

MARCO ANTONIO ALVES DE SOUZA

**IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA
CONTROLADOR DE MOTOR DE PASSO
EM MALHA FECHADA UTILIZANDO
TECNOLOGIA BASEADA EM
CONTROLADOR DIGITAL DE SINAIS**

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
Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues

São Carlos
2007

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: _____

Título: _____

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em ____/____/____,**

com NOTA ____ (____, ____), pela comissão julgadora:

(Assinatura) _____
(Titulação/nome/instituição)

(Assinatura) _____
(Titulação/nome/instituição)

Coordenador da Comissão de Coordenação do
Curso de Engenharia Elétrica (CoC-EE)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Luiz Alves de Souza e Ana da Cunha Carvalho de Souza, pelo carinho e apoio inestimável em todos os momentos de minha vida.

Aos meus irmãos, Inácio Alves de Souza e Márcio Aparecido Alves de Souza, por serem os meus melhores amigos e sempre terem me ajudado nos momentos oportunos.

Aos meus saudosos tios, Antonio da Cunha Carvalho Amaral, Bonifácio Alves de Souza e José da Cunha Carvalho Amaral, que sempre mantiveram apreço por minha pessoa e por minha trajetória estudantil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter permitido a realização deste trabalho e estar presente em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues pela orientação precisa e segura deste trabalho em todos os momentos solicitados.

À empresa Mega Bobinadeiras pelo apoio técnico e financeiro, indispensáveis para a concretização do projeto cujo delineamento é feito nesta obra.

À Jussara Ramos Zoia, funcionária do Departamento de Engenharia Elétrica, exemplo inequívoco de uma verdadeira servidora pública.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo os quais tive contato e que contribuíram de alguma forma em minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CARACTERIZAÇÃO E FORMULAÇÃO DO TEMA DO TRABALHO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 MOTORES DE PASSO	4
2.1.1 Tipos de Motores de Passo	4
2.1.1.1 Motores de Relutância Variável	5
2.1.1.2 Motores de Imã Permanente	6
2.1.1.3 Motores Híbridos.....	7
2.1.2 Modos de Operação dos Enrolamentos	9
2.1.2.1 Alimentação Unipolar	10
2.1.2.2 Alimentação Bipolar.....	11
2.1.3 Modos de Acionamento.....	13
2.1.3.1 Passo Completo de Única Excitação de Fase	13
2.1.3.2 Passo Completo Com Excitação Dual	14
2.1.3.3 Meio Passo.....	15
2.1.3.4 Micropasso	17
2.2 SISTEMAS DE ACIONAMENTO DE MOTORES DE PASSO	18
2.2.1 Acionamento em Malha aberta.....	18
2.2.2 Acionamento em malha fechada.....	20
2.2.2.1 Dispositivos de Realimentação - <i>Encoders</i>	21
2.3 CONTROLE DE CORRENTE	25

2.4	CONTROLADORES DIGITAIS DE SINAIS.....	28
3	MATERIAL E MÉTODO	30
3.1	<i>HARDWARE</i>	30
3.1.1	Controlador – dsPIC30F3010.....	30
3.1.2	Controlador de Corrente – L6506.....	37
3.1.3	Driver de Corrente – L6203.....	39
3.1.4	Motor de Passo	41
3.1.5	Interface Serial – RS232.....	41
3.1.6	Realimentação	43
3.1.7	Montagem.....	45
3.2	<i>SOFTWARE</i>	45
3.2.1	<i>Software</i> – DSC	46
3.2.2	<i>Software</i> – Interface gráfica.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	SIMULAÇÕES.....	51
4.2	TESTES DE BANCADA.....	55
5	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vista de seção transversal de um motor de passo V.R. (4).	5
Figura 2.2 – Rotor de um motor de passo P.M. (5).	6
Figura 2.3 – Vista em corte de um motor de passo P.M. (5).	7
Figura 2.4 – Vista de seção transversal de um motor de passo híbrido (5).	8
Figura 2.5 – Estrutura do rotor de um motor de passo híbrido (2).	9
Figura 2.6 – Motor de passo unipolar (6).	10
Figura 2.7 – Esquema de chaveamento tipo unipolar (7).	11
Figura 2.8 – Motor de passo bipolar (6).	12
Figura 2.9 – Esquema de uma ponte H (8).	12
Figura 2.10 – Curva de torque versus velocidade para motor unipolar e bipolar (7).	13
Figura 2.11 – Seqüência para modo passo completo de única excitação de fase (9).	14
Figura 2.12 – Seqüência para modo passo completo com excitação dual (9).	15
Figura 2.13 – Seqüência para modo meio passo (9).	16
Figura 2.14 – Correntes de fase no modo micropasso (5).	17
Figura 2.15 – Diagrama de blocos de acionamento em malha aberta para motores de passo.	18
Figura 2.16 – Diagrama de blocos de acionamento em malha fechada para motores de passo.	21
Figura 2.17 – Princípio de funcionamento de um encoder rotativo (13).	22
Figura 2.18 – Encoder absoluto com código gray de 4 bits (14).	23
Figura 2.19 – Encoder incremental (14).	24
Figura 2.20 – Gráfico da taxa de subida da corrente: ideal e real (15).	25
Figura 2.21 – Princípio do motor R-L (5).	26
Figura 2.22 – <i>Drive chopper</i> : formas de onda de tensão e corrente (2).	26
Figura 2.23 – Corrente no motor utilizando controle L/R, L/nR e chopper (7).	27
Figura 2.24 – Drive chopper com recirculação de corrente (5).	28
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do controlador de motor de passo.	30
Figura 3.2 – Diagrama de pinos do dsPIC30F3010 (19).	32
Figura 3.3 – Diagrama de blocos do módulo QEI (19).	33
Figura 3.4 – Sinais do módulo QEI (18).	33
Figura 3.5 – Decodificador de quadratura modo 2X (19).	34

Figura 3.6 – Decodificador de quadratura modo 4X (19).	34
Figura 3.7 – Interrupção pelo sinal INDEX (18).	35
Figura 3.8 – Interrupção pelo registrador MAXCNT (18).	36
Figura 3.9 – Amostragem realizada pelo filtro digital do módulo QEI (18).	36
Figura 3.10 – Diagrama de blocos interno do C.I. L6506 (20).	37
Figura 3.11 – Circuito de controle de corrente e estágio de saída do controlador (20).	38
Figura 3.12 – Pinagem do C.I. L6203 (encapsulamento multiwatt) (21).	40
Figura 3.13 – Diagrama de blocos interno do C.I. L6203 (21).	40
Figura 3.14 – Motor de passo híbrido utilizado no projeto do controlador (22).	41
Figura 3.15 – Diagrama de blocos geral do módulo UART (19).	42
Figura 3.16 – Diagrama da comunicação serial.	43
Figura 3.17 – Encoder de 200 pulsos utilizado no projeto (sem a caixa de montagem).	44
Figura 3.18 – Bancada de testes do projeto.	45
Figura 3.19 – Ambiente de desenvolvimento MPLAB IDE.	46
Figura 3.20 – Programador e depurador ICD2.	47
Figura 3.21 – Fluxograma do <i>software</i> do controlador.	48
Figura 3.22 – Sinais PWM utilizados para obter tensões de referência variáveis (7).	49
Figura 3.23 – Interface gráfica do sistema controlador de motor de passo.	50
Figura 4.1 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo passo completo excitação simples – sentido horário.	51
Figura 4.2 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo passo completo excitação simples – sentido anti-horário.	52
Figura 4.3 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo passo completo excitação dual – sentido horário.	52
Figura 4.4 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo passo completo excitação dual – sentido anti-horário.	53
Figura 4.5 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo meio passo – sentido horário.	53
Figura 4.6 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo meio passo – sentido anti- horário.	54

Figura 4.7 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo micropasso – $\frac{1}{4}$ passo – sentido horário.	54
Figura 4.8 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo micropasso – $\frac{1}{4}$ passo – sentido anti-horário.	55
Figura 4.9 – Gráfico de sinais de tensão de referência para modo meio passo.	56
Figura 4.10 – Gráfico de sinais de tensão de referência para modo micropasso $\frac{1}{4}$ passo.	56
Figura 4.11 – Gráfico de sinais de tensão de referência para modo micropasso $\frac{1}{16}$ passo.	57
Figura 4.12 – Gráfico de sinais de tensão de referência para modo micropasso $\frac{1}{64}$ passo.	57
Figura 4.13 – Gráfico de corrente em uma das fases do motor de passo – modo meio passo.	58
Figura 4.14 – Gráfico de corrente em uma das fases do motor de passo – modo $\frac{1}{4}$ passo.	58
Figura 4.15 – Gráfico de corrente em uma das fases do motor de passo – modo $\frac{1}{64}$ passo.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Atributos das tecnologias MCU, DSP e DSC.....	29
Tabela 3.1 – Resumo dos periféricos de alguns componentes da família dsPIC30F voltados para o controle de motores e conversão de energia.	31
Tabela 3.2 – Especificações do motor de passo utilizado	41
Tabela 3.3 – Especificações do <i>encoder</i> utilizado no projeto.	44
Tabela 4.1 – Resultados de testes do sistema controlador em termos de verificação/correção de passo para os modos passo completo e meio passo.....	60

RESUMO

Souza, M. A. A. *Implementação de Sistema Controlador de Motor de Passo em Malha Fechada Utilizando Tecnologia Baseada em Controlador Digital de Sinais*. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

A maior parte dos controladores de motor de passo comumente utilizados operam em malha aberta. Apesar de economicamente vantajoso, tal método limita o desempenho do motor em certas circunstâncias de operação tais como em velocidade alta ou em torque elevado. Nestas condições, uma potencial perda de sincronismo pode ocorrer entre os pulsos de comando enviados ao motor e os passos executados por este, afetando a precisão dos movimentos do motor. A performance de um motor de passo pode ser melhorada pelo emprego de um sistema em malha fechada onde uma realimentação de posição permite ao conjunto detectar e corrigir erros de posicionamento devido à perda de passos ou falha do motor. Neste trabalho é apresentado o projeto de um sistema controlador de motor de passo (*hardware* e *software*) que opera em malha fechada utilizando técnica de verificação de passo. Um controlador digital de sinais (dsPIC) é utilizado como elemento central do circuito. A realimentação é realizada por um *encoder* óptico acoplado ao eixo do motor. Este sensor envia pulsos ao controlador digital de sinais de acordo com os passos movidos pelo motor de passo. Os comandos e parâmetros para mover o motor são ajustados por meio de uma interface gráfica desenvolvida em plataforma *Delphi* e são enviados ao controlador via porta serial RS232 de um *PC*. É investigado o funcionamento do circuito em termos de simulações e testes de bancada. Os resultados apresentados atestam o uso do controlador digital de sinais como uma alternativa viável para implementar um sistema controlador de motor de passo.

Palavras chave: motor de passo, malha aberta, malha fechada, controlador digital de sinais.

ABSTRACT

Souza, M. A. A. *Implementation of Closed Loop Step Motor Controller System Using Technology Based on Digital Signal Controller*. 2007. Course Conclusion Work (CCW) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Most step motor controllers commonly used operate in open loop. Despite economically advantageous, such method limits the performance of the motor in certain operation circumstances such as in high speed or in elevated torque. In these conditions, a potential loss of synchronism between the commanded steps and actual may occur, affecting the precision of the movements of the motor. The performance of a step motor can be improved by use of a closed loop system where a position feedback allows to the system to detect and to correct positioning mistakes due to the loss of steps or motor stall. In this work a step motor controller system project is presented (hardware and software) which operates in closed loop using step verification technique. A digital signal controller (dsPIC) is used as main element of the circuit. The feedback is accomplished by an optical encoder coupled to the motor shaft. This sensor sends pulses to the digital signal controller according to moved steps by the motor. The commands and parameters to move the motor are set by the means of a graph interface development in Delphi platform and they are sent to the controller through serial RS232 port from PC. The circuit operation is investigated in terms of simulations and bench tests. The presented results certify the use of the digital signal controller as a viable alternative to implement a step motor controller system.

Key words: step motor, open loop, closed loop, digital signal controller.

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma introdução ao tema do projeto proposto, de forma a caracterizá-lo em linhas gerais. São apontados objetivos do trabalho em questão. O capítulo é finalizado com a apresentação da estrutura deste trabalho.

1.1 CARACTERIZAÇÃO E FORMULAÇÃO DO TEMA DO TRABALHO

Os processos automatizados, em sua maioria, exigem movimentos rápidos e precisos. Devido a essas características e levando em consideração o fator custo, os motores de passo têm uma alta empregabilidade na indústria.

A maior parte dos controladores de motor de passo comumente utilizados operam em malha aberta. Esta é uma das razões pelas quais os motores de passo levam vantagem em relação a outros tipos de motores no que diz respeito aos custos de implementação do controle. De fato, este tipo de motor oferece a única tecnologia inerentemente capaz de controle de movimento sem realimentação.

Entretanto, apesar de economicamente vantajoso, este método de acionamento limita o desempenho do motor em certas circunstâncias de operação tais como nas acelerações/desacelerações, em velocidade alta ou com torque elevado. Nestas condições, uma potencial perda de sincronismo entre os pulsos de comando enviados ao motor e os passos executados por este, pode ocorrer, afetando a precisão dos movimentos do mesmo.

A performance de um motor de passo pode ser melhorada pelo emprego de um sistema em malha fechada onde uma realimentação de posição, realizada por um transdutor do tipo *encoder* óptico, permite ao conjunto detectar e corrigir erros de posicionamento devido à perda de passos. Em muitas aplicações, mesmo com o custo adicional do sensor de realimentação, os motores de passo sob esta forma de acionamento ainda constituem uma solução com maior custo-benefício, quando comparado a outras tecnologias de controle de movimento em malha fechada.

Os controladores de motor de passo atuais podem empregar diversos tipos de circuitos para o seu controle: desde chips dedicados, passando por microprocessadores, microcontroladores, processadores digitais de sinais e até dispositivos de lógica programável. A

aplicação de tais tecnologias permite maior flexibilidade e multiplicidade de controle do motor. Com o advento de novas tecnologias ou aprimoramento das já existentes essas características tendem a aumentar, proporcionando maior confiabilidade dos circuitos que as empregam. Um exemplo disto são os controladores digitais de sinais (do Inglês, DSC - *Digital Signal Controller*) que surgiram como dispositivos capazes de integrar as características de processamento de um processador digital de sinais (do inglês, DSP – *Digital Signal Processor*) com as características de controle de um microcontrolador. Tais características, somadas ao fato que existem atualmente DSC's disponíveis comercialmente dotados de módulo de interface para *encoders* em quadratura, o tornam convidativo para o uso no controle de motores em geral, podendo, portanto, ser utilizado para controlar um motor de passo, objetivo deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é descrever o projeto de acionamento de um motor de passo híbrido em malha fechada (*hardware* e *software*), utilizando um controlador digital de sinais (dispositivo dsPIC da Microchip) como elemento atuador central.

Pretende-se que o controlador de motor de passo deva incorporar alguns recursos, tais como a possibilidade de operar com resolução de micropassos e de ser comandado remotamente por um microcomputador.

Consta ainda do projeto, montagem dos circuitos em *protoboard*, simulações e análises de desempenho do acionador sob certas condições de operação do motor.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 deste trabalho caracteriza o tema proposto, de forma introdutória, definindo os objetivos do mesmo. Termina com a descrição da estrutura desta monografia.

O capítulo 2 apresenta um estudo geral de sistemas controladores de motor de passo com base na literatura, incluindo alguns de seus principais componentes como o motor de passo e controlador/*driver* de corrente. É descrito ainda o controlador digital de sinais que servirá como o elemento de processamento central para acionar o motor.

No capítulo 3 são descritas ou mencionadas todas as partes que formam o *hardware* do controlador. Trabalha ainda a parte de programação envolvida no projeto. É mencionado o ambiente de programação e a ferramenta de desenvolvimento (programação/depuração). Um fluxograma representativo do funcionamento do controlador é apresentado.

O capítulo 4 apresenta os resultados das simulações e testes realizados discutindo alguns aspectos observados.

Por fim, o capítulo 5 encerra o trabalho apresentando as conclusões e sugestões para a continuidade do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, inicialmente é dada uma visão geral sobre os motores de passo, seus tipos, suas técnicas de comando mais usuais e modos de acionamento. Foge, entretanto, ao escopo deste trabalho um estudo pormenorizado dos mesmos. Em seguida são descritos tipos de sistemas de controle de motores de passo e discutidos aspectos de projeto de controladores de motor de passo. Por fim, são apresentados os controladores digitais de sinais, tecnologia recente, que surge como alternativa para o controle de motores.

2.1 MOTORES DE PASSO

Motores de passo são motores elétricos sem comutadores. Possuem como característica fundamental sua total adaptação à lógica digital. De fato, definidos como atuadores incrementais eletromagnéticos, estes motores ao receberem um pulso de tensão ou corrente aplicado em seus terminais, um incremento de movimento angular ocorre em seu eixo caracterizando o que se denomina de passo (1).

A cada passo executado, o rotor estaciona em uma posição estável e única caracterizando um movimento discreto. Além disso, é mantido entre um passo e outro a mesma precisão de posicionamento sem que ocorram erros acumulativos, pois a precisão do passo depende da precisão mecânica ou física do motor (rotor¹ e estator²).

Os passos são designados por seu ângulo, normalmente em graus, e é sem dúvida uma das características mais importantes sob o ponto de vista dos projetos envolvendo motores de passo. O número de graus por passo está intimamente vinculado com o número de passos por volta. Os valores mais comuns para esta característica, também referida como resolução, são 0,72 °, 1,8 °, 3,6 °, 7,5 °, 15 ° e até 90 °. (2).

São utilizados em aplicações que requerem movimentos com alta precisão, como: scanner óptico, movimentação de telescópios, rotor de discos flexíveis, motor de braços mecânicos nas plantas industriais, dentre outros.

2.1.1 Tipos de Motores de Passo

¹ Parte móvel do motor, apta ao movimento rotacional.

² Parte do motor que se mantém fixa, isto é, que não rotaciona.

Há basicamente três tipos de motores de passo: os de relutância variável, os de ímã permanente e os híbridos, classificados de acordo com a estrutura interna. Nos próximos subitens é realizada uma breve explicação destes tipos.

2.1.1.1 Motores de Relutância Variável

Os motores de passo de relutância variável (do inglês, V.R. – *Variable Reluctance*) podem ser considerados o tipo mais básico de motor de passo. Sob o ponto de vista estrutural é provavelmente o mais fácil de ser entendido. A Figura 2.1 ilustra esta categoria de motor.

Este tipo de motor consiste de um rotor em aço doce multipolar com os enrolamentos no estator. Quando as bobinas do estator são energizadas, os dentes do rotor tentam se alinhar com os pólos do estator de forma a minimizar a relutância do circuito magnético estabelecido pela aplicação do campo magnético (redução do entreferro). Por alternar as bobinas que são alimentadas no estator, o campo do estator muda, e assim o rotor move-se para uma nova posição (3).

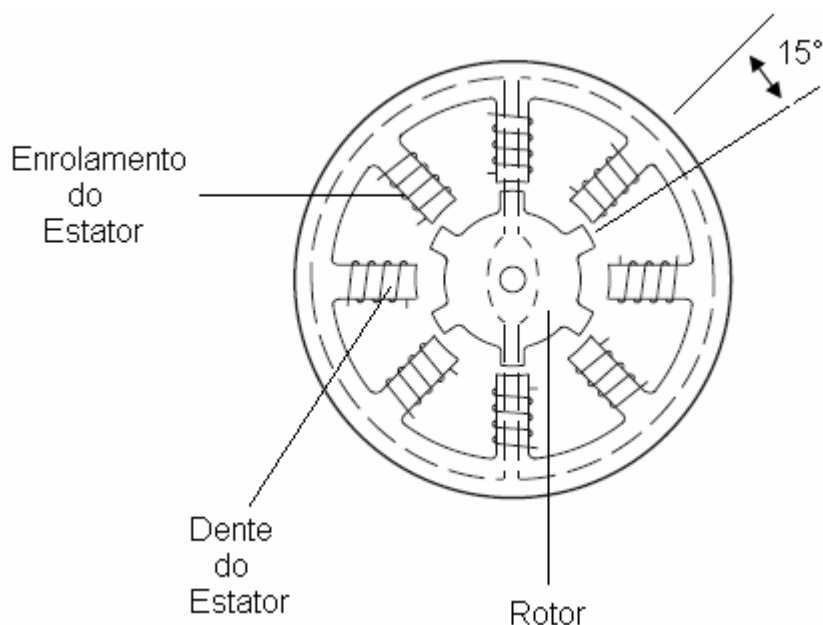


Figura 2.1 – Vista de seção transversal de um motor de passo V.R. (4).

Os motores V.R. não possuem magnetização permanente, portanto o rotor gira livremente sem torque de retenção³. A saída de torque para uma dada dimensão da estrutura é restrita, embora a taxa de torque por inércia seja boa. Assim esses motores geralmente são de dimensões reduzidas e são poucos utilizados em aplicações industriais. Outra consequência da não magnetização própria é o fato de eles não serem sensíveis à polaridade da corrente o que resulta na necessidade de um arranjo de *driver*⁴ diferente dos outros tipos de motor.

2.1.1.2 Motores de Imã Permanente

Este tipo de motor (do inglês, P.M. – *Permanente Magnet*) possui o rotor constituído de um material permanentemente magnetizado radialmente (Figura 2.2). Seu funcionamento é baseado na reação entre o campo magnético fixo do rotor e o campo gerado no enrolamento do estator. A Figura 2.3 ilustra um típico motor P.M (3).

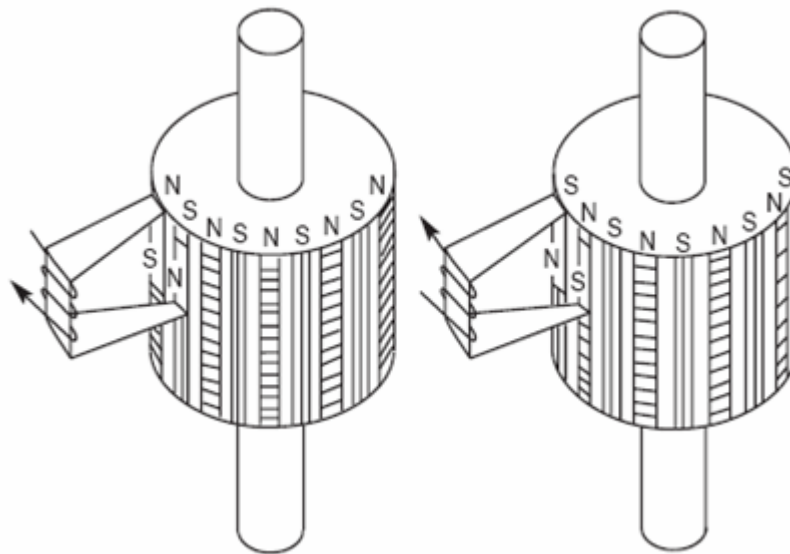


Figura 2.2 – Rotor de um motor de passo P.M. (5).

