;

if((portb.RB0==0)&&(portb.RB1==1)&&(portb.RB2==1)) //5

```

```

PORTC=0B00011011;

if((portb.RB0==0)&&(portb.RB1==1)&&(portb.RB2==0)) //4

PORTC=0B00111001;

if((portb.RB0==1)&&(portb.RB1==1)&&(portb.RB2==0)) //3

PORTC=0B00101101;

if((portb.RB0==1)&&(portb.RB1==0)&&(portb.RB2==0)) //2

PORTC=0B00100111;}}

void sentido() {

32i ((portb.rb3==0)&&(estado1==0) ){

portc=0b00101010;

estado1=1;

delay_ms(200);

estado2=0;}

32i ((portb.RB3==0)&&(estado1==1))

comandos ();

32i ((portb.rb3==1)&&(estado2==0) ){

portc=0b00101010;

estado2=1;

delay_ms(200);

estado1=0;}

32i ((portb.RB3==1)&&(estado2==1))

```

```
comandos ();}

void main() {

TRISB.RB0=1; //sensor

TRISB.RB1=1; //sensor

TRISB.RB2=1; //sensor

TRISB.RB3=1; //sentido

TRISB.RB4=1; //stars e stop

TRISB.RB5=1; // velocidade

TRISC=0B0000000;

while(1) {

if((portb.RB4==1)){

if((portb.rb5==1)){

delay_ms(350);