³ O máximo torque que pode ser aplicado a um motor de passo não energizado sem causar o seu movimento.

⁴ Termo em inglês usado comumente para designar um circuito que alimenta as fases de um motor de passo.

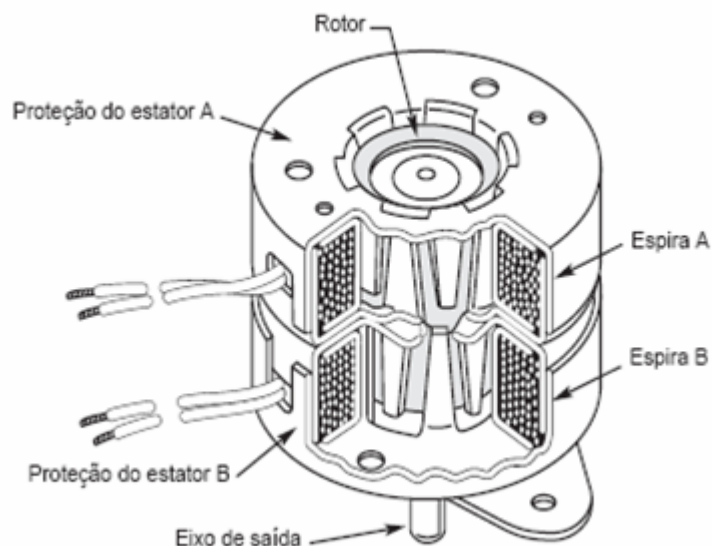


Figura 2.3 – Vista em corte de um motor de passo P.M. (5).

Uma importante característica deste tipo de motor é que ele pode manter o torque estático (do inglês, *Holding Torque*)⁵ indefinidamente quando o rotor está parado. Quando as bobinas não estão alimentadas, uma pequena força magnética é desenvolvida entre o rotor permanentemente imantado e o estator, caracterizando a presença de um torque residual ou de retenção, ao contrário do motor V.R..

Quando se alimenta os enrolamentos do estator, o rotor tende a superar o torque residual alinhando-se com o campo do estator. Excitando as bobinas em uma sequência desejada é possível o controle da direção e velocidade. O número de dentes do estator e do rotor determina o ângulo de passo que ocorrerá a cada vez que a polaridade da bobina é mudada. Quanto maior o número de dentes menor este ângulo.

Os motores de ímã permanente são dispositivos essencialmente de baixo custo, baixo torque e baixa velocidade, ideal para aplicações em campos como periféricos de informática.

2.1.1.3 Motores Híbridos

⁵ Quantidade de torque externo requerida para mover um passo do rotor com o estator energizado e o motor parado.

Os motores de passo híbridos (Figura 2.4) são, de longe, o tipo mais utilizado em aplicações industriais. A propósito, este é o tipo utilizado para o desenvolvimento deste projeto. O termo híbrido é proveniente do fato de que o motor combina os princípios operacionais dos outros dois tipos de motores apresentados anteriormente (V.R. e P.M.), a fim de se ter um motor de tamanho reduzido apresentando ângulo de passo pequeno e alto torque.

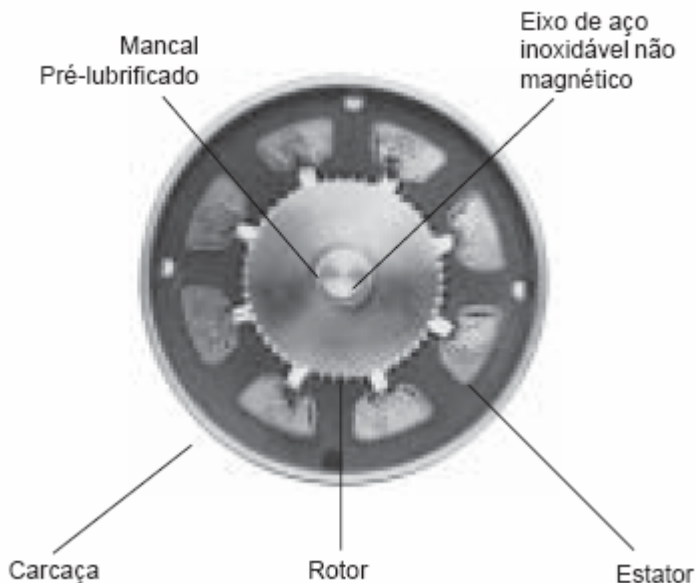


Figura 2.4 – Vista de seção transversal de um motor de passo híbrido (5).

A estrutura do núcleo do estator de um motor híbrido é essencialmente a mesma que a de um motor V.R. A principal diferença é que no motor V.R., somente uma das duas bobinas de uma fase é enrolada em um pólo, enquanto um típico motor híbrido possui as bobinas de duas fases diferentes no mesmo pólo. Estas duas bobinas no mesmo pólo são enroladas em uma configuração conhecida como conexão bifilar⁶ (2).

A característica importante deste motor é a estrutura de seu rotor que consiste de duas peças de pólo multi-dentadas. Entre estas peças de pólo há um ímã permanente magnetizado em paralelo com o eixo do rotor, tornando uma ponta um pólo norte e a outra um pólo sul. Os dentes são defasados nas extremidades norte e sul conforme mostrado na Figura 2.5.

⁶ Dois enrolamentos isolados e justapostos.

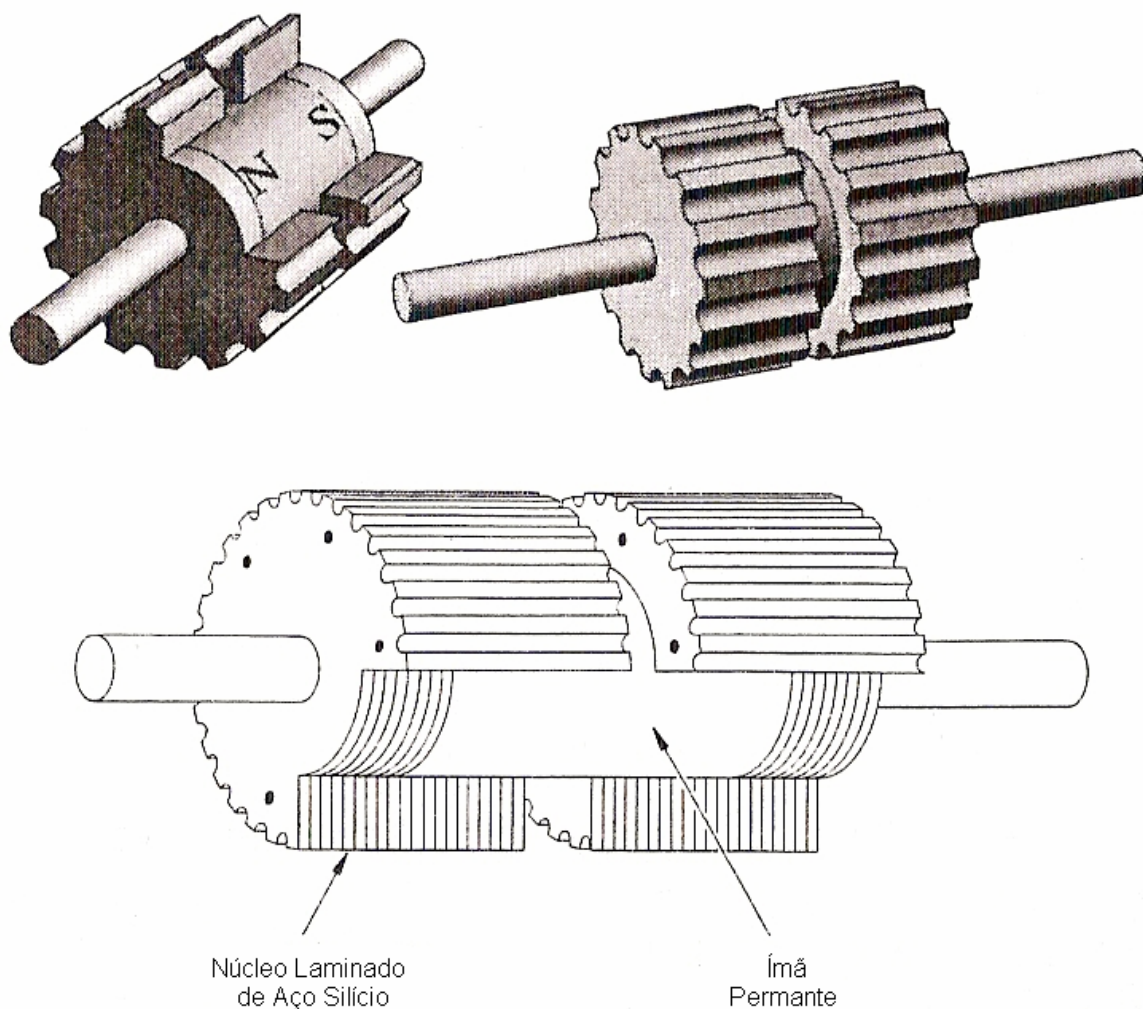


Figura 2.5 – Estrutura do rotor de um motor de passo híbrido (2).

Os dentes do rotor são de tal forma que permitem facilitar o fluxo magnético nas regiões de entreferro. Com isto, estes motores apresentam boas características de torque e velocidade quando comparado com os outros tipos de motores de passo, embora apresentem um custo maior.

2.1.2 Modos de Operação dos Enrolamentos

Do ponto de vista da alimentação dos enrolamentos de um motor de passo há dois modos possíveis: alimentação unipolar e alimentação bipolar, que são discutidos a seguir.

2.1.2.1 Alimentação Unipolar

Os motores de passo unipolares são facilmente reconhecidos pela derivação ao centro em cada um dos enrolamentos. O número de fases é o dobro do número de bobinas, uma vez que cada bobina se encontra dividida em duas. Na Figura 2.6 é representado um motor de passo unipolar de 4 fases.

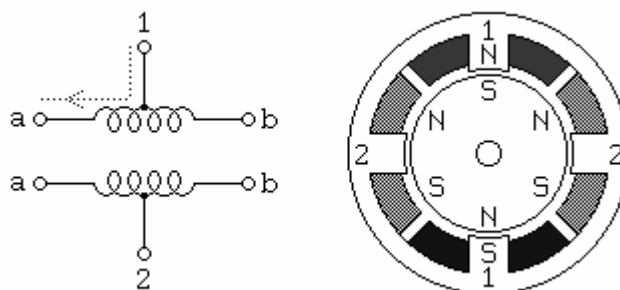


Figura 2.6 – Motor de passo unipolar (6).

Normalmente, a derivação central dos enrolamentos está ligada ao terminal positivo da fonte de alimentação e os extremos de cada enrolamento são ligados alternadamente à conexão de terra do circuito de modo a inverter a direção do campo gerado por cada um dos enrolamentos.

Este tipo de acionamento é utilizado normalmente em motores de relutância variável, pois a direção da corrente nas fases não é importante com relação ao conjugado.

A vantagem da alimentação unipolar é a utilização de um circuito de chaveamento simplificado (Figura 2.7), tornando fácil sua implementação com dispositivos discretos. Em contrapartida, apresenta como desvantagem o fato de requerer enrolamento bifilar duplo. Isto significa que para determinados enrolamentos a espira pode ser fina e a resistência alta. Por esta razão, para os motores híbridos, este tipo de alimentação é empregado geralmente em motores menores, onde as perdas de energia tornam-se menos críticas (4).

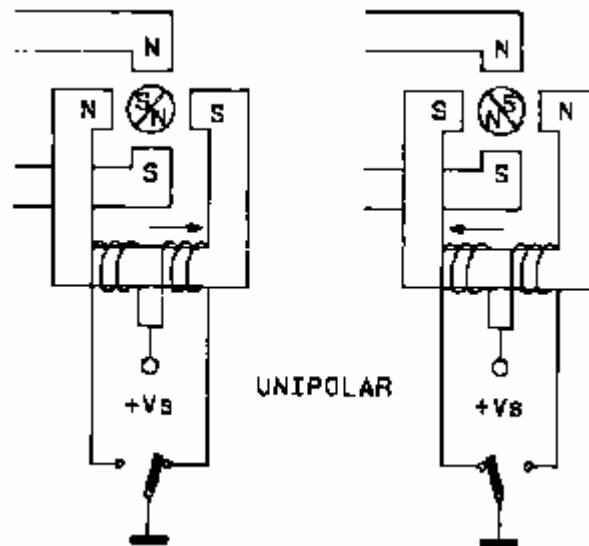


Figura 2.7 – Esquema de chaveamento tipo unipolar (7).

2.1.2.2 Alimentação Bipolar

A maior desvantagem do acionamento unipolar é sua incapacidade de utilizar todas as bobinas do motor. Sempre haverá fluxo de corrente em somente metade de cada enrolamento. Se ambas as partes puderem ser utilizadas, deduz-se que ocorrerá um aumento da corrente por volta da bobina para a mesma dissipação de energia no motor, acarretando uma elevação do conjugado produzido. Ao tipo de alimentação que permite tal feito dá-se o nome de bipolar. O termo advém do fato de que a corrente que flui através do enrolamento pode ser revertida por alternar a polaridade de seus terminais.

Os motores bipolares, esquematizados na Figura 2.8, são constituídos por dois enrolamentos separados que devem ser alimentados em ambas as direções para permitir o avanço de um passo. Para que isto seja possível, o controlador para esses motores deve ser capaz de reverter a polaridade da tensão na bobina e de forma seqüencial. Este mecanismo pode ser executado por um circuito denominado de ponte H, visualizado na Figura 2.9. Neste circuito, a reversão da corrente através da bobina se dá pelo fechamento e abertura das chaves (transistores) de forma apropriada. Para acionar as duas bobinas do motor de passo bipolar, dois destes circuitos se fazem necessários.

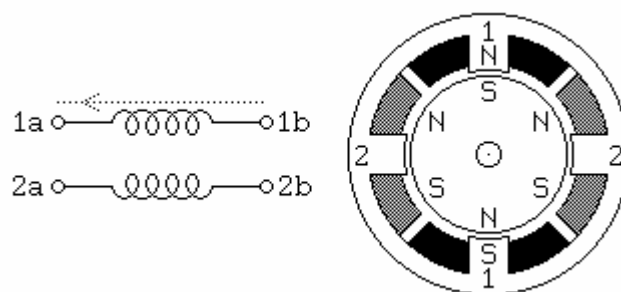


Figura 2.8 – Motor de passo bipolar (6).

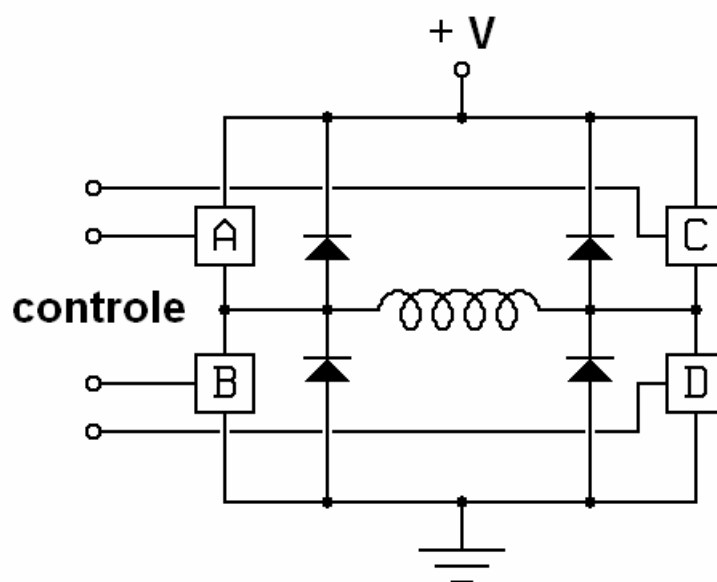


Figura 2.9 – Esquema de uma ponte H (8).

Como se pode concluir, os motores bipolares requerem um circuito de atuação bem mais complexo em comparação com os unipolares. Entretanto, com o advento de *drivers* integrados com custo acessível e o fato de que o acionamento bipolar proporciona maior eficiência de torque (Figura 2.10), faz com que esta categoria de motor seja bastante difundida atualmente. Para o projeto do controlador, o motor utilizado é um bipolar.

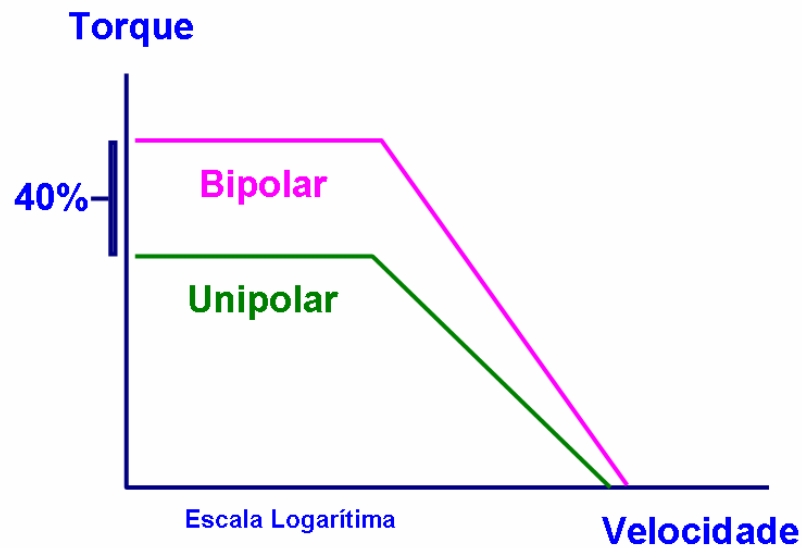


Figura 2.10 – Curva de torque versus velocidade para motor unipolar e bipolar (7).

2.1.3 Modos de Acionamento

Independente do tipo de alimentação ser unipolar ou bipolar, os enrolamentos do motor de passo podem ser acionados segundo quatro modos: passo completo de única excitação de fase (do inglês, *single-phase excitation full-step*), passo completo com excitação dual (do inglês, *two phase excitation full-step*), meio passo (do inglês, *half-step*) e micropasso (do inglês, *micro-step*).

2.1.3.1 Passo Completo de Única Excitação de Fase

Neste modo de funcionamento o motor é operado com uma só fase energizada de cada vez, de modo que a posição de equilíbrio das fases coincida com a posição de equilíbrio dos ímãs. Aplicando de forma seqüencial, uma tensão de alimentação nas fases de acordo com A+ (bobina 1), B+ (bobina 2), A- (bobina 3), B- (bobina 4), A+..., o rotor gira passo a passo, como pode ser observado no esquema da Figura 2.11. Observa-se que para esta seqüência, o motor gira em sentido anti-horário. Assim, para reversão de sentido, basta inverter a seqüência (4).

No diagrama da Figura 2.11, “ON” e “OFF” correspondem aos motores unipolares, indicando atuação ou não da bobina, enquanto que “+” ou “-” referem-se aos motores bipolares, indicando a polaridade da bobina.

Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Posição do Eixo
ON / +	OFF / -	OFF / -	OFF / -	
OFF / -	ON / +	OFF / -	OFF / -	
OFF / -	OFF / -	ON / +	OFF / -	
OFF / -	OFF / -	OFF / -	ON / +	

Figura 2.11 – Seqüência para modo passo completo de única excitação de fase (9).

Este modo de acionamento é o que proporciona menor consumo de energia entre todos. Entretanto, a desvantagem disto é que somente 25% (motores unipolares) e 50% (motores bipolares) do total de enrolamentos são usados em um dado tempo, o que significa menor produção de torque. Outro ponto negativo é a possibilidade do motor apresentar problemas com ressonância em baixas velocidades.

2.1.3.2 Passo Completo Com Excitação Dual

Neste modo, duas fases são alimentadas por vez. A seqüência de excitação é dada por A+B+, A-B+, A-B-, A+B-, A+B+... . O tamanho do deslocamento de passo é o mesmo que no modo anterior mas a posição mecânica não é a mesma. Esta posição é deslocada de metade

de um passo completo, conforme pode ser visto na Figura 2.12. As mesmas observações com relação ao sentido e o fato do motor ser unipolar ou polar, descritas anteriormente, valem aqui e para as demais seqüências (2).

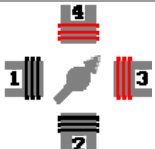
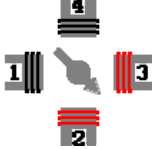
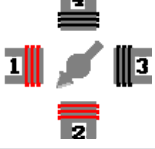

Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Posição do Eixo
ON / +	ON / +	OFF / -	OFF / -	
OFF / -	ON / +	ON / +	OFF / -	
OFF / -	OFF / -	ON / +	ON / +	
ON / +	OFF / -	OFF / -	ON / +	

Figura 2.12 – Seqüência para modo passo completo com excitação dual (9).

Este modo proporciona bom torque e velocidade com poucos problemas de ressonância. Provê aproximadamente 30 a 40% mais torque que a excitação única, mas em compensação requer o dobro de potência da fonte (10).

2.1.3.3 Meio Passo

É obtido combinando-se os dois modos anteriores operando de forma alternada, que resulta em passos com a metade do tamanho de um passo normal (passo completo). A resolução de passo do motor dobra, mas o torque não é uniforme para cada passo. Isto acontece porque se está operando alternadamente com os modos de excitação única e dual e como o torque produzido por ambos é diferente um do outro, acaba resultando em um torque

variável. Para este modo, a seqüência de excitação (Figura 2.13) que agora são oito pode ser descrita por A+B+, B+, B+A-, A-, A-B-, B-, A+B-, A+, A+B+... .

Bobina 4	Bobina 3	Bobina 2	Bobina 1	Posição do Eixo
ON / +	OFF / -	OFF / -	OFF / -	
ON / +	ON / +	OFF / -	OFF / -	
OFF / -	ON / +	OFF / -	OFF / -	
OFF / -	ON / +	ON / +	OFF / -	
OFF / -	OFF / -	ON / +	OFF / -	
OFF / -	OFF / -	ON / +	ON / +	
OFF / -	OFF / -	OFF / -	ON / +	
ON / +	OFF / -	OFF / -	ON / +	

Figura 2.13 – Seqüência para modo meio passo (9).

O uso deste modo tem se tornado predominante pois a redução do fenômeno de ressonância trazida por este é bastante sensível.

2.1.3.4 Micropasso

Como visto anteriormente, energizar as duas fases de um motor de passo com correntes iguais produz uma posição de passo intermediária a meio caminho entre as posições em que há uma fase única ligada, estabelecendo um deslocamento de meio passo. Caso as correntes nas duas fases sejam desiguais, há de se concluir que a posição do rotor deslocar-se-á em direção ao pólo mais forte. Este efeito é empregado no acionamento de micro-passo, que subdivide o passo básico do motor estabelecendo uma escala proporcional da corrente nas duas espiras (Figura 2.14). Desta forma, o tamanho do passo é diminuído e a suavidade do movimento em baixas velocidades é sensivelmente melhorada (5).

Trata-se de uma tecnologia um tanto recente e que requer cuidados no projeto. Um micropasso preciso aumenta a exigência de precisão no controle da corrente no motor, particularmente com baixos níveis de corrente. Um pequeno desequilíbrio de fase, que pode ser até difícil de detectar num motor de meio passo, pode produzir erros de posicionamento inaceitáveis num sistema de micropasso.

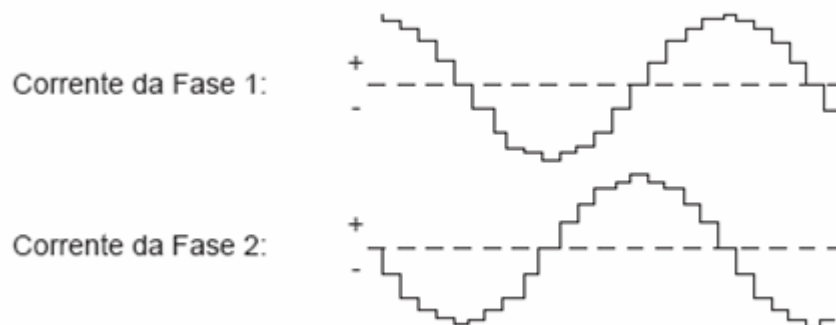


Figura 2.14 – Correntes de fase no modo micropasso (5).

2.2 SISTEMAS DE ACIONAMENTO DE MOTORES DE PASSO

Um dos problemas centrais em aplicações envolvendo motores de passo é o sistema de acionamento do motor. Os sistemas de acionamento de motores de passo podem ser classificados em dois tipos: sistema de malha aberta (do inglês, *open-loop*) e sistema de malha fechada (do inglês, *closed-loop*). Cada um tem suas próprias peculiaridades, apresentando vantagens e desvantagens. Nos dois subitens subseqüentes são discutidos estes dois métodos.

2.2.1 Acionamento em Malha aberta

Uma particularidade do motor de passo é o fato do mesmo não poder ser acionado diretamente a partir de uma fonte de tensão, diferentemente de outros tipos de motores. Além disso, os motores de passo podem ser aplicados em controles de posicionamento e velocidade sem a necessidade de sistemas de realimentação, absolutamente imprescindíveis nestes outros tipos e geralmente de custos elevados. Este método de acionamento que não faz uso de realimentação é referido como acionamento em malha aberta (Figura 2.15). A operação em malha aberta se caracteriza por utilizar a propriedade básica dos motores de passo de que seu movimento discreto é síncrono com a frequência aplicada em suas fases (2).

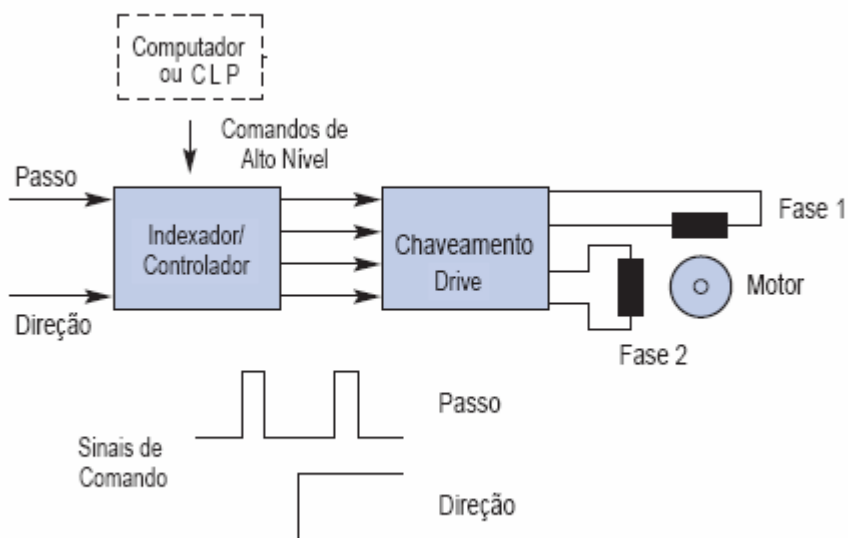


Figura 2.15 – Diagrama de blocos de acionamento em malha aberta para motores de passo.

Como se pode observar pelo diagrama anterior, um sistema de controle em malha aberta para motores de passo consiste basicamente de três elementos básicos, frequentemente combinado com algum tipo de interface de usuário tais como um computador, um controlador lógico programável (CLP, do inglês, PLC – *Programmable Logic Controller*) ou um terminal remoto qualquer:

- Indexador ou controlador: promove o papel de pivô do sistema. Recebe os sinais de comando simples (passo e direção) ou de alto nível e os converte em uma seqüência lógica de pulsos de forma a excitar adequadamente as fases do motor de passo;
- Drive (ou *driver*): trata-se de um amplificador eletrônico de potência que fornece a energia necessária para a operação do motor em resposta aos sinais de controle de baixa potência gerados pelo indexador;
- E o próprio motor de passo que de acordo com a variação do campo eletromagnético gerado pelos sinais pulsados (corrente) aplicados em seus terminais, promove a rotação de seu eixo.

Este tipo de sistema de acionamento torna-se economicamente vantajoso pelo fato da não utilização de circuitos e sensores presentes em sistemas de realimentação. Por este motivo, os motores de passo ganharam grande aceitação no mercado (mais de 80% dos controladores de motor de passo, atualmente, trabalham em malha aberta). Entretanto a performance do motor sob esta forma tradicional de acionamento possui suas próprias limitações. Por exemplo, um motor de passo operando desta forma pode falhar em seguir um pulso de comando quando a frequência deste pulso é alta ou a condição de carga é elevada. Isto caracteriza um erro de posicionamento que não pode ser corrigido automaticamente pelo sistema, algo que é peculiar aos sistemas de malha aberta.

Para que o motor de passo possa operar em malha aberta, reduzindo os inconvenientes citados acima, é necessário que algumas precauções sejam tomadas: as características de carga devem ser restringidas para prevenir solicitações em excesso do motor; a velocidade máxima do motor deve ser restringida pelo controle a um valor máximo; as taxas de aceleração e desaceleração devem também ser restringidas. Assim torna-se necessário que o motor tenha uma margem de segurança para aplicações em carga variável.

2.2.2 Acionamento em malha fechada

O acionamento de motores de passo em malha fechada oferece uma alternativa de controle com efetivo custo-benefício para aplicações que requerem maior confiabilidade, segurança ou garantia de qualidade. Um dispositivo de realimentação (Figura 2.16) que pode pertencer a uma das diversas categorias de sensores disponíveis, “fecha a malha” do sistema com a possibilidade de verificar/controlar perdas de passo, detectar falhas de rotação ou mesmo garantir a utilização plena das características um motor de passo, como o torque de saída, por exemplo (11).

Várias técnicas são disponíveis (12) para obter um controle de posicionamento, velocidade e/ou torque de motores de passo em malha fechada. Entre estas, três são as mais usuais:

- Verificação de passo: o mais simples entre os três, usa um *encoder* óptico para contar a quantidade de passos movidos pelo motor. Um circuito simples ou uma rotina de *software* qualquer compara a quantidade de passos executados com os que foram enviados ao motor. Caso haja diferença, o controlador se compromete a enviar os pulsos necessários ao motor para que o mesmo corrija seu posicionamento.
- Sensoriamento de força contra-eletromotriz: por meio de sensores, o sistema monitora e mede os sinais de força contra-eletromotriz geradas pelas bobinas do motor. Estes sinais são então convertidos em um sinal digital por um circuito comparador detector de passagem por zero⁷. O controlador recebe este sinal pulsado e calcula a relação entre este e os sinais induzidos nas fases do motor, ou seja, o controlador faz o correto ajuste de fase de modo a manter a velocidade do motor constante e o movimento livre de oscilações.
- Servo-passo: técnica baseada na utilização de ângulo de chaveamento. Utiliza um *encoder*, resolver ou outro dispositivo de realimentação qualquer, capaz de medir posição, para controlar mais precisamente a velocidade e o torque, em tempo real. Baseia-se na monitoração da posição de determinados pontos angulares do eixo do motor de modo que os pulsos de comando para as mudanças de passo ocorram exatamente nestas posições. O princípio de funcionamento do motor neste caso é semelhante ao de um motor síncrono

⁷ Ponto no qual um sinal de tensão ou corrente cruza o eixo de referência zero.

sem escovas, onde suas fases são automaticamente selecionadas por um sensor de posição, incorporado ao seu eixo interna ou externamente.

De acordo com a *Incremotion Associates*, uma empresa de consultoria especializada em controle de motores, estima-se que em torno de 10% dos motores de passo híbridos utilizam o método de verificação de passo, menos de 1% utilizam o método de sensoriamento de força contra-eletromotriz e cerca de 1% usam servo-passo (12).

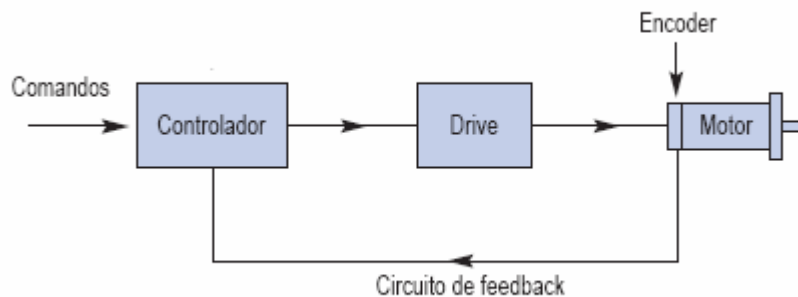


Figura 2.16 – Diagrama de blocos de acionamento em malha fechada para motores de passo.

Do ponto de vista estrutural, o sistema de acionamento de motores de passo em malha fechada é bem similar ao de malha aberta. A principal diferença encontra-se na adição do circuito ou dispositivo de realimentação.

2.2.2.1 Dispositivos de Realimentação - *Encoders*

Sensores de realimentação são componentes críticos em um sistema de controle de motores. Eles são usados para sentir a corrente, posição, velocidade e direção do motor com o objetivo de aumentar sua confiabilidade de operação.

Há uma série de sensores que podem ser usados para essa finalidade. Uma lista inclui: os sensores de corrente que podem ser do tipo resistor *shunt*, transformador de corrente e sensor de efeito Hall; sensores de posição/velocidade que incluem os *encoders*, resolvers e tacômetros; e os sensores de força contra-eletromotriz. Dentre estes, os *encoders* são um dos mais utilizados e por este motivo é feita uma breve descrição do mesmo a seguir.

Os *encoders* ópticos são um tipo de transdutor que converte um movimento angular ou linear em uma série de pulsos elétricos. São muito utilizados em automação industrial e mecatrônica por permitirem medição de velocidade, posição, taxa de aceleração, distância e direção em sistemas rotacionais (13).

Quando acoplado a motores, os dados provenientes deste sensor podem ser usados para se efetuar o controle do mesmo, permitindo que determinadas posições ou velocidades sejam atingidas e em caso de erro, a possibilidade de correção é possível. No caso de controle de motores de passo, o uso de um *encoder* proporciona a verificação da quantidade de passos executados, garantindo a precisão do movimento.

O sistema de leitura dos *encoders* geralmente é baseado em um disco rotativo (*encoders* rotativos são os mais comuns, embora existam os lineares) formado por pequenas janelas radiais as quais são iluminadas por um emissor óptico (geralmente luz infravermelha) em um dos lados do disco, enquanto que do outro existe um receptor que ao receber luz converte-a em pulso elétrico (Figura 2.17).

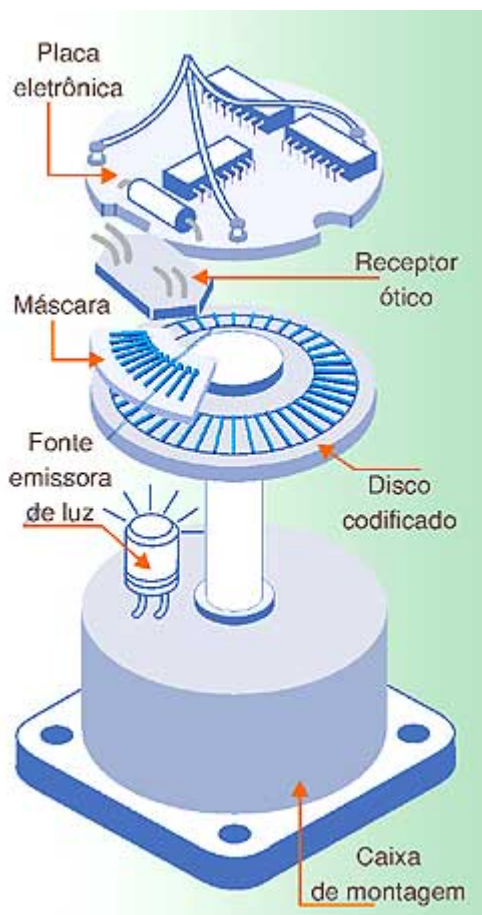


Figura 2.17 – Princípio de funcionamento de um encoder rotativo (13).

Há dois tipos fundamentais de *encoders*: o absoluto (Figura 2.18) e o incremental (Figura 2.19). No disco do *encoder* absoluto as janelas são dispostas de tal forma que é possível uma codificação que pode ser do tipo *gray* (mais empregado) ou binário, a qual sempre fornece a posição em que o eixo se encontra em um determinado momento e a direção pelo incremento ou decremento desta seqüência codificada.

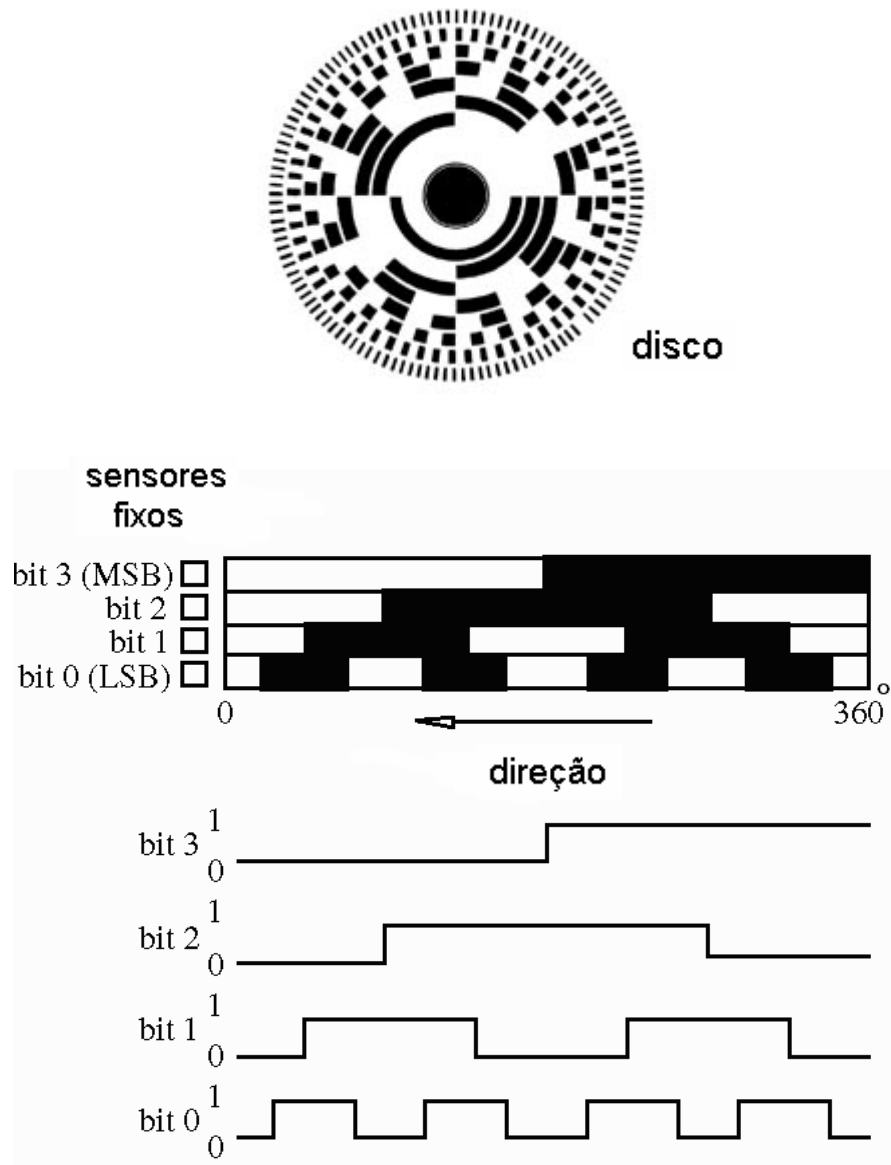


Figura 2.18 – Encoder absoluto com código gray de 4 bits (14).

Os *encoders* incrementais possuem ranhuras em seu disco as quais são igualmente espaçadas entre si. Desta forma este tipo de sensor pode fornecer apenas a noção de

incremento e decremento da posição. Fornecem geralmente como saída dois sinais pulsados defasados de 90° (sinais em quadratura) denominados de Fase (canal) A e Fase (canal) B e mais um pulso chamado de Índice (ou pulso de marca) que é gerado uma única vez a cada rotação completa do eixo do *encoder*.

Para que as características do movimento possam ser conhecidas é necessário que estes sinais sejam decodificados. A leitura de somente um dos canais (A ou B) fornece a velocidade de rotação, enquanto que a leitura dos dois canais define a direção do movimento. Com o terceiro sinal é possível obter uma referência para o cálculo da posição.

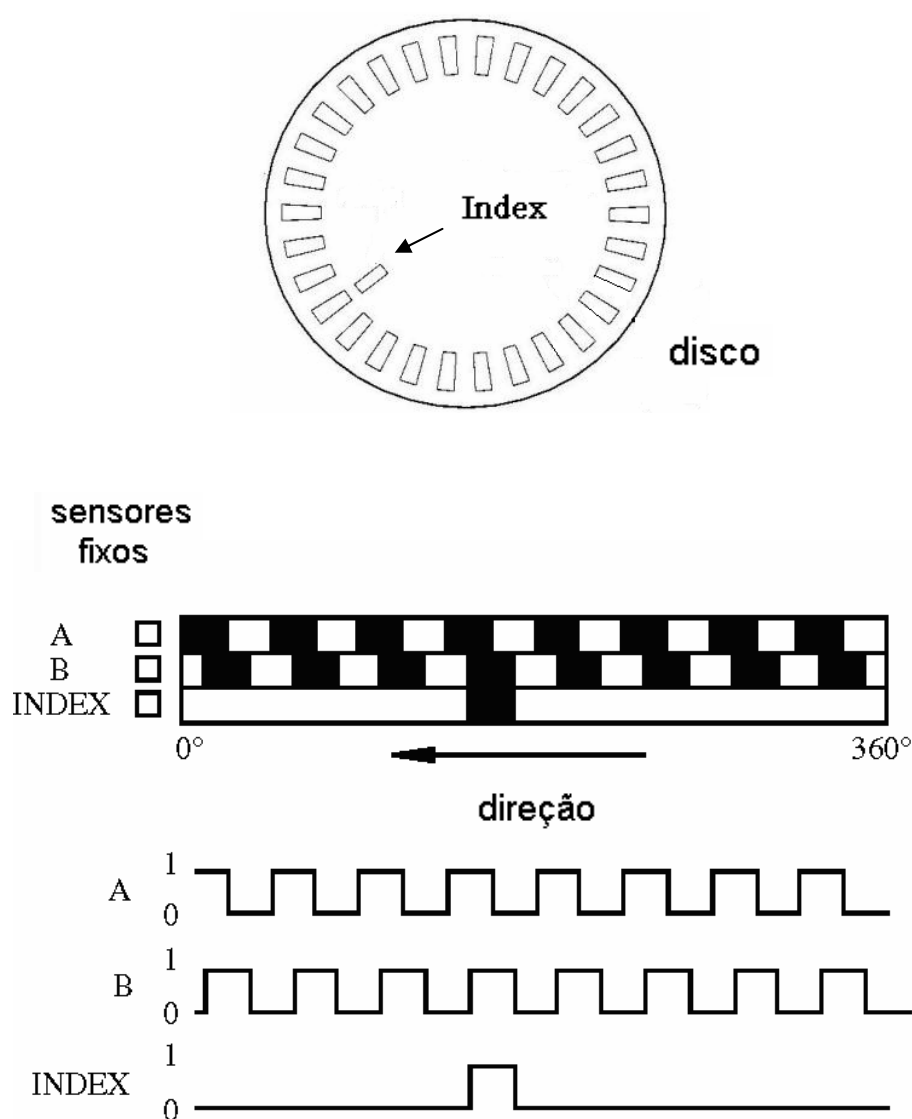


Figura 2.19 – Encoder incremental (14).

2.3 CONTROLE DE CORRENTE

Quando uma fase do motor de passo é excitada, a tensão que a alimenta deve superar o efeito indutivo da bobina (a indutância do enrolamento tem a tendência de se opor à mudança na taxa de subida da corrente) para que a corrente possa atingir o valor de regime. Com o aumento da frequência de chaveamento da tensão na fase (aumento da velocidade do motor) o tempo de resposta da corrente torna-se maior (taxa de subida menor) fazendo com que a corrente não consiga mais alcançar o valor de regime em cada passo (Figura 2.20), resultando em uma diminuição do torque (2).