sentido();}

if((portb.rb5==0)){

sentido();} }

else

portc=0b000101010;}} }
```

Nas simulações realizadas os sinais gerados pelo microcontrolador ficaram da seguinte forma, próxima ao ideal:

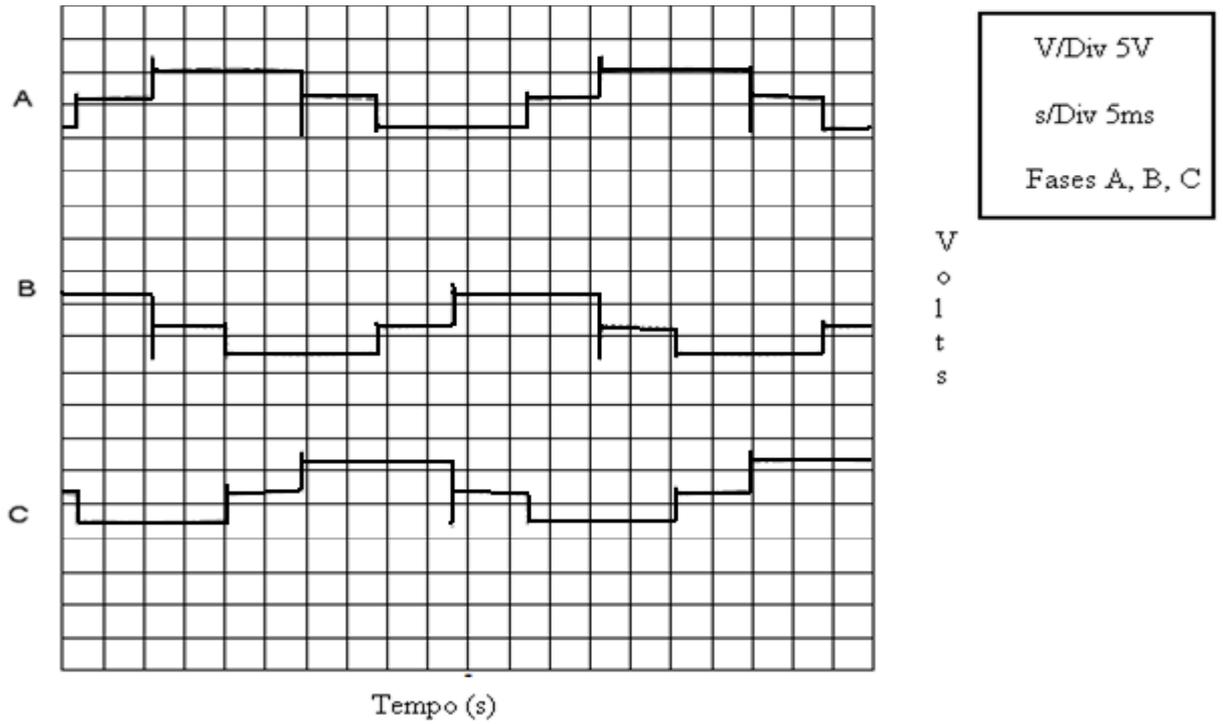


Figura 20 – Forma de onda gerada na simulação com software proteus sentido horário

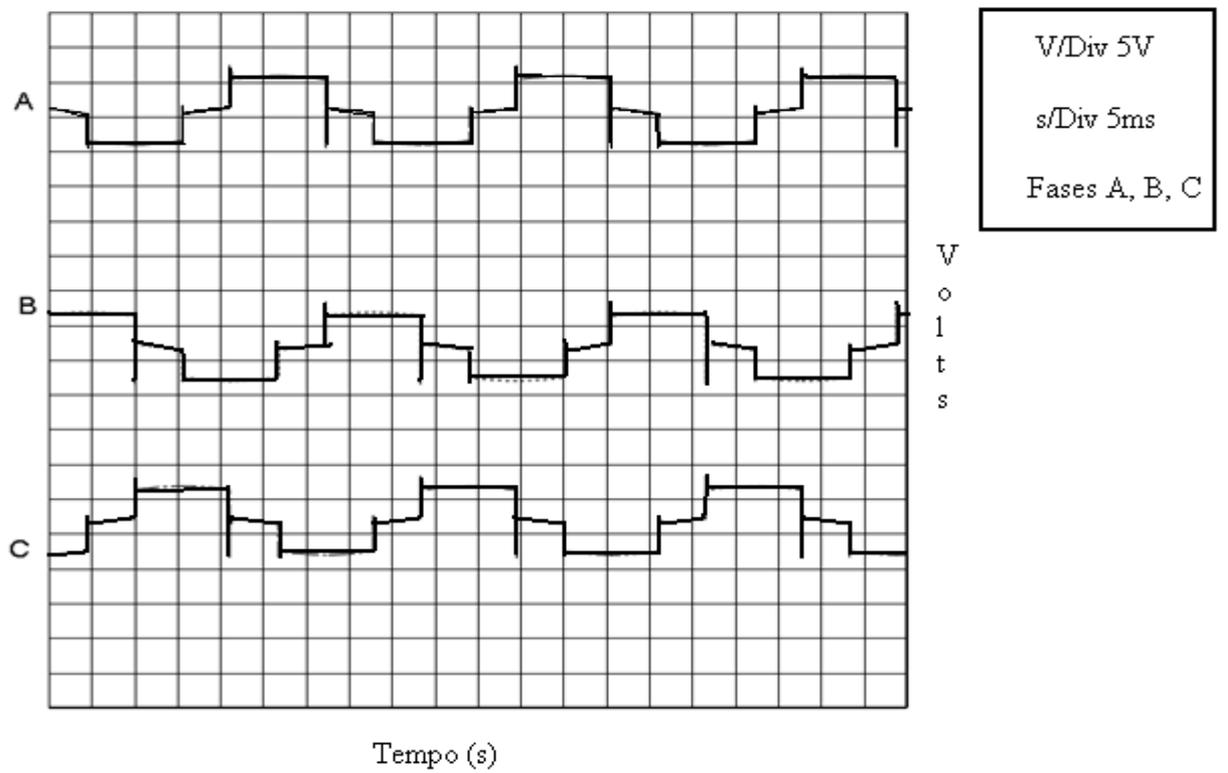


Figura 21 – Forma de onda gerada na simulação com software proteus sentido anti-horário

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseado no exposto conclui que os motores brushless (BLDC) são mais viáveis devido a suas características diferenciadas com relação a sua eficiência se comparado a outros modelos de motores encontrados no mercado.

Com relação ao tempo para o desenvolvimento do TCC posso afirmar que o período programado para o desenvolvimento do mesmo foi curto, por esse motivo não foi possível se aprofundar mais no assunto. Mas após todos os testes realizados constatei que o projeto proposto funciona e os gráficos das figuras 20 e 21 ficaram muito próximos ao ideal representado pelas figuras 18 e 19.

A grande dificuldade que encontrei no desenvolvimento do TCC foi com relação a aprender em curto período sobre os microcontroladores PIC, especificamente o 18F4520 e a manipular os softwares de desenvolvimento utilizados neste projeto.

Pelo curto período de desenvolvimento do trabalho, não foi possível elaborar o projeto físico, porém como mencionado anteriormente foram realizados todos os testes com sucesso no software de desenvolvimento PROTEUS.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Brown, Ward. Brushless DC motor control made easy. Disponível em <[http://36is.microchip.com/stellent/idcplg?Idcservice=SS\\_GET\\_PAGE&NODELID=1824&APPNOTE=EN012037](http://36is.microchip.com/stellent/idcplg?Idcservice=SS_GET_PAGE&NODELID=1824&APPNOTE=EN012037)>. Acesso em: 15/09/2011