A taxa de subida da corrente pode ser aumentada pelo aumento da tensão aplicada, melhorando a performance de trabalho do motor. Por outro lado a resistência da carga deve ser mantida a menor possível a fim de se diminuir as perdas por efeito *joule*. Considerando estes dois fatores e lembrando-se da Lei de Ohm, pode-se prever o comportamento elevatório da corrente. Por consequência deve-se dispor de um sistema que mantenha a corrente na bobina limitada em regime permanente a fim de se manter a integridade do enrolamento do motor.

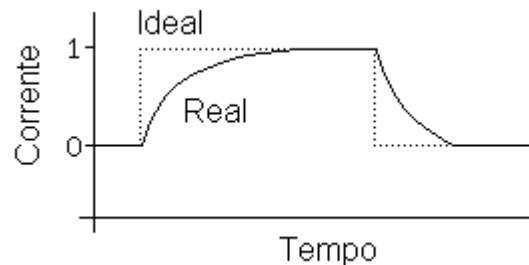


Figura 2.20 – Gráfico da taxa de subida da corrente: ideal e real (15).

Há diversas formas de se realizar este controle, resumidas na Figura 2.23. Em baixas velocidades a simples aplicação de uma tensão direta no motor (L/R) de modo que a própria resistência interna do enrolamento limite a corrente para o nível permitido, pode ser suficiente. Entretanto com o aumento da velocidade há uma significativa queda do torque devido às razões mencionadas no parágrafo anterior. Uma solução seria elevar a tensão e usar um resistor em série com a bobina do motor (L/nR) de modo que a soma destas duas resistências limitassem a corrente. Porém, tal topologia acarreta em perdas excessivas pela dissipação de energia no

resistor externo. A Figura 2.21 apresenta um esquema destas topologias, também conhecidas como motor R-L (5).

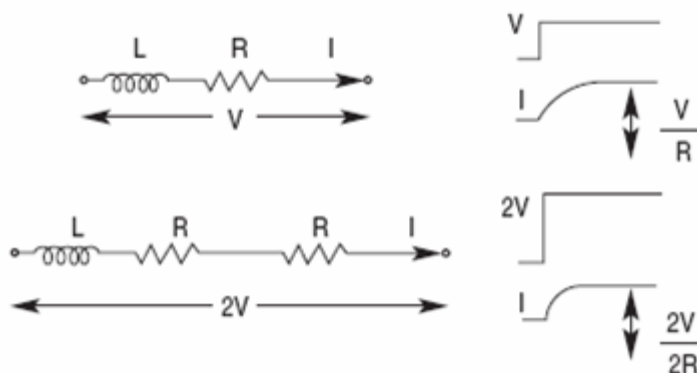


Figura 2.21 – Princípio do motor R-L (5).

A topologia mais usual atualmente é a que faz uso de um circuito recortador de tensão ou “*chopper*” (Figura 2.22), que emprega técnica PWM (modulação por largura de pulso). Basicamente o que se faz é conectar/desconectar as bobinas da fonte de alimentação em períodos regulares de tempo, monitorando e controlando a corrente que as atravessam independentemente da velocidade que o motor esteja. Com isso tem-se uma maior eficiência do *driver*.

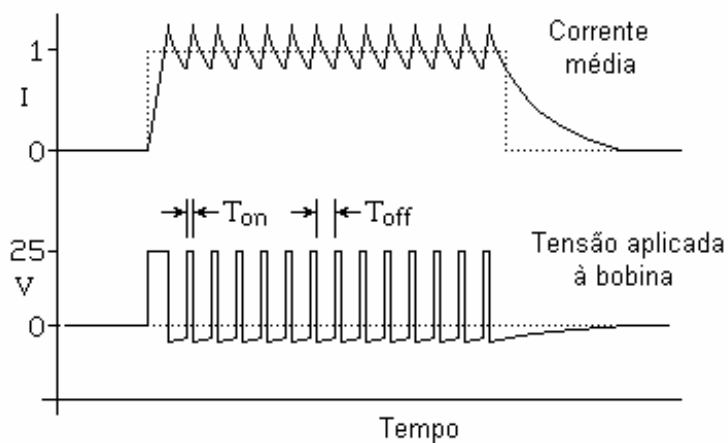


Figura 2.22 – *Drive chopper*: formas de onda de tensão e corrente (2).

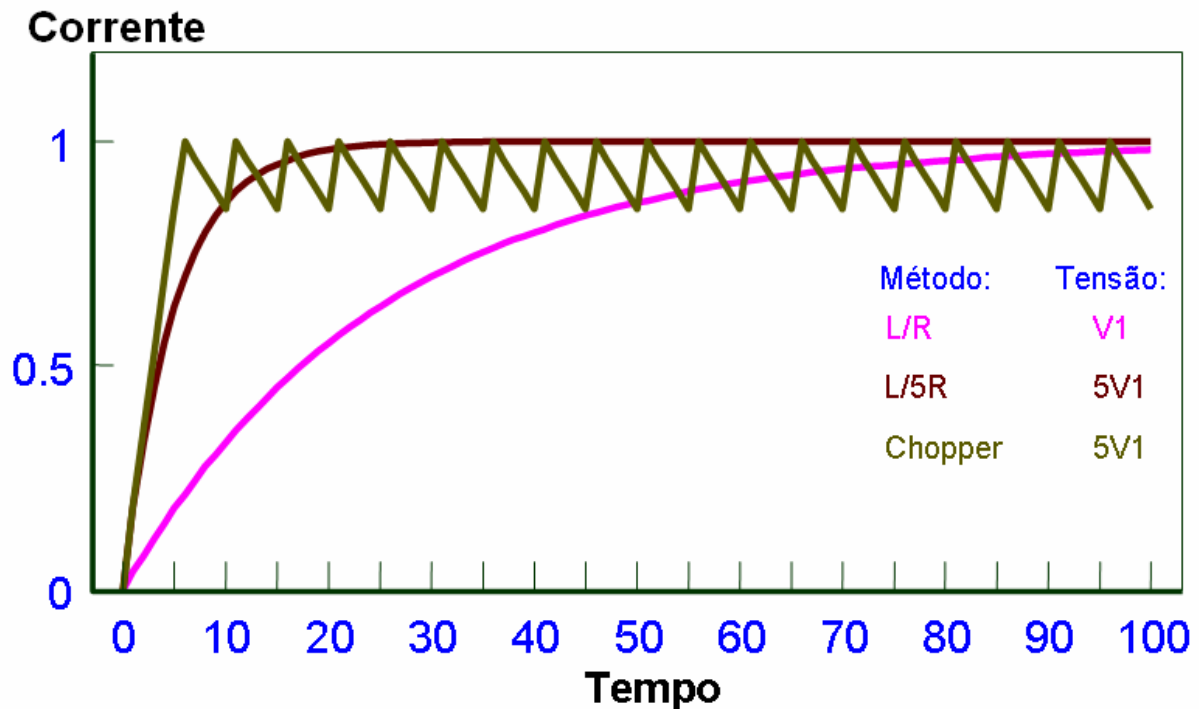


Figura 2.23 – Corrente no motor utilizando controle L/R, L/nR e chopper (7).

Este método é baseado na utilização de ponte de quatro transistores (ponte H) com diodos de recirculação e um resistor para cada fase do motor de passo. O resistor de baixo valor (tipicamente menor que 1 ohm) fornece tensão de resposta proporcional à corrente no motor.

A corrente é introduzida no enrolamento acionando um comutador superior e um inferior, e isso aplica a tensão total em todo o motor. A corrente aumentará de forma quase linear e poder-se-á monitorar essa corrente observando o resistor. Quando a tensão necessária tiver sido atingida, o comutador superior é desligado e a energia armazenada na bobina mantém a corrente circulando via comutador inferior e diodo. As perdas no sistema fazem com que essa decaia lentamente, e quando um limite mais baixo pré-determinado é atingido, o comutador superior é religado e o ciclo se repete. A corrente é, portanto, mantida no valor médio correto comutando ou “cortando (*chopping*)” o fornecimento para o motor.

Tal método de controle de corrente é muito eficiente porque muito pouca energia é dissipada nos transistores de comutação quando não estão em estado de comutação transiente. A energia obtida da fonte está intimamente relacionada à potência mecânica gerada pelo eixo (diferentemente do motor R-L, que extrai o máximo de energia da fonte quando parado).

A Figura 2.24 mostra o esquema de um drive chopper com recirculação de corrente.

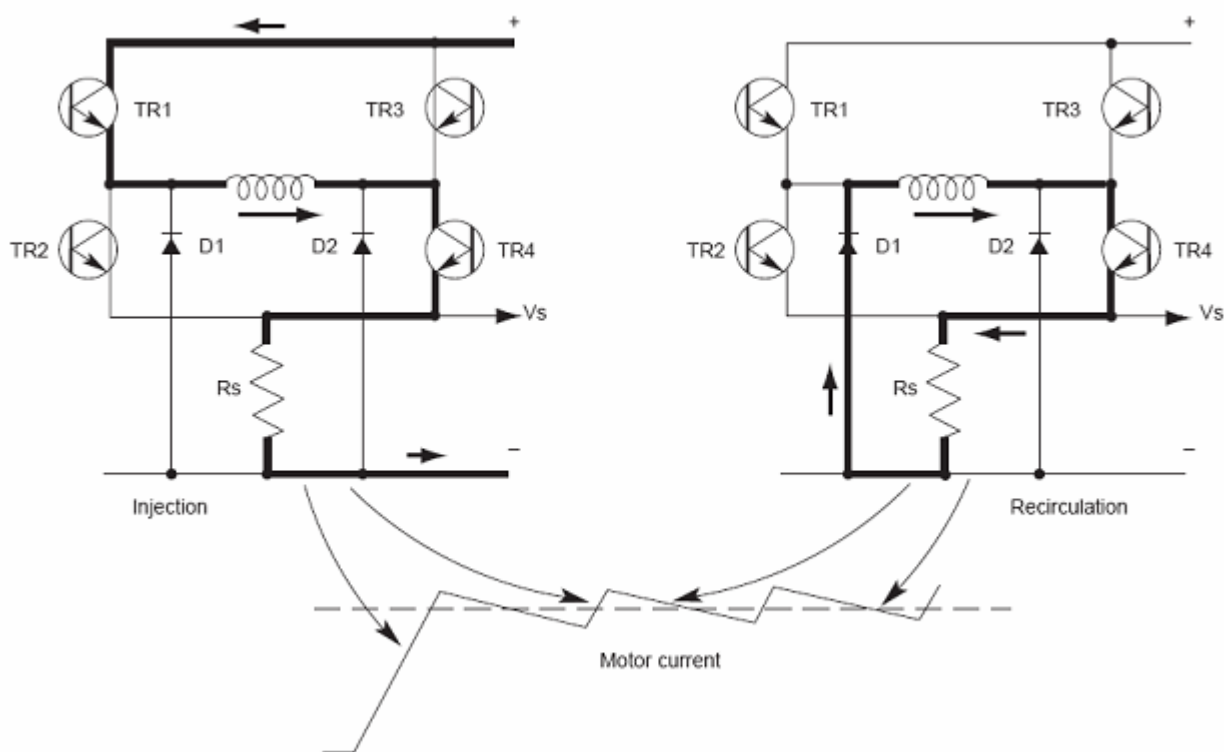


Figura 2.24 – Drive chopper com recirculação de corrente (5).

2.4 CONTROLADORES DIGITAIS DE SINAIS

Em virtude de suas características intrínsecas, os Microcontroladores (do inglês, MCU – *Micro Controller Unit*) e os Processadores Digitais de Sinais (do inglês, DSP – *Digital Signal Processing*) historicamente se ajustaram a diferentes categorias de aplicações. Enquanto os primeiros são utilizados em uma vasta gama de aplicações envolvendo o controle de dispositivos eletroeletrônicos, os últimos são mais empregados em processamento de imagens, áudio e no âmbito das telecomunicações (16).

Com o intuito de aproveitar-se das vantagens de cada um destes segmentos surgiram no mercado os chamados Controladores Digitais de Sinais (do inglês, DSC - *Digital Signal Controller*) cujo termo foi cunhado publicamente em 2002 pela empresa Microchip Technology. O DSC é um dispositivo que propõe integrar o poder de processamento algorítmico de um DSP

com a habilidade de controle em tempo real de um microcontrolador. Dessa forma a proposta destes controladores é absorver as principais características do mundo dos microcontroladores tais como o baixo custo e a variedade de periféricos internos, unindo com a arquitetura voltada para o processamento otimizado em tempo real do DSP, criando assim uma linha de dispositivos intermediária.

A tabela 2.1 compara alguns dos atributos dessas três categorias de dispositivos mencionados. Como se pode notar, os DSC's incorporam características dos MCU's e dos DSP's.

Tabela 2.1 – Atributos das tecnologias MCU, DSP e DSC (16).

Atributos	MCU's	DSP's	DSC's
Execução a partir de memória Flash interna			
Grande conjunto de registradores			
Performance em interrupções			
Quantidade de periféricos			
Operação MAC em um único ciclo			
Ciclo de busca com duplo operando			
Sem necessidade de código extra p/ organização do programa			
Eficiência em operações de arredondamento / ponto flutuante			
Modos de bit reverso			

Em termos de mercado, o alvo inicial dos DSC's foram as aplicações em controle de motores. O desejo de se obter velocidades mais altas, resposta mais rápida e precisa ou redução de custos de implementação de sistemas de controle de motores, está tornando o DSC uma opção viável para tal. De fato estes dispositivos agregam funcionalidades e recursos próprios para essa área de aplicações que tornam o trabalho do projetista mais fácil e os resultados melhores (17).

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 HARDWARE

O *hardware* do controlador de motor de passo foi concebido tendo em mente seis partes ou blocos, esquematizados na Figura 3.1. É realizada uma descrição de cada um desses elementos utilizados no projeto do controlador.

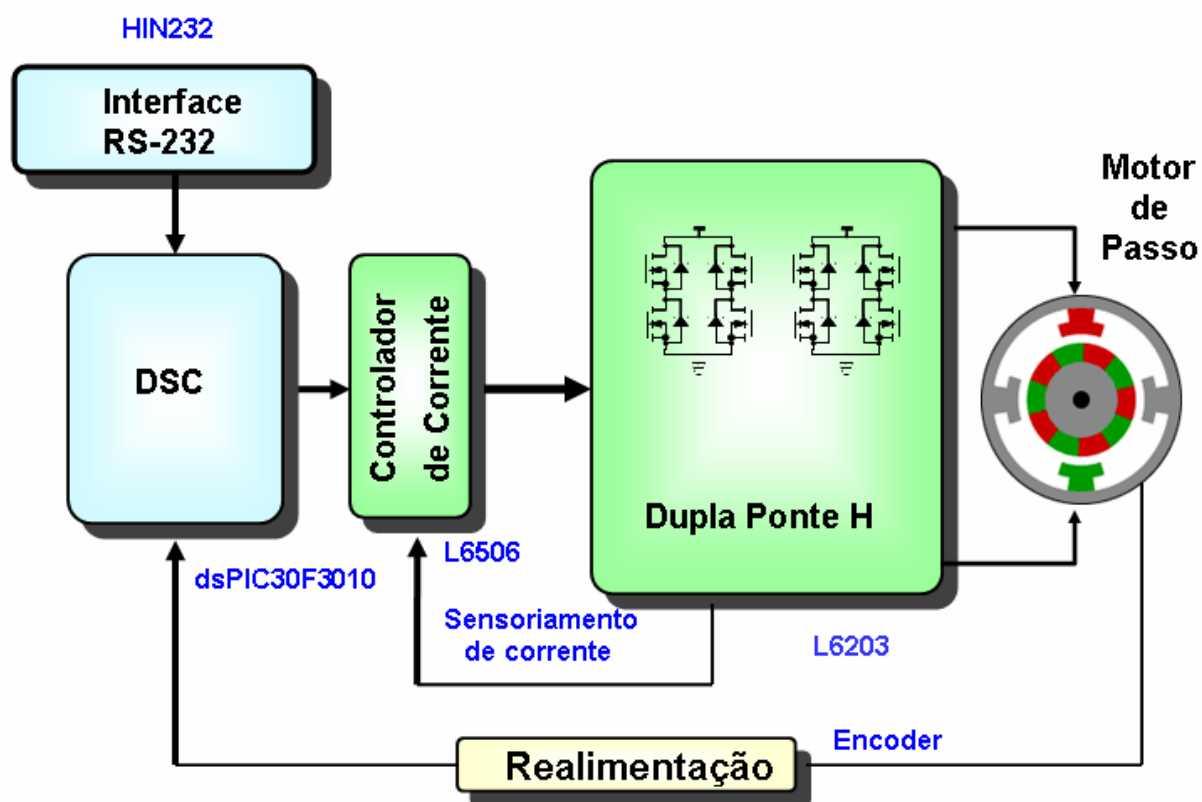


Figura 3.1 – Diagrama de blocos do controlador de motor de passo.

3.1.1 Controlador – dsPIC30F3010

O controlador de sinais digitais da Microchip, o dsPIC , consiste em um poderoso dispositivo de 16 bits com arquitetura Harvard modificada, incluindo um aprimorado conjunto de instruções que incorpora um amplo suporte para DSP oferecendo solução completa para

aplicações que envolvem o controle de motores, conversão de energia, sensores de alta velocidade, processamento de sinais de áudio e voz, conectividade e modems, telecomunicações, encriptação e sistemas embarcados (automotivos, por exemplo).

Os dsPICs podem alcançar velocidades de processamento de até 30MIPS (milhões de instruções por segundo), podendo operar a 120MHz (clock externo). Possuem memória *flash* interna de programa, EEPROM de dados, SRAM de dados, periféricos poderosos incluindo bibliotecas, além de poderem ser programados em linguagem C, permitindo ao projetista criar soluções embutidas com facilidade (18).

A primeira família destes dispositivos a entrar no mercado pelo referido fabricante recebeu a designação dsPIC30F. O objetivo era apresentar um componente que fosse bastante familiar aos usuários de microcontroladores da linha PIC e que os recursos de DSP tivessem uma assimilação mais fácil por parte dos novos usuários dessa tecnologia, tudo isso, obviamente, com um custo competitivo.

Dentro desta família existe uma série de componentes (Tabela 3.1) que incorporam recursos voltados à área de controle de motores e conversão de energia. Eles possuem como diferenciais os módulos PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) de seis ou oito saídas e os módulos para o tratamento de sinais provenientes de encoders incrementais. Este último torna estes componentes úteis para o projeto do controlador de motor de passo por malha fechada.

Outra vantagem desses dispositivos é o fato da temperatura máxima de operação ser em torno de 125°C, o que os tornam ideais para aplicações em ambientes extremos como os encontrados nas aplicações industriais.

Tabela 3.1 – Resumo dos periféricos de alguns componentes da família dsPIC30F voltados para o controle de motores e conversão de energia (17).

Device	Pins	Program Mem. Bytes/ Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	A/D 10-bit 1 Msps	Quad Enc	UART	SPI	I ² C™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	-
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	8 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F6010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

Dentre estes, para o projeto, optou-se por utilizar o dsPIC30F3010 (encapsulamento DIP – 28 pinos) por algumas razões: disponibilidade de compra, custo, espaço de memória de programa e barramento suficientes de acordo com os objetivos traçados.

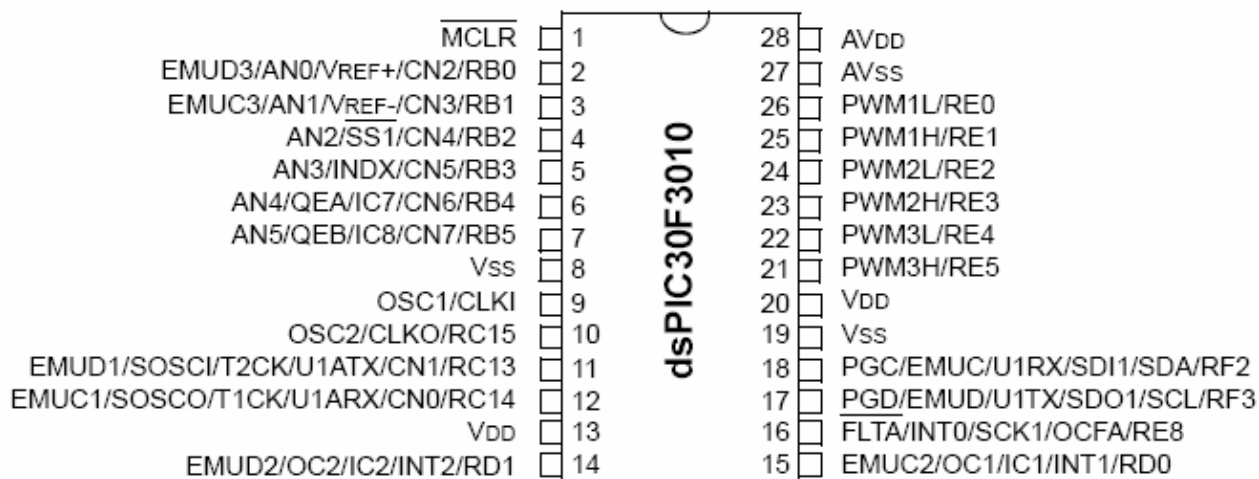


Figura 3.2 – Diagrama de pinos do dsPIC30F3010 (19).

Como mencionado acima no texto um dos periféricos mais atraentes nos dispositivos da família voltadas para controle de motores é o módulo de interface para *encoders* de quadratura. Por esta razão é mostrado com maiores detalhes esta interface em seguida.

3.1.1.1 Módulo de Aquisição de Sinais de *Encoders* Incrementais

Este módulo presente no dsPIC30F3010 (do inglês, QEI – *Quadrature Encoder Interface*) permite o tratamento de sinais provenientes de um *encoder* incremental de quadratura (Figura 3.3).

Basicamente esta interface consiste em um decodificador lógico de quadratura que tem a função de interpretar os sinais de fase A (pino QEA) e B (pino QEB), e o sinal de referência (pino INDEX) vindos do sensor.

O relacionamento dos sinais de fase é de tal forma que quando a Fase B está defasada em relação à Fase A, o movimento é denominado positivo ou horário. Por outro lado, se a Fase A está defasada em relação à Fase B, o movimento é negativo ou anti-horário. Estes sinais de quadratura produzidos pelo *encoder* possuem quatro estados ou seqüência correspondendo a

um ciclo de contagem cuja ordem determina o sentido de movimento. A Figura 3.4 demonstra esses três sinais.