2. MORETON, Peter. Industrial Brushless Servomotors. Editora Elsevier Science, 2000
3. 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: 15/09/2011
4. TRINDADE, Rafael Henrique. Estudo de Máquinas Elétricas Não Convencionais: Motor Brushless DC – 2009.39 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em:<[http:// 36is.tcc.sc.36is.br/tce/36isponiveis/18/180500/tce-23042010-091439/](http://36is.tcc.sc.36is.br/tce/36isponiveis/18/180500/tce-23042010-091439/)>. Acesso em 16/09/2011
5. OLIVEIRA, Fabio Fischer. Controle de Velocidade de Motor Brushless DC – 2008. 87f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2008. Disponível em <<http://tceeuilbra.synthasite.com/resources/TCC/2008-2/Controle-de-Velocidade-de-Motor-Brushless-DC-Fabio-Fischer-de-Oliveira-2008-2.Pdf>> Acesso em 15/09/2011
6. MILLER, T. J. E. & HENDERSHOT Jr., J. R., “Design of Brushless Permanent-Magnet Motors”, Magna Physics Publishing and Clarendon Press-Oxford, UK, 1994.
7. MICROCHIP Technology. Pic 18f2420/2520/4420/4520. Disponível em:<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39631E.pdf>>. Acesso em: 17/09/2011
8. HOME, D. “Brushless D.C. Motors”, University of Sheffield, Ed. IEEE Press,2000
9. LEE, E. C.”Brushless DC – A modern approach to variable speed drives”, Powertech Industrial Corporation, Ed. IEEE, USA, 1990.

10. GUCKELBERGER, D. e BRADLEY, B., “Setting a new standard for efficiency: Brushless DC Motors”, Trane Engineers Newsletter, 2004.
11. KUSKO, A. & PEERAN, S. M., “Definition of the Brushless DC Motor”, Ed. Kusko, Electrical Division – Failure Analysis Associates, USA, 1988.
12. T. Kenjo, "Permanent magnet and brushless dc motors", Oxford, 1985
13. T.J.E. Miller, "Brushless permanent magnet and reluctance motor drive", Oxford, 1989
14. Brushless DC Motors disponível em <[http://services.eng.uts.edu.au/cempe/subjects\\_JGZ/ems/ems\\_ch12\\_nt.pdf](http://services.eng.uts.edu.au/cempe/subjects_JGZ/ems/ems_ch12_nt.pdf)> Acesso em: 06/12/2011

## APÊNDICE A – APLICAÇÕES

### A.1 Impressora a Laser

Em uma impressora laser, um espelho polígono é acoplado diretamente ao eixo do motor e sua velocidade é controlada com muita precisão na faixa de 5.000 a 40.000 rpm. Quando um feixe de laser atinja o espelho poligonal rotativo, o feixe refletido viaja em direção diferente de acordo com a posição do rotor. Portanto, este feixe refletido pode ser usado para a digitalização, como mostrado na Figura 22. Como uma imagem é produzida é explicado, usando Figura 23 e as seguintes declarações:

- O cilindro tem uma camada fotocondutora em sua superfície, com fotossensibilidade da camada de estar sintonizado com o comprimento de onda do laser. A imagem latente de informações a serem impressas formado na superfície do tambor, o toner é atraído por essa imagem.
- A imagem desenvolvida é então transferida para papel normal e fixo através de calor e pressão.
- A imagem latente é eliminado.

Um recente motor brushless dc projetado para uma impressora a laser é mostrado na Figura 24, e sua dados característicos são apresentados na Tabela 4.

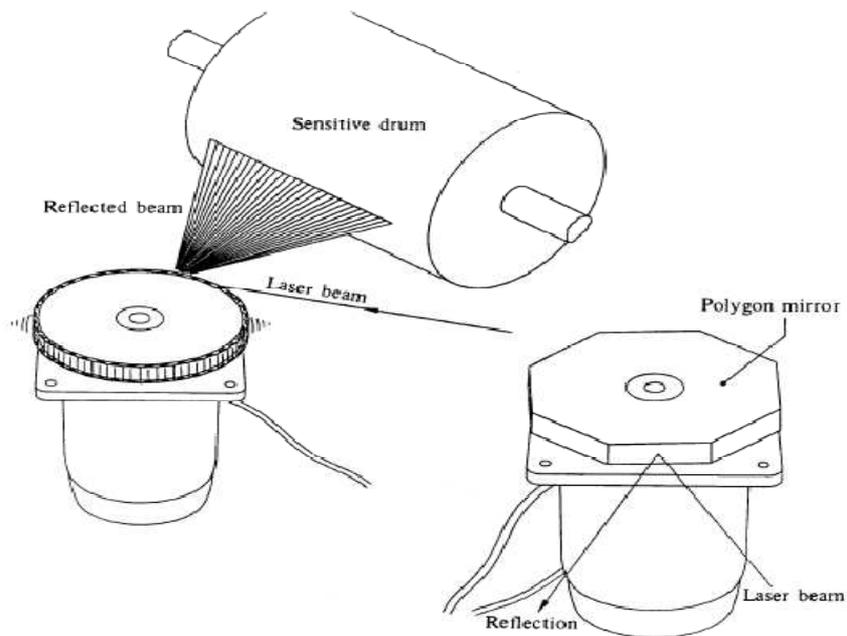


Figura 22 - Função do motor para impressoras laser (12)

À direita um motor DC sem escovas dirigindo um espelho poligonal, e acima como digitalizar feixes de laser.

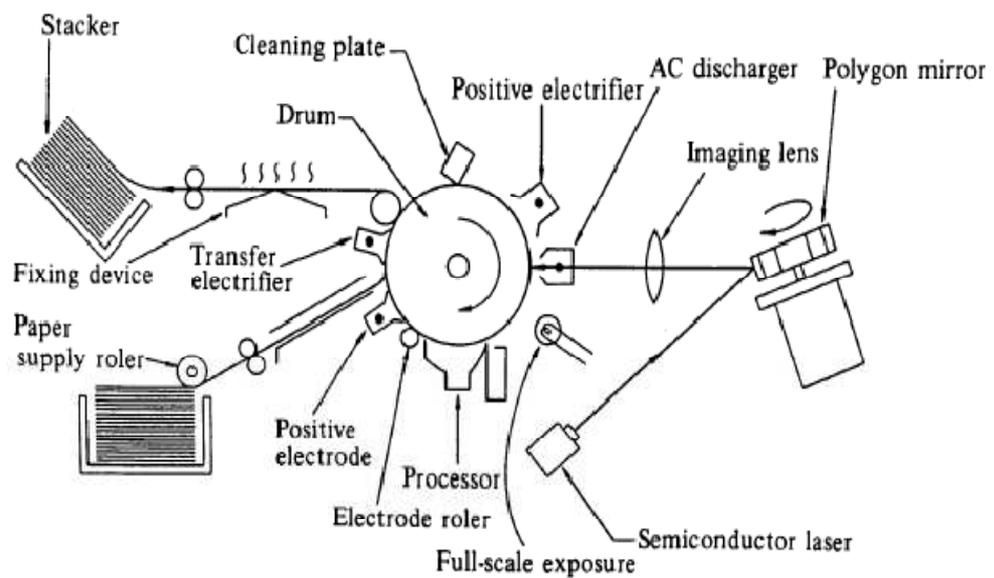


Figura 23 – Principios de Impressora Lase (12)

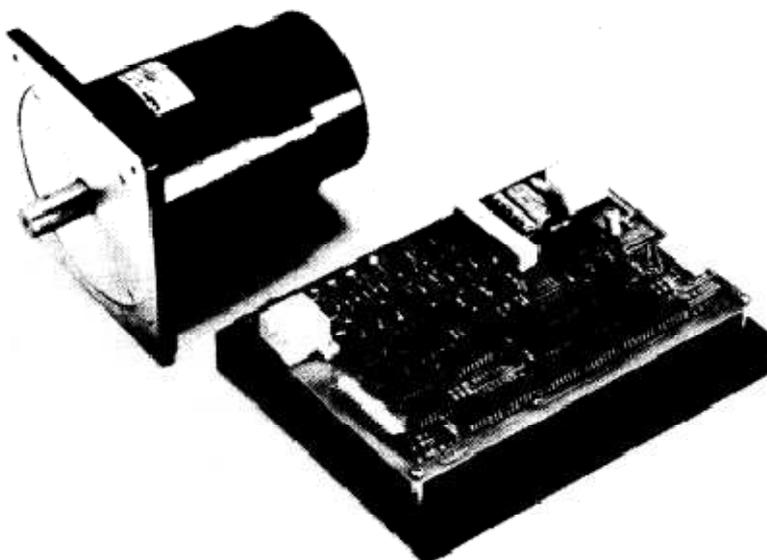


Figura 24 – Brushless dc motor para uma impressora Laser(12)

Tabela 4 – Características dos motores sem escovas trifásicos(12)