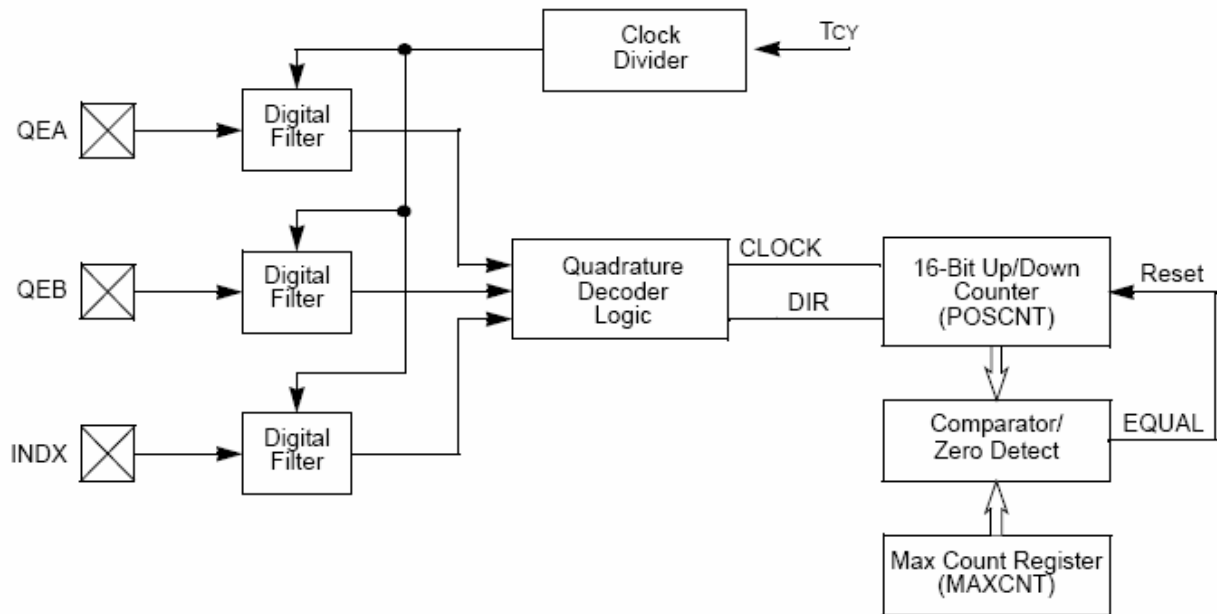


Figura 3.3 – Diagrama de blocos do módulo QE1 (19).

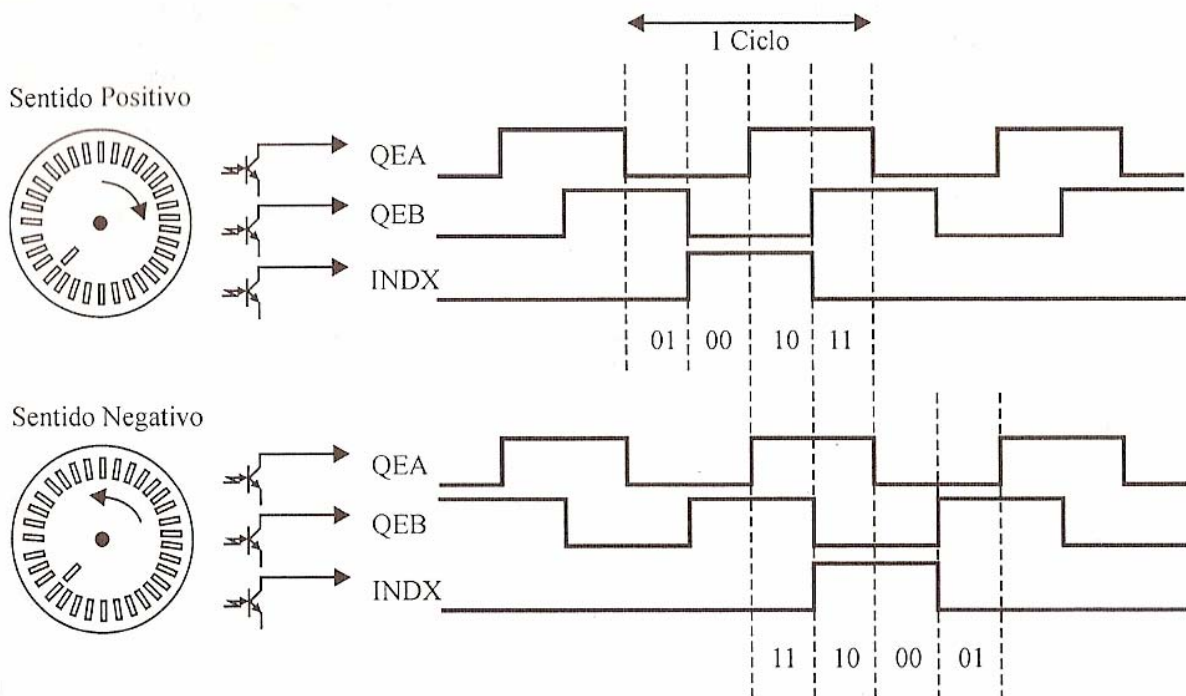


Figura 3.4 – Sinais do módulo QE1 (18).

O decodificador de quadratura utiliza os sinais capturados do *encoder* para manipular o contador interno de 16 bits (POSCNT) cuja resolução de contagem pode ser de dois modos: 2X e 4X. No primeiro, o decodificador utiliza apenas o sinal da fase A para incrementar ou decrementar o contador a cada subida e descida desse sinal. O sinal da fase B (QEB) serve unicamente para a determinação do sentido de movimento. A Figura 3.5 demonstra esse modo.

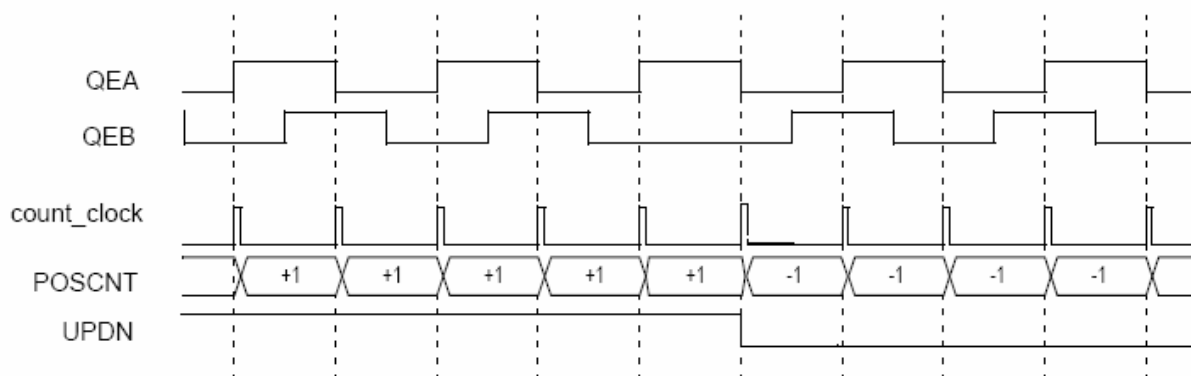


Figura 3.5 – Decodificador de quadratura modo 2X (19).

O segundo modo (4X), por outro lado, leva em consideração ambos os sinais de fase A e B. A cada subida e descida desses sinais ocorre o incremento ou decremento do contador. Assim, com esse modo, ilustrado na Figura 3.6, obtém-se uma melhor resolução.

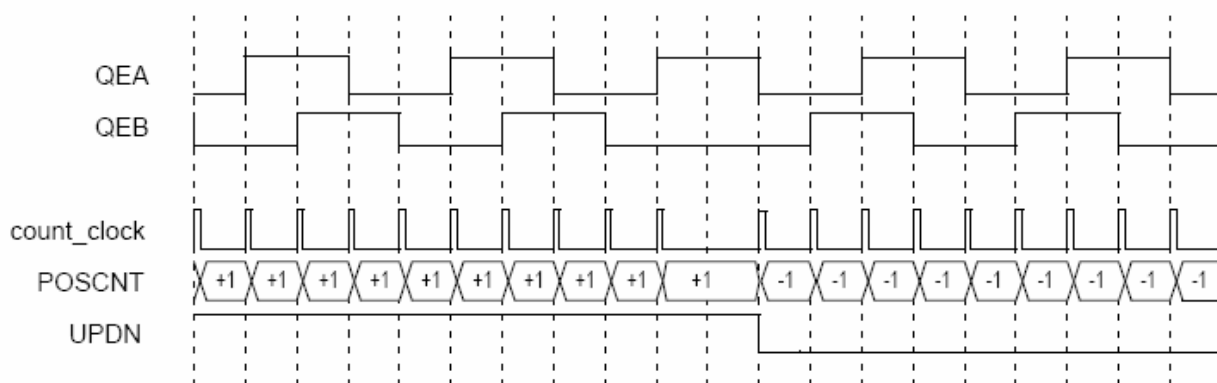


Figura 3.6 – Decodificador de quadratura modo 4X (19).

Pelos diagramas anteriores observa-se que quando o sinal de fase A precede o sinal de fase B o contador está contando em modo crescente. Ao reverter o sentido de rotação o sinal B

passa a preceder o sinal A ocasionando reversão na contagem. O sinal UPDN (*bit* de registro) é um sinalizador de incremento ou decremento do contador.

Os sinais de quadratura podem ser decodificados desde que um sinal de *clock* do contador seja gerado a cada borda de subida e descida do sinal de quadratura. Esta taxa de quadratura pode garantir medições de posição angular de até 4 vezes (modo 4X) a contagem do *encoder*. O módulo QEI do dsPIC30F3010 suporta frequências da ordem de um terço da sua frequência de sinal de *clock* externo (cristal). Como o cristal utilizado no projeto é de 20MHz, os sinais de fase A e B podem operar em uma frequência de até 6,67MHz, mais que suficiente para a faixa de frequência de operação do motor de passo (9).

Há duas formas de interrupção presentes no módulo QEI. Uma delas é gerada pela sinalização do INDEX, isto é, sempre que se completar uma volta do movimento do eixo tem-se uma interrupção. Esse evento, relacionado aos outros sinais, pode ser visualizado na Figura 3.7.

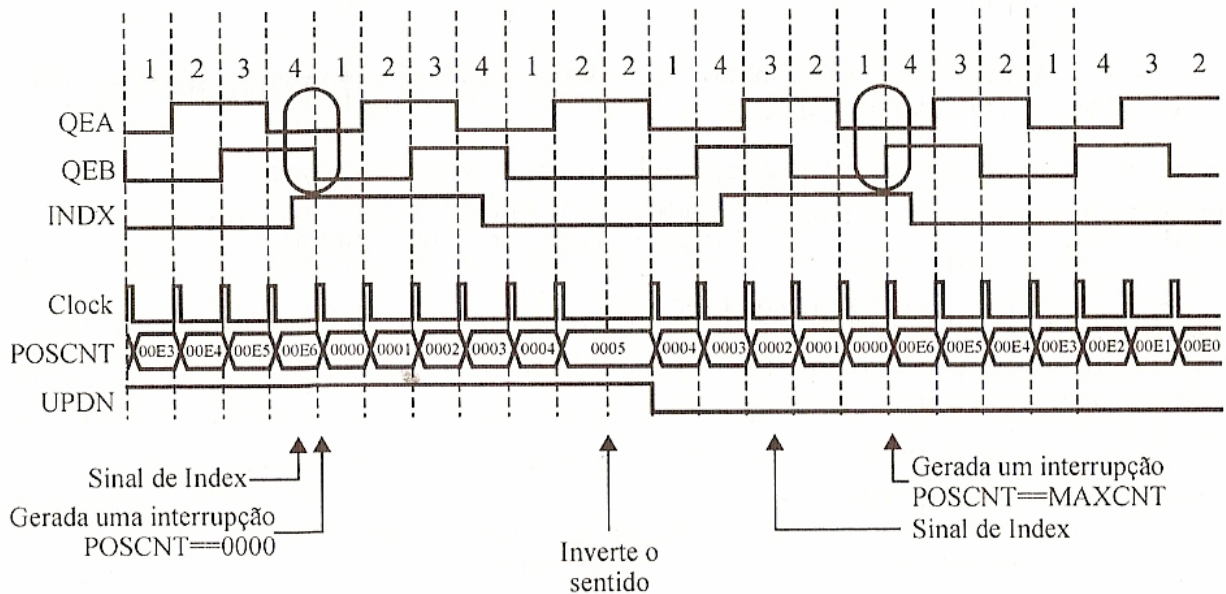


Figura 3.7 – Interrupção pelo sinal INDEX (18).

A outra forma utiliza o registrador MAXCNT para estabelecer um valor máximo de contagem para o contador POSCNT de tal sorte que quando o valor de registro de ambos se igualarem, uma interrupção irá ocorrer conforme se observa na Figura 3.8.

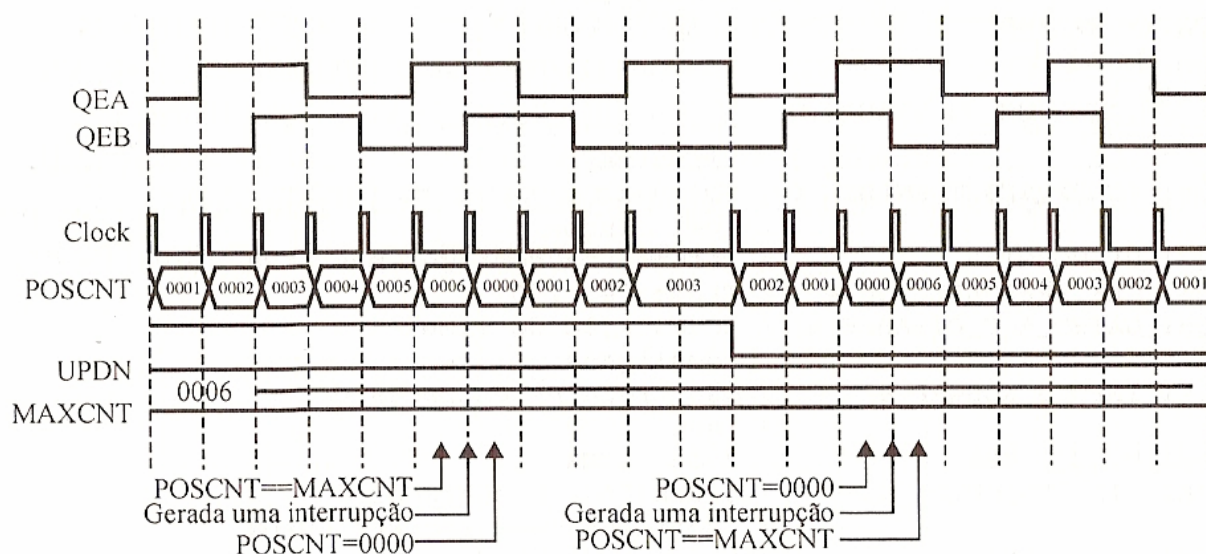


Figura 3.8 – Interrupção pelo registrador MAXCNT (18).

Internamente o decodificador de quadratura possui um módulo de filtros digitais conectados às três entradas de sinais com a função de filtrar possíveis ruídos, tão comuns em aplicações envolvendo motores.

A filtragem é realizada por meio de uma pequena amostragem do sinal (Figura 3.9), de tal forma que é permitido a passagem do nível lógico 0 ou 1 após uma sequência de três sinais iguais. Em outras palavras, é preciso que o sinal seja estável por três ciclos de *clock* (FCY) consecutivos para que este seja validado.

O *clock* do filtro pode ser programado por um divisor. Quanto menor a frequência do *clock* menores as frequências da banda passante (11).

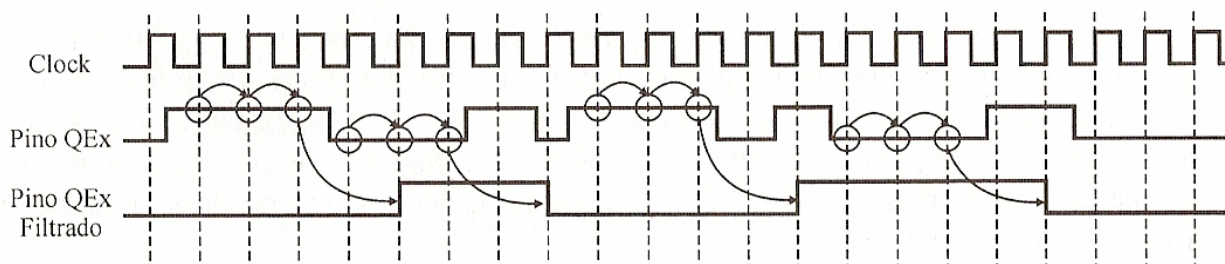


Figura 3.9 – Amostragem realizada pelo filtro digital do módulo QEI (18).

3.1.2 Controlador de Corrente – L6506

Para o projeto do controlador optou-se por utilizar um C.I dedicado para realizar a tarefa de controle da corrente nas bobinas do motor de passo. O L6506, fabricado pela *ST Microelectronics* (Figura 3.10), é um circuito integrado linear projetado para detectar e controlar a corrente nos motores de passo e outros dispositivos similares. Usado conjuntamente com o L6203 (ponte H) formam a interface de potência, capaz de fornecer corrente constante para cargas indutivas (20).

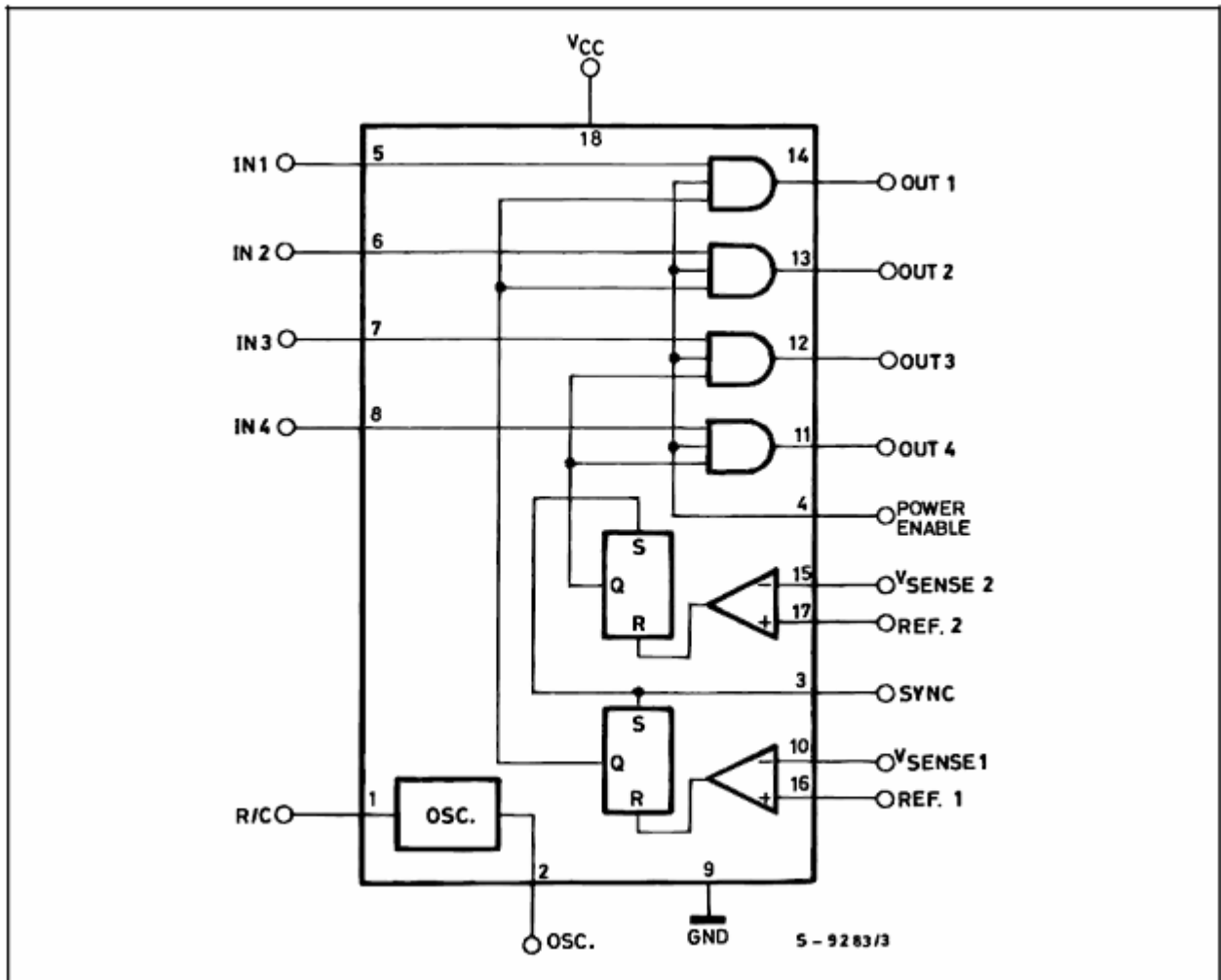


Figura 3.10 – Diagrama de blocos interno do C.I. L6506 (20).

No circuito da Figura 3.11 (utilizado no projeto) o L6506 é usado para “sentir” e controlar a corrente em cada uma das bobinas do motor de passo. A corrente é detectada pelo

monitoramento da tensão através dos resistores (R_{sense}) e controlada empregando técnica de chaveamento, já mencionada acima, de modo a mantê-la no valor desejado.

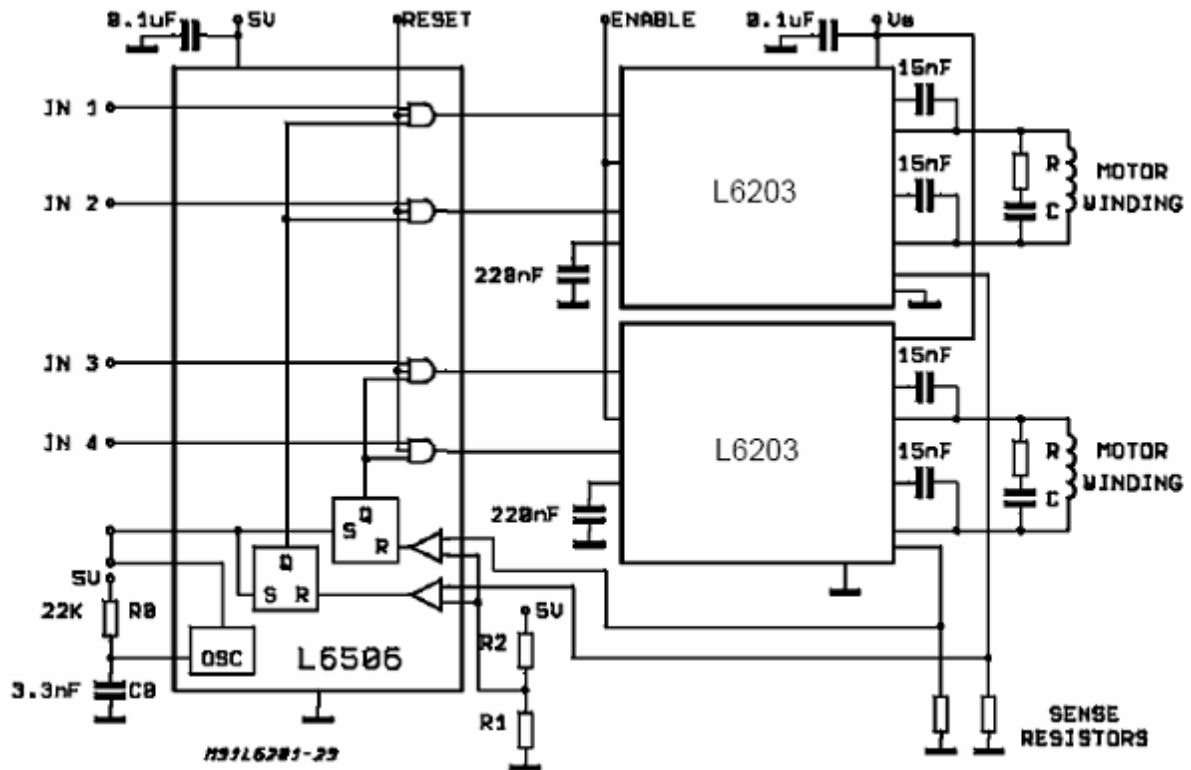


Figura 3.11 – Circuito de controle de corrente e estágio de saída do controlador (20).

Um oscilador interno gera os dois sinais PWM e comanda a frequência de operação determinada pela rede RC (pino 1), cujo cálculo se dá por:

$$f = \frac{1}{0.69R1C1} \quad (1)$$

para $R1 > 10K\Omega$

Estes pulsos oriundos do oscilador acionam os Flip-Flops (atuam como clock) levando suas saídas ao nível alto, fato que habilita as portas AND a transmitir os sinais vindos do gerador de seqüência de fase (controlador de sinais – DSPIC) para os drivers de potência (ponte H - L6203) que alimentarão as bobinas do motor de passo.

Com a ativação da alimentação da carga, a corrente que a alimenta começa a aumentar limitada pelas características indutivas próprias do enrolamento. Quando a corrente na bobina alcança um valor de pico determinado (programado), a tensão através do resistor sensor é igual à tensão de entrada de referência (V_{ref}) e o correspondente comparador zera seu respectivo *flip-flop*. Isto interrompe o driver, fazendo com que a corrente decaia através de um caminho recirculante na carga até que o próximo pulso do oscilador ocorra. A corrente de pico em cada bobina é programada pela escolha do valor do resistor sensor e da tensão de referência V_{ref} , segundo a seguinte equação:

$$I_{pico} = \frac{V_{ref}}{R_{sensor}} \quad (2)$$

Desde que as entradas de tensão de referência são separadas para cada canal, cada uma das cargas (bobina) pode ser programada (corrente) independentemente, permitindo ao dispositivo ser usado para implementar drivers em micropasso ou aplicações com diferentes níveis de corrente permitidas (20).

3.1.3 Driver de Corrente – L6203

O circuito integrado L6203, produzido pela *ST Microelectronics*, (Figura 3.12) é um driver de corrente com topologia em ponte H, usado para acionar tanto motores dc quanto motores de passo. Por empregar tecnologia *Multipower-BCD* ou mista o qual combina transistores de potência DMOS com CMOS e circuitos Bipolares no mesmo *chip*, tem-se uma otimização de seu circuito lógico e estágio de potência ambos internos (realização de todo o controle de entradas TTL, saídas CMOS e compatibilidade com microcontrolador, eliminando a necessidade de componentes MOS externos para drenar corrente – Figura 3.13) de modo a realizar uma melhora da performance do dispositivo (21).

A escolha do L6203 para integrar o projeto levou em conta três fatores: o primeiro é o fato de este componente ser o que dispõe de maior limite de corrente entre todos de sua categoria, podendo drenar correntes de até 4A, cabendo dentro das especificações de projeto com margem de segurança (o motor de passo utilizado no projeto consome em torno de 2,1 A). O segundo refere-se à economia de tempo de projeto e tamanho do circuito pelo fato do L6203 possuir toda a lógica de controle de potência internamente, substituindo transistores discretos que além de aumentar o espaço, traria a problemática da lógica de controle.

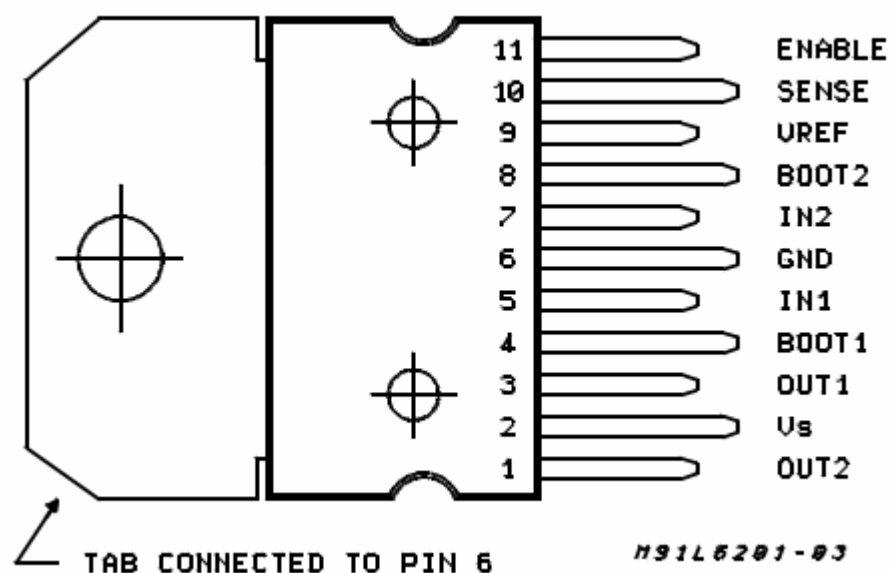


Figura 3.12 – Pinagem do C.I. L6203 (encapsulamento multiwatt) (21).

Uma vez que o L6203 é um circuito integrado de potência, operando com correntes e tensões altas comparadas ao seu tamanho, há necessidade de se utilizar dissipador de calor para operá-lo evitando o risco do mesmo sofrer danos. O encapsulamento multiwatt visualizado no diagrama acima facilita a colocação de dissipadores.

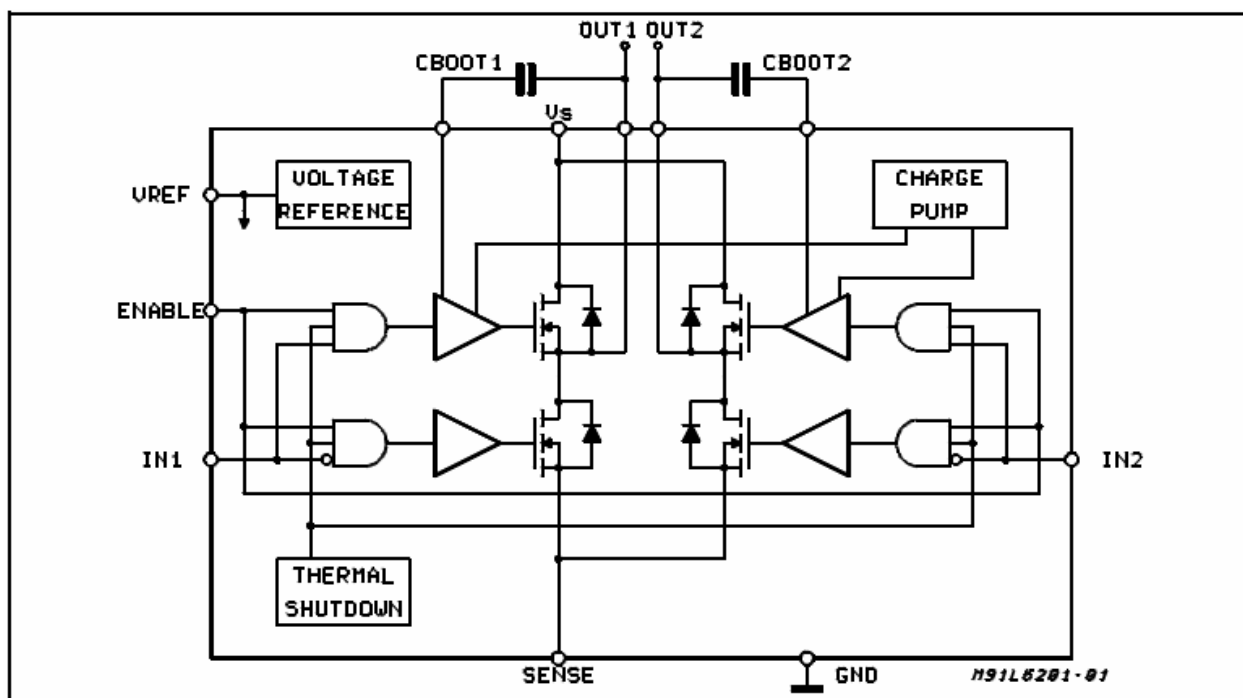


Figura 3.13 – Diagrama de blocos interno do C.I. L6203 (21).

3.1.4 Motor de Passo

O motor de passo utilizado nos experimentos é um motor do tipo híbrido com as bobinas configuradas para operar como bipolar série, fabricado pela empresa Action Technology (Figura 3.14). Algumas de suas principais especificações são dadas na Tabela 3.2 (22).



Figura 3.14 – Motor de passo híbrido utilizado no projeto do controlador (22).

Tabela 3.2 – Especificações do motor de passo utilizado (22).

MODELO	ESQUEMA DE LIGAÇÃO	TENSÃO NOMINAL (V _{dc})	CORRENTE (A/fase)	RESISTÊNCIA (OHMS/fase)	INDUTÂNCIA (mH/fase)	HOLDING TORQUE (kgf.cm)	DETENT TORQUE (gf.cm)	INÉRCIA DO ROTOR (g.cm ²)	PESO (g)	L (mm)
SM1.8-D18-MN	BIPOLAR PARALELO	2,1	4,2	0,5	1,7	18	700	460	1000	76
	BIPOLAR SERIE	4,2	2,1	2	6,8					
	UNIPOLAR	3	3	1	1,7	13,5				

3.1.5 Interface Serial – RS232

A comunicação serial é a forma de transmissão de dados mais comum entre dispositivos embarcados e um computador pessoal. Ela consiste no envio de bits de forma serial, como uma

fila, um atrás do outro, por uma única via. Possui dois canais para realizar a transferência de dados, um para o envio, denominado Tx, e outro para o recebimento chamado Rx. Pode operar sob diversos tipos de protocolos ou normas padrão sendo a norma RS232 a mais simples e barata de ser implementada.

Por esta simplicidade e baixo custo, optou-se por utilizar este tipo de comunicação entre o controlador (dsPIC) e um terminal computador. Os dsPICs possuem um módulo que proporciona tal comunicação. Trata-se do módulo UART (do inglês, *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) que integra três componentes (Figura 3.15): o módulo de configuração da taxa de transferência (*Baud Rate Generator*), o módulo de transmissão (*UART Transmitter*) e o módulo de recepção (*UART Receiver*) (19). É um método de comunicação *full-duplex*, isto é, com dois canais de comunicação independentes que podem operar ao mesmo tempo, com a mesma taxa de transferência e o mesmo tamanho de dados. Não existe sincronismo entre transmissor e receptor, ele é feito a cada caracter.

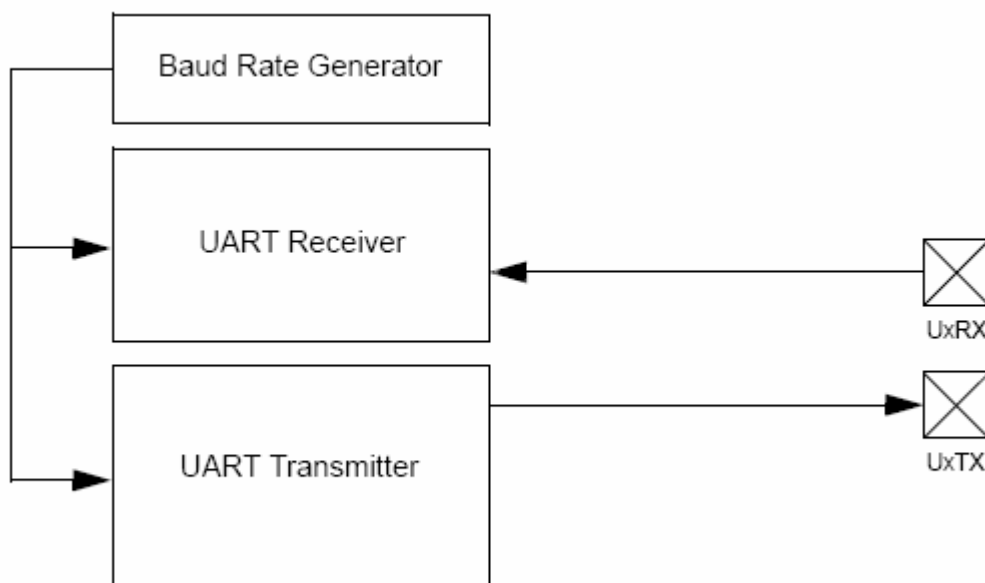


Figura 3.15 – Diagrama de blocos geral do módulo UART (19).

A maioria dos equipamentos digitais utiliza níveis TTL ou CMOS. Como a interface RS232 opera com níveis negativos e variados de tensões, é necessário transformar níveis TTL (0 a 5 volts), por exemplo, em RS232 e vice-versa. Isto é feito por conversores de nível, tal como o circuito integrado de buffer HIN232 (23), utilizado no projeto do controlador de motor de passo. Ele inclui um circuito de “*charge pump*” capaz de gerar tensões de +10 volts e –10 volts

a partir de uma fonte de alimentação simples de +5 volts, bastando para isso alguns capacitores externos, conforme se pode observar na Figura 3.16.

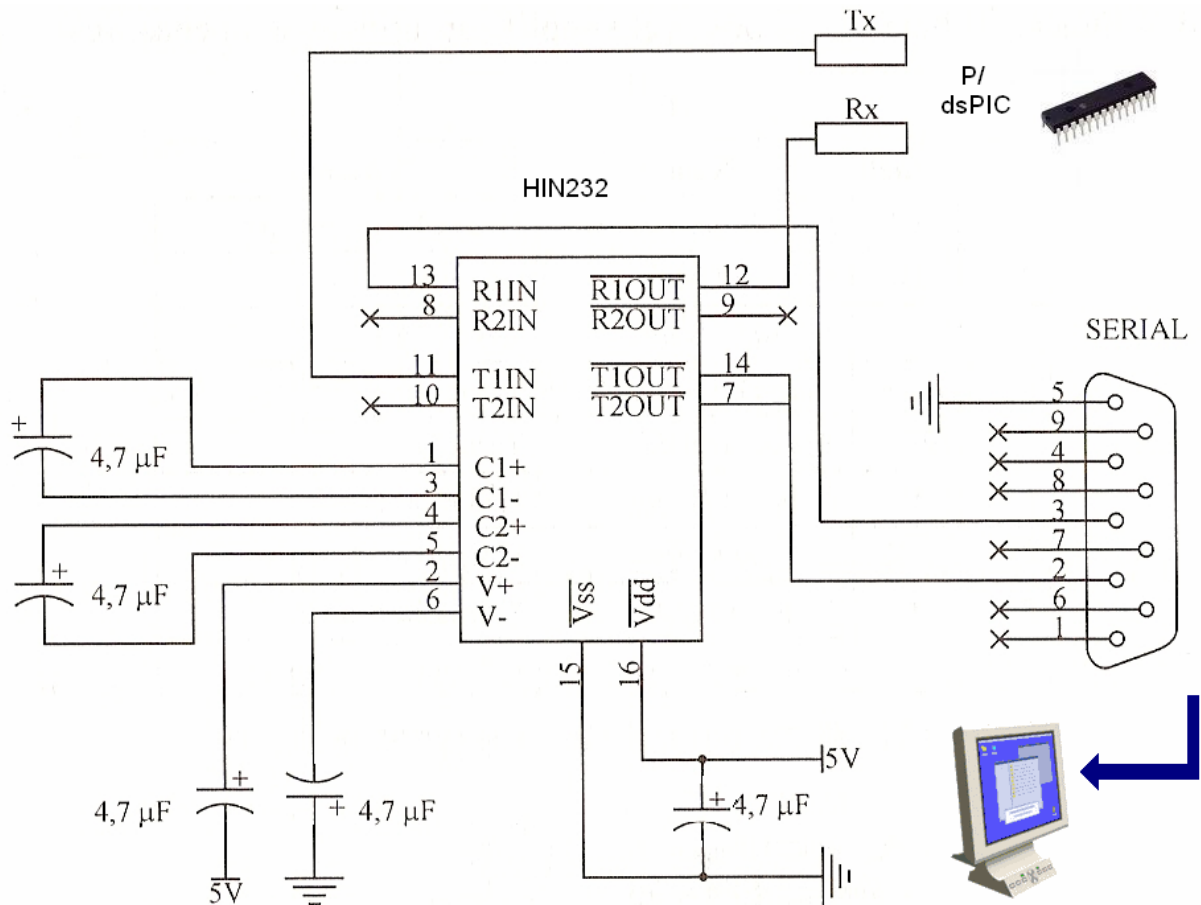


Figura 3.16 – Diagrama da comunicação serial.

Um aspecto da comunicação serial é a capacidade do sistema em delimitar o final de um dado e o início de outro. Para isso alguns *bits* especiais são utilizados: o *bit* de início (do inglês, *start bit*) e o bit de final (do inglês, *stop bit*). Ainda existem outros *bits* adicionais que realizam outras formas de controle da comunicação, como o *bit* de paridade para o controle de erros (do inglês, *parity bits*). Para o projeto do controlador é estabelecido uma taxa de transmissão de 9600 *Baude Rate*, oito *bits* de tamanho de dados, um *stop bit* e nenhum *bit* de paridade (18).

3.1.6 Realimentação

Para realizar a realimentação do sistema, foi utilizado um *encoder* modelo HEDS-5640-E12 da empresa Agilent Technologies (Figura 3.17) (24), cujas especificações básicas são dadas na Tabela 3.3.

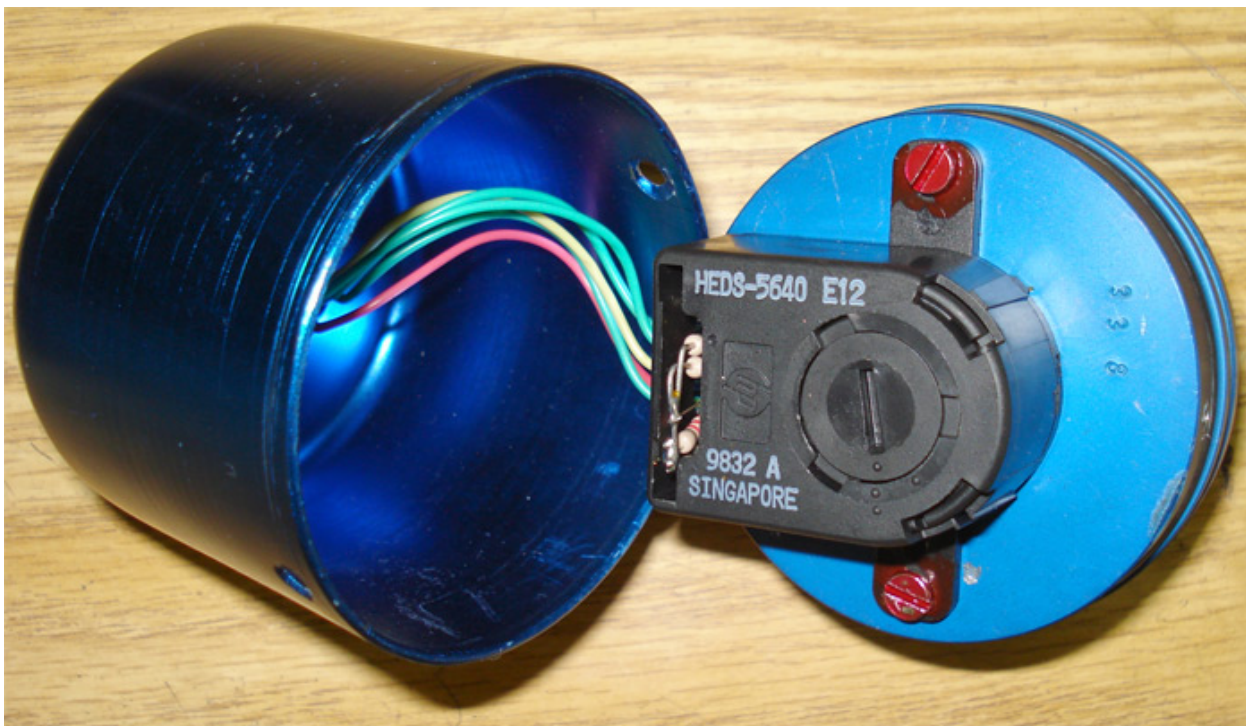


Figura 3.17 – Encoder de 200 pulsos utilizado no projeto (sem a caixa de montagem).

Tabela 3.3 – Especificações do *encoder* utilizado no projeto (24).

Parâmetros	Características
Tensão de alimentação	5V
Número de pulsos/volta	200
Máxima frequência de operação	30000 RPM
Saídas	Canal A / Canal B / Index

3.1.7 Montagem

O circuito foi montado em uma matriz de contatos (*protoboard*) e o motor de passo acoplado ao *encoder* com um aparato mecânico, conforme se pode visualizar na foto da Figura 3.18.