Item	Manufacturer Model	Nippon Densan Corporation 09PF8E4036
Voltage	V	$\pm 24 \pm 1.2$
Output	W	36
Rated torque	$10^{-1} \text{ N m}$	0.294
Starting torque	$10^{-1} \text{ N m}$	0.588
Starting time	s	3 (at non-inertial load)*
Rated speed	r.p.m.	6000, 9000, 12 000 selection
Rated current	A	3.5
Temperature	$^{\circ}\text{C}$	5 ~ 45
Stability	per cent	$\pm 0.01$
		Three-phase $\Delta$ connection

\*A carga não inercial é uma carga aplicada usando uma roldana e um peso

## A.2 Unidade de disco rígido

Como o dispositivo de memória secundária principal do computador, discos rígidos fornecem uma maior capacidade de armazenamento de informações e menor tempo de acesso. Anteriormente, motores síncronos foram usados como rotação do motor em disquete ou unidades de disco rígido. No entanto, motores brushless dc que são menores e mais eficientes foram desenvolvidos para esta aplicação e têm contribuído para a miniaturização e aumento da capacidade de memória em sistemas de computador. A Tabela 5 compara um típico motor síncrono com um motor brushless dc quando eles são usados como rotação do motor em um disco rígido de 8 polegadas. Como é óbvio a partir da tabela, o motor DC sem escovas é muito superior ao motor síncrono. Embora o motor brushless dc é um pouco estruturalmente complicado por causa dos elementos Hall ou Cis e custos de seu circuito, o motor brushless dc superam os inconvenientes.

Tabela 5 - Comparação de um a motor síncrono e um motor brushless dc para uma unidade de disco rígido de 8 polegadas(12)

	AC synchronous motor	Brushless DC motor
Power supply: direct current, low voltage (for extension and interchangeability)	Inverter required	Direct current, low voltage (12–24 V)
Speed adjustment	Since speed depends on the frequency, regional adaptability is low	Adjustable independent of frequency