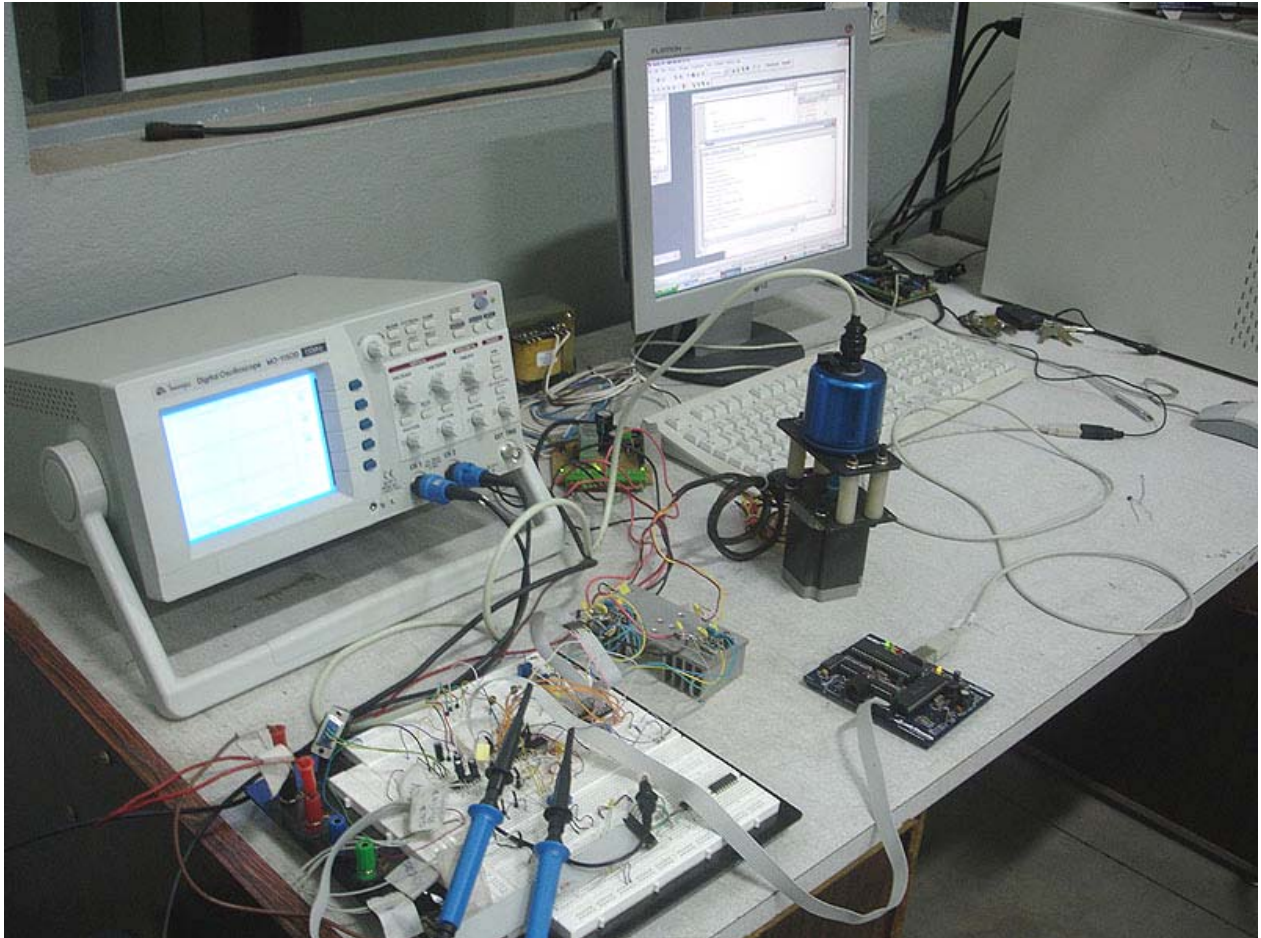


Figura 3.18 – Bancada de testes do projeto.

3.2 SOFTWARE

O projeto integra dois *softwares*. O primeiro deles refere-se ao dsPIC, cuja rotina tem a função de gerar as fases para acionar o motor e verificar erro de passo tentando corrigi-lo. O

outro deve criar uma solução de interface gráfica para realizar a comunicação com o controlador enviando comandos a este último.

3.2.1 Software – DSC

O código fonte do projeto foi desenvolvido utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado MPLAB IDE (Figura 3.19), fornecido gratuitamente pelo fabricante do dsPIC. Para programar e depurar o dsPIC, uma ferramenta de desenvolvimento do mesmo fabricante (ICD2) foi utilizada (Figura 3.20). Uma excelente característica desta ferramenta é a possibilidade de realizar depuração do programa em tempo real, ou seja, é possível executar o programa passo a passo. Isso facilita a verificação do código e busca por erros de *software*.

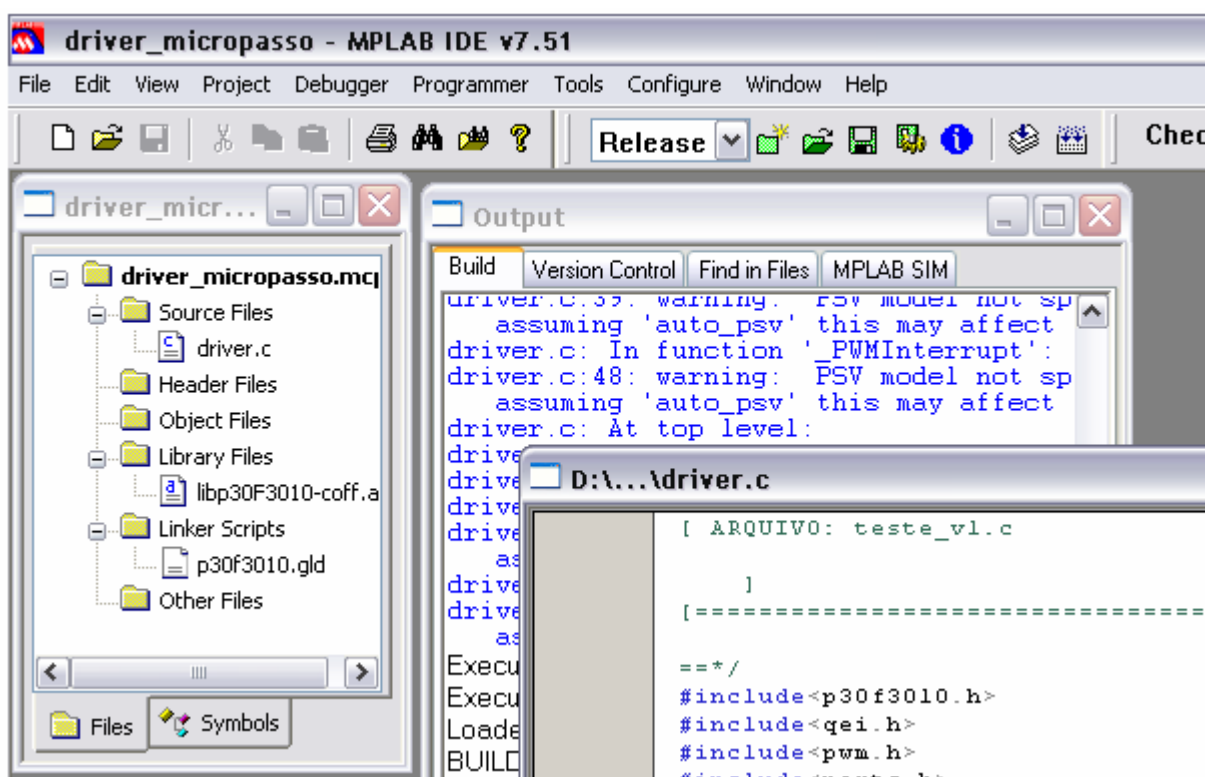


Figura 3.19 – Ambiente de desenvolvimento MPLAB IDE.

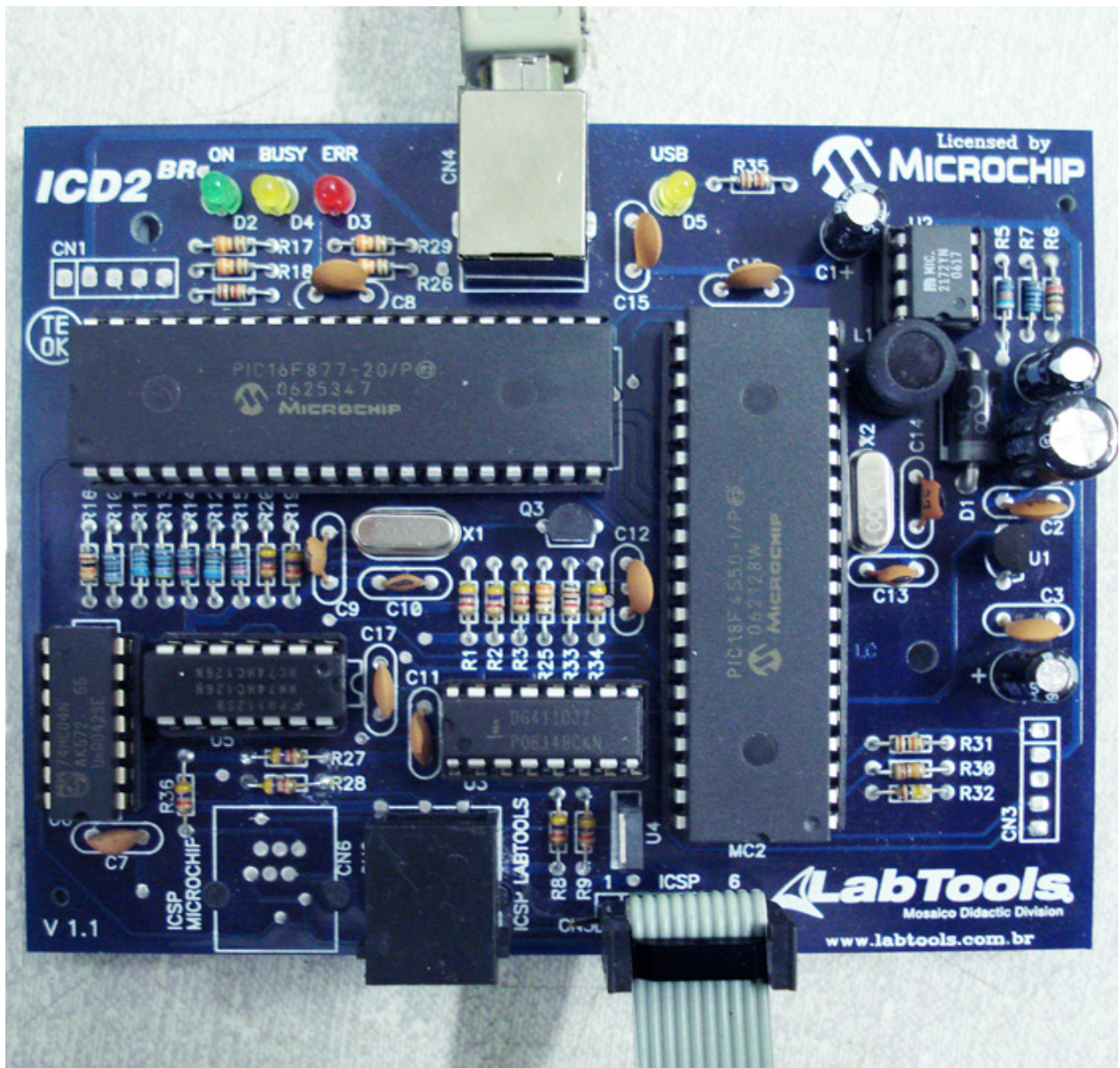


Figura 3.20 – Programador e depurador ICD2.

Optou-se pela linguagem C na confecção do *software* do dsPIC por ser uma linguagem mais acessível, proporcionando menor tempo de projeto e maior flexibilidade de implementação. Para a utilização desta linguagem foi necessária a instalação de um compilador C denominado C30, em versão para estudante, disponibilizado pela Microchip.

A Figura 3.21 apresenta o fluxograma do *software* desenvolvido. Como se pode perceber, os dados são enviados ao dsPIC e este somente executa o acionamento do motor se

todos os parâmetros estiverem ajustados, caso contrário envia dado de erro ao microcomputador.

Ao final de uma sequência de movimento do motor, o sistema tenta por três vezes ajustar o posicionamento do mesmo, enviando número de passos adicionais. Em caso de impossibilidade, da mesma forma descrita acima, um dado de erro é enviado ao micro.

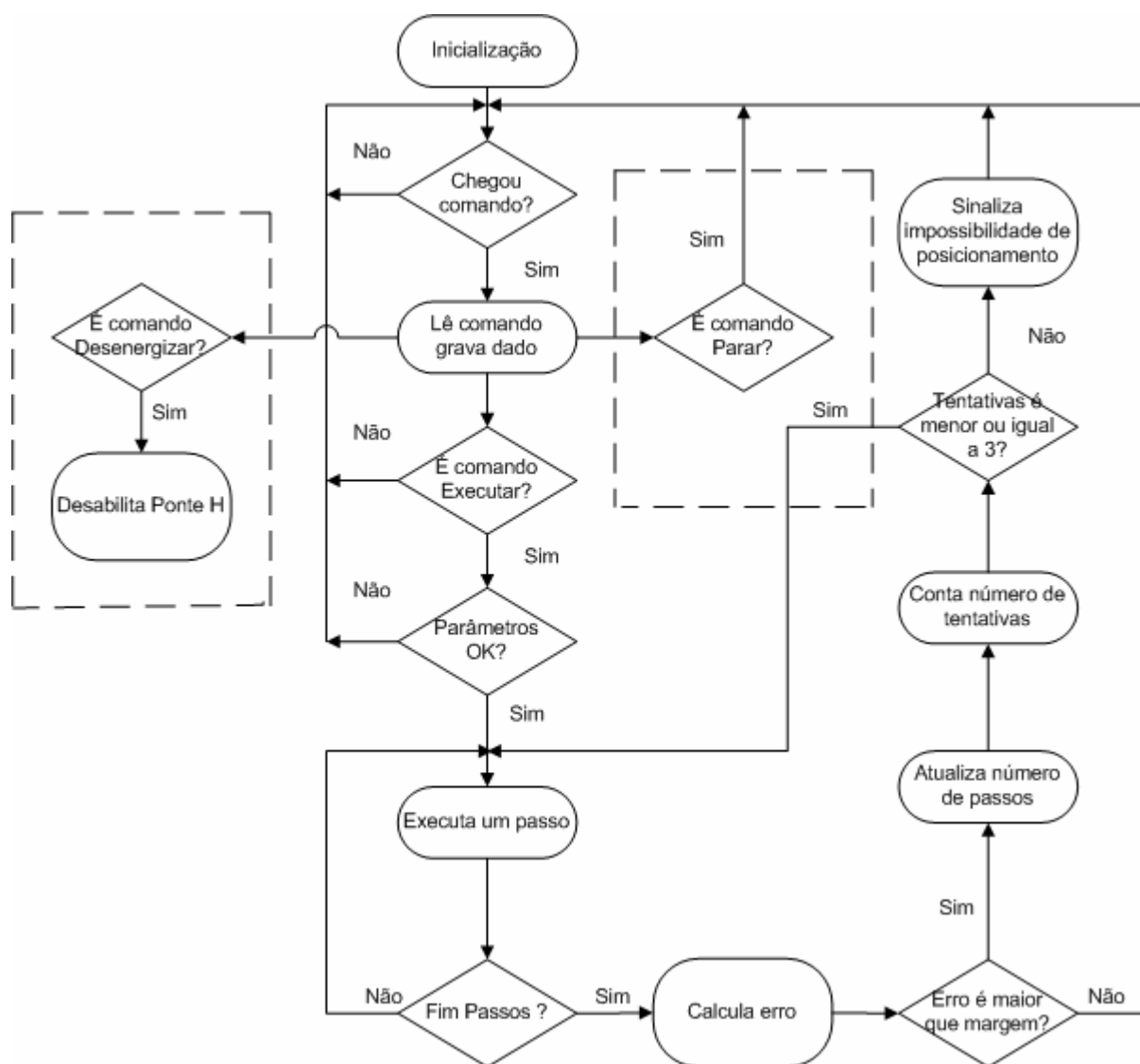


Figura 3.21 – Fluxograma do *software* do controlador.

3.2.1.1 Obtenção de Micropasso

Foi visto no capítulo 2 deste texto que para obter maior resolução de passo de um motor de passo, basta fazer com que a corrente nos enrolamentos seja variada individualmente. O controlador utiliza o circuito da Figura 3.11 onde a variação da tensão de referência das entradas do L6506 feitas de modo individual leva à obtenção de movimento em micropasso para o motor. Para realizar essa variação da tensão de referência, normalmente caracterizada por um sinal de aspecto senoidal, foi adotado como solução a utilização de dois sinais produzidos pelo módulo PWM (pinos PWM2H e PWM3H) do dsPIC passando por um filtro passa-baixa de modo a obter um sinal de tensão analógico (Figura 3.22). Os valores corretos para proporcionar um sinal que se aproxima de uma senóide são armazenados na memória de programa do chip (tabela de senos e co-senos dos ângulos de divisão do passo normal).

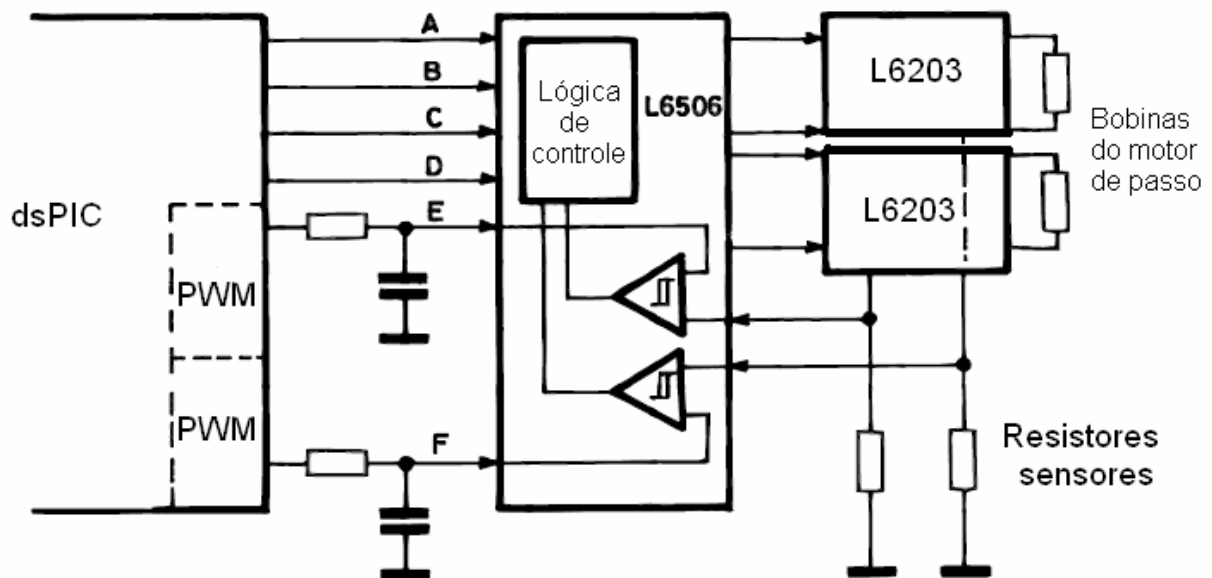


Figura 3.22 – Sinais PWM utilizados para obter tensões de referência variáveis (7).

3.2.2 Software – Interface gráfica

Para realizar a interface entre o computador e o controlador foi desenvolvido um aplicativo em Borland Delphi 6. Um componente chamado *TcomPort* (25) acrescido ao programa permite facilidade de programação da porta serial.

O programa criado, que monitora a porta serial do microcomputador, permite o ajuste de vários parâmetros do movimento do eixo do motor de passos:

- Sentido de rotação;
- Velocidade;
- Número de passos;
- Margem de erro.

Além disso, o programa sinaliza erro em caso de posicionamento incorreto do motor de passo. A aparência desse programa pode ser visto na Figura 3.23 seguinte.

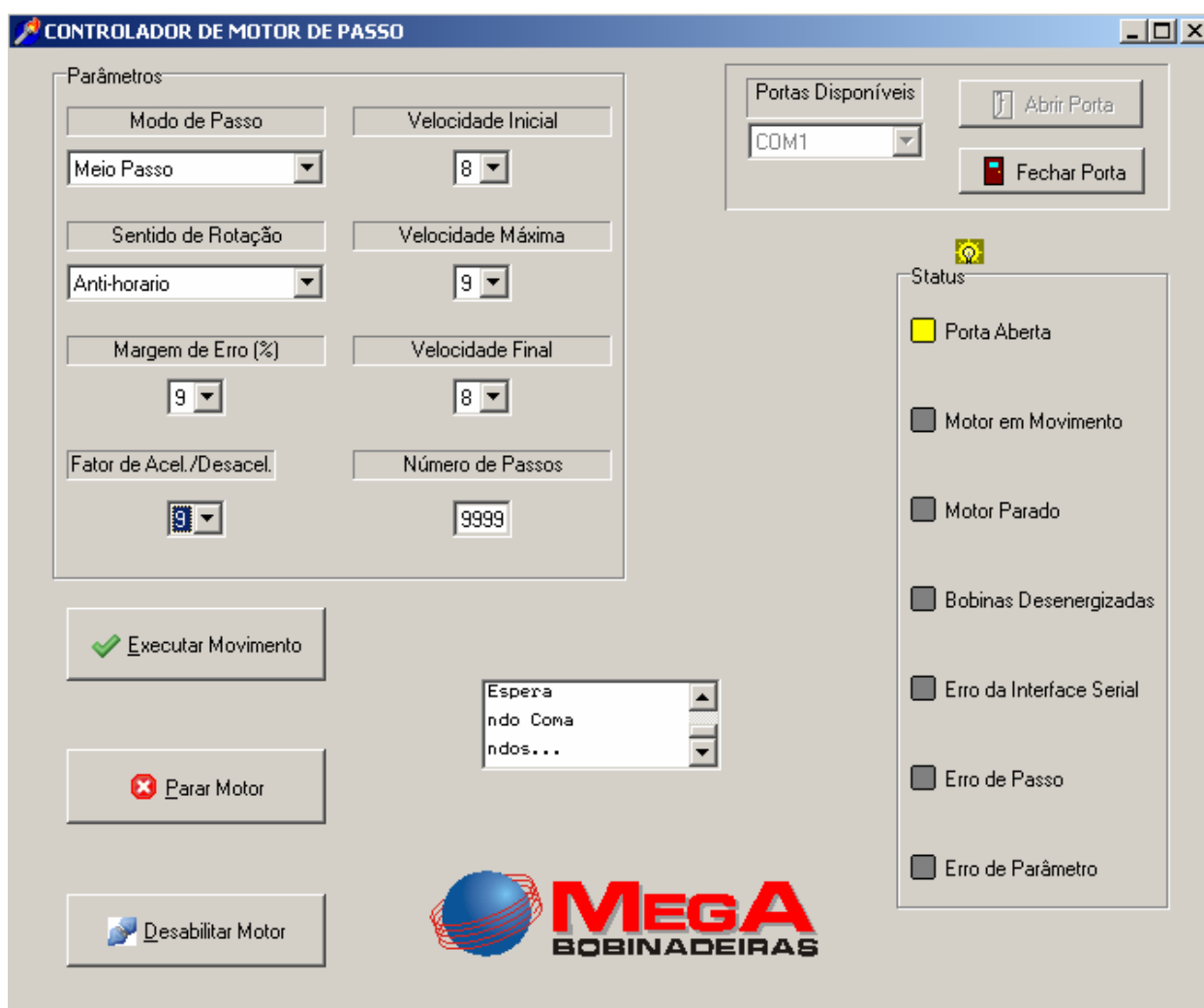


Figura 3.23 – Interface gráfica do sistema controlador de motor de passo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SIMULAÇÕES

Foi realizada uma série de simulações da rotina de acionamento de motores de passo utilizando a ferramenta de análise no tempo *Logic Analyzer* do MPLAB. Para os gráficos gerados adota-se a seguinte legenda:

- Pino RE0: sinal da fase A+;
- Pino RE1: sinal da fase A-;
- Pino RE2: sinal da fase B+;
- Pino RE4: sinal da fase B-;
- Pino PWM2H: sinal PWM da tensão de referência da fase A;
- Pino PWM3H: sinal PWM da tensão de referência da fase B;
- Pino RD0: sinal de habilitar/desabilitar ponte da fase A;
- Pino RD1: sinal de habilitar/desabilitar ponte da fase B.