Adjustment of starting time	Adjustment not possible	Adjustment possible
Temperature rise	High	Low
Efficiency	Low (approx 30 per cent)	High (40–50 per cent)
Output to volume ratio	Small (bad)	Large (good)
Speed control	Fixed	Feedback control
Structure/cost	Simple, low cost	Slightly complicated, control circuit is not so expensive by the use of ICs

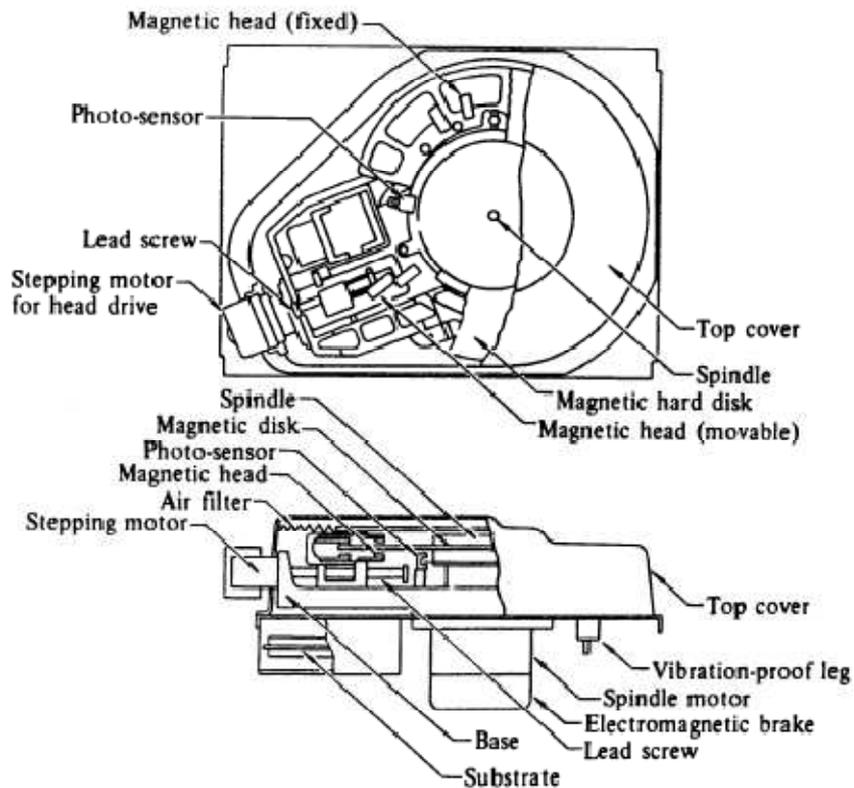


Figura 25 - Um exemplo de unidade de disco rígido (12)

A unidade de disco rígido funciona da seguinte forma (ver Figura 25): A superfície do disco de alumínio é revestido com uma película de material magnético. Os dados são lidos / escritos por uma cabeça magnética flutuante a uma distância de cerca de 0,5 mm da superfície do disco devido ao fluxo de ar causada pela rotação do disco, e isso mantém uma distância constante. Portanto, quando o disco está parado ou abrandou, a cabeça pode tocar o disco e causar danos para o filme magnético. para evitar isso, este motor spindle deve satisfazer condições rigorosas quando se inicia a parar.

A Tabela 6 lista os dados básicos característicos de motor brushless dc utilizados em disco rígido de 8 polegadas (Figura 26)

Tabela 6 – Características de um motor trifásico unipolar projetado para uma unidade de disco rígido(12)

Item	Manufacturer	Nippon Densan Corporation	
	Model	09FH9C4018	09FH9C4022
Voltage	V	24±2.4	24±2.4
Output	W	18	22
Rated torque	10 <sup>-1</sup> N m	0.490	0.588
Starting torque	10 <sup>-1</sup> N m	1.47	1.96
Starting time	s	1.35	1.55
Rated speed	r.p.m.	3600	3600
Rated current	A	2.0	2.4
Temperature	°C		0~50
Stability	per cent		±1.0
Inertia	10 <sup>-6</sup> kg m <sup>2</sup>	1380	1670
Braking method		Electromagnetic method	
Number of disks		2	4

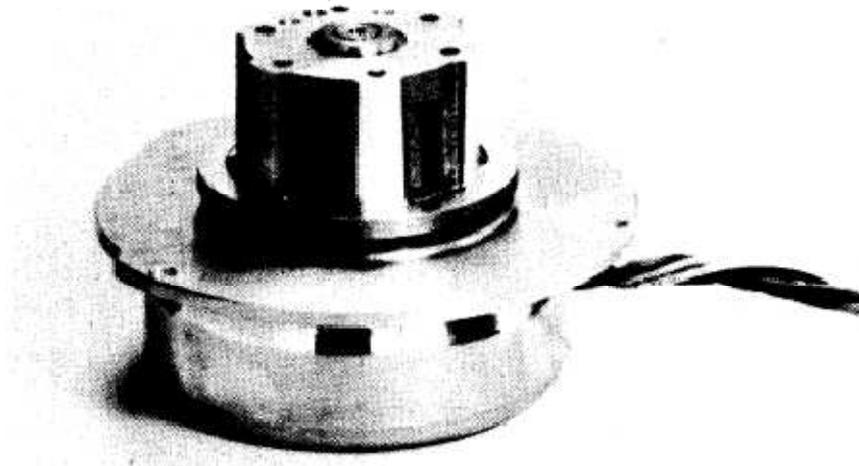


Figura 26 – Brushless dc motor utilizado em disco rígido (12)