↳ Teste para modo passo completo – excitação simples:

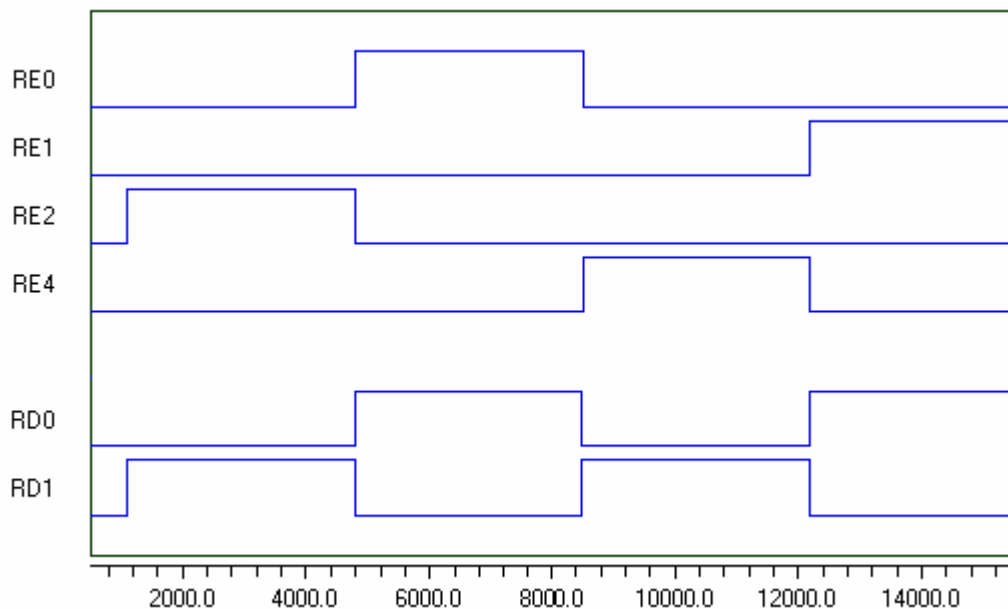


Figura 4.1 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo passo completo excitação simples – sentido horário.

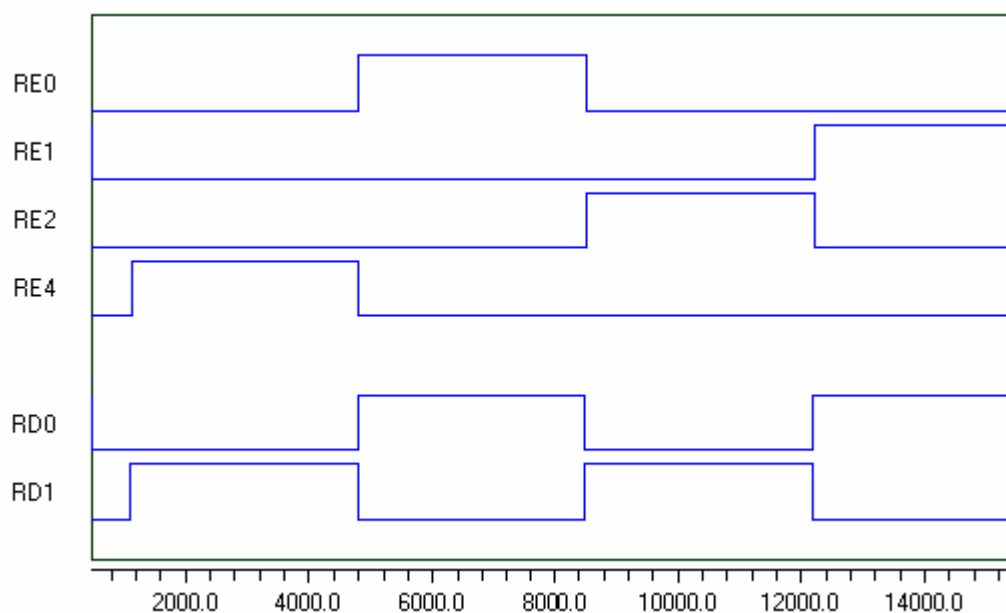


Figura 4.2 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo passo completo excitação simples – sentido anti-horário.

↳ Teste para modo passo completo – excitação dual:

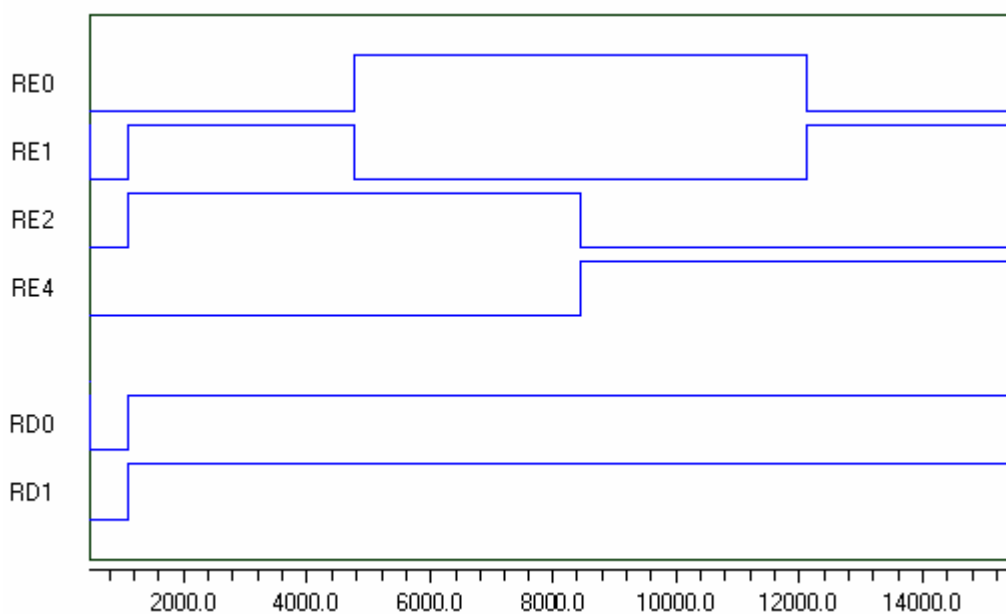


Figura 4.3 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo passo completo excitação dual – sentido horário.

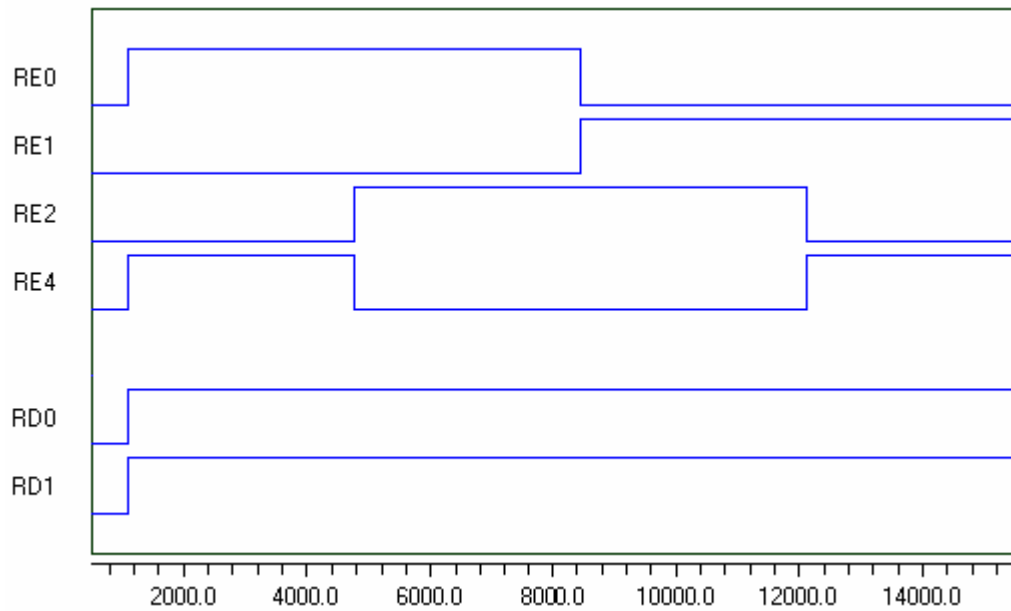


Figura 4.4 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo passo completo excitação dual – sentido anti-horário.

↳ Teste para modo meio passo:

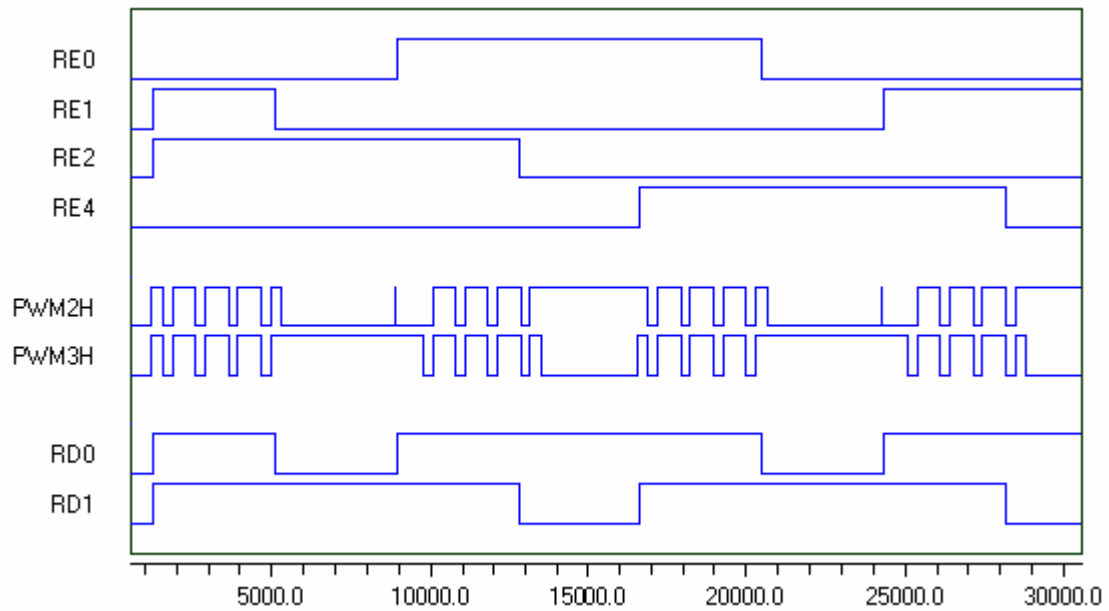


Figura 4.5 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo meio passo – sentido horário.

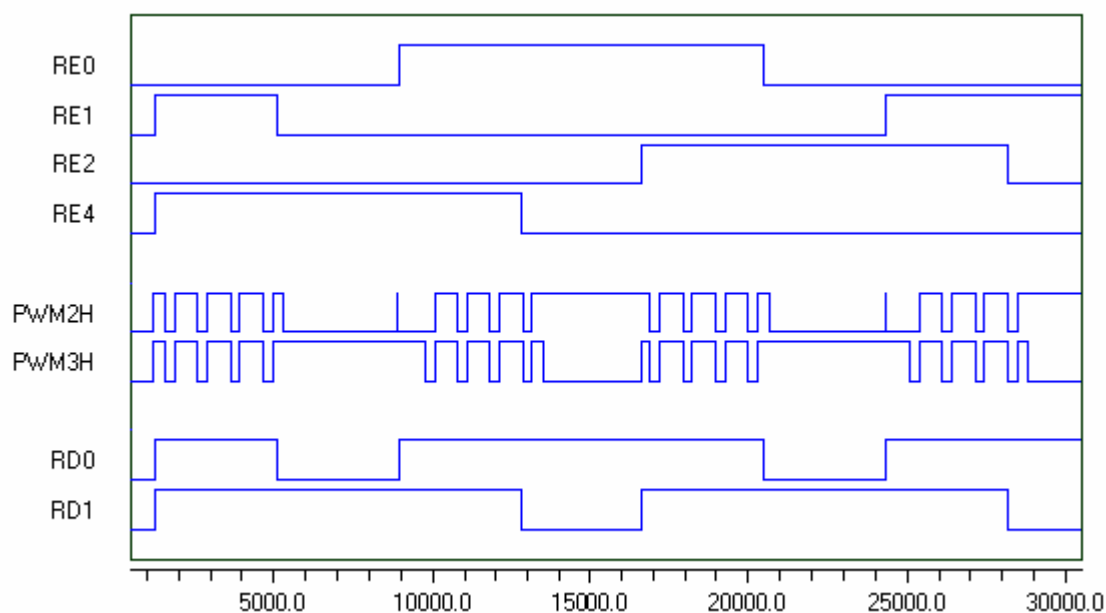


Figura 4.6 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo meio passo – sentido anti-horário.

↳ Teste para modo micropasso – $\frac{1}{4}$ passo: (Para o modo micropasso os sinais de fase são idênticos aos do modo meio passo. Os únicos sinais que sofrem variação no tempo são os das saídas PWM. Dessa forma, por comodidade e bom senso, é representada apenas um gráfico referente a este modo):

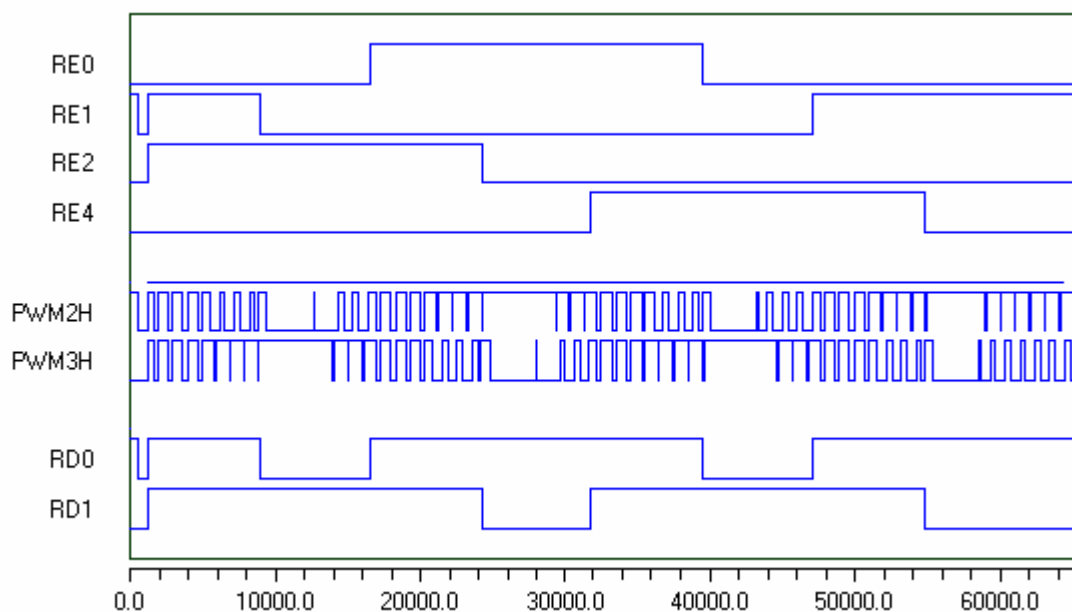


Figura 4.7 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo micropasso – $\frac{1}{4}$ passo – sentido horário.

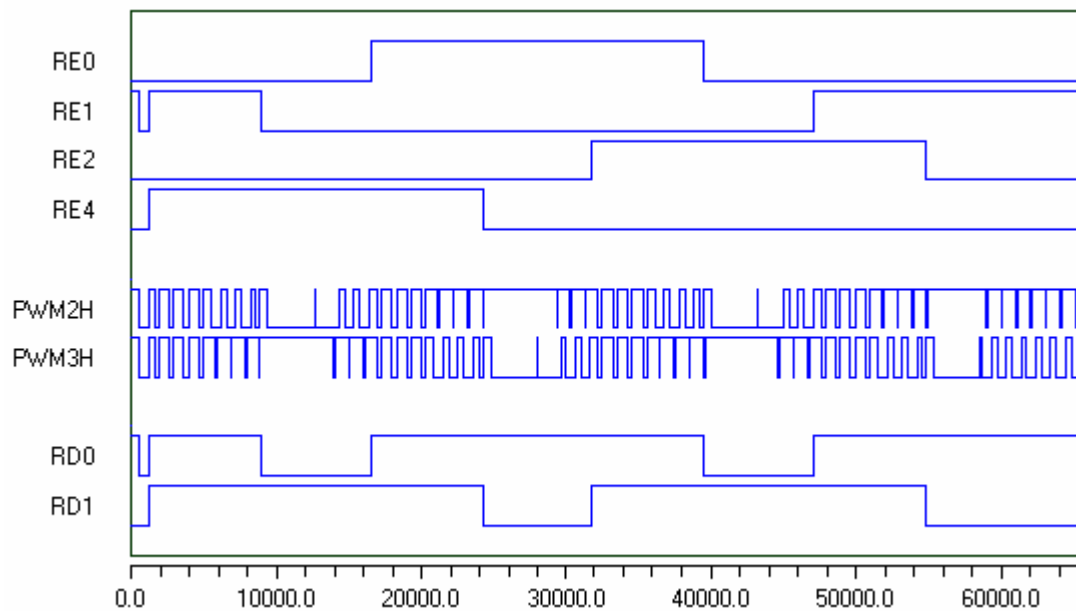


Figura 4.8 – Gráfico de sinais de fase e habilitar ponte H para modo micropasso – $\frac{1}{4}$ passo – sentido anti-horário.

Pela análise dos gráficos conclui-se que a rotina está gerando corretamente os sinais de fase para acionar o motor de passo.

4.2 TESTES DE BANCADA

Posto o circuito em funcionamento, com o auxílio de um osciloscópio efetuou-se a aquisição de certos sinais para averiguar o funcionamento do controlador:

- Sinais de tensão de referência (sinal PWM após passarem pelo filtro passa-baixa). Os gráficos a seguir referem-se a estes sinais para os diversos modos de passo testados.

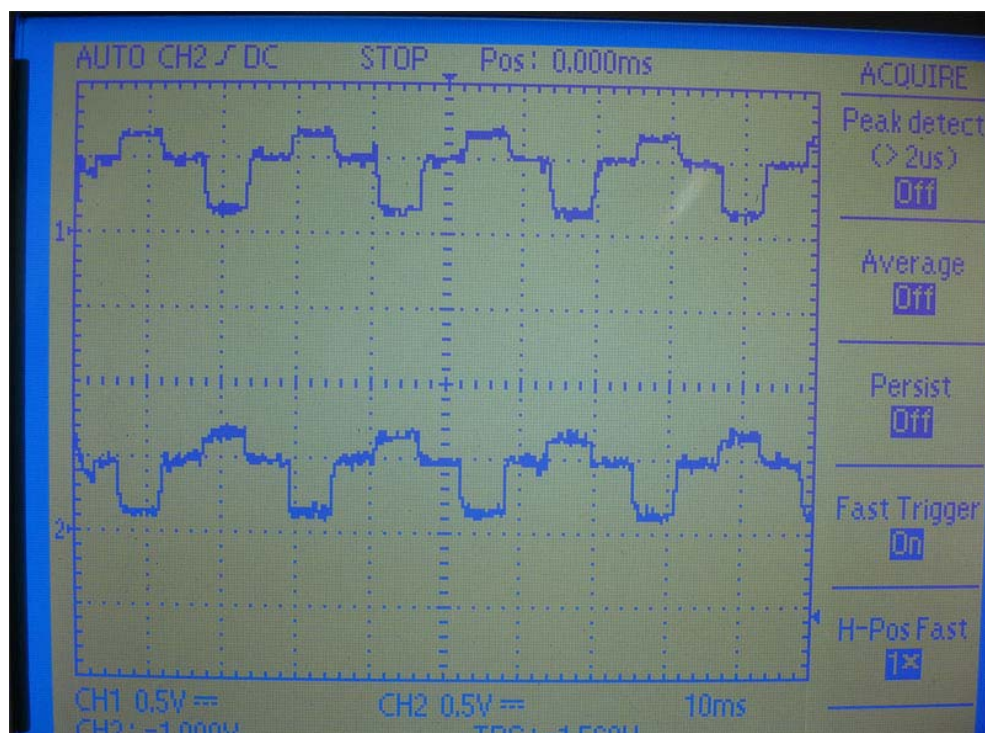


Figura 4.9 – Gráfico de sinais de tensão de referência para modo meio passo.



Figura 4.10 – Gráfico de sinais de tensão de referência para modo micropasso 1/4 passo.

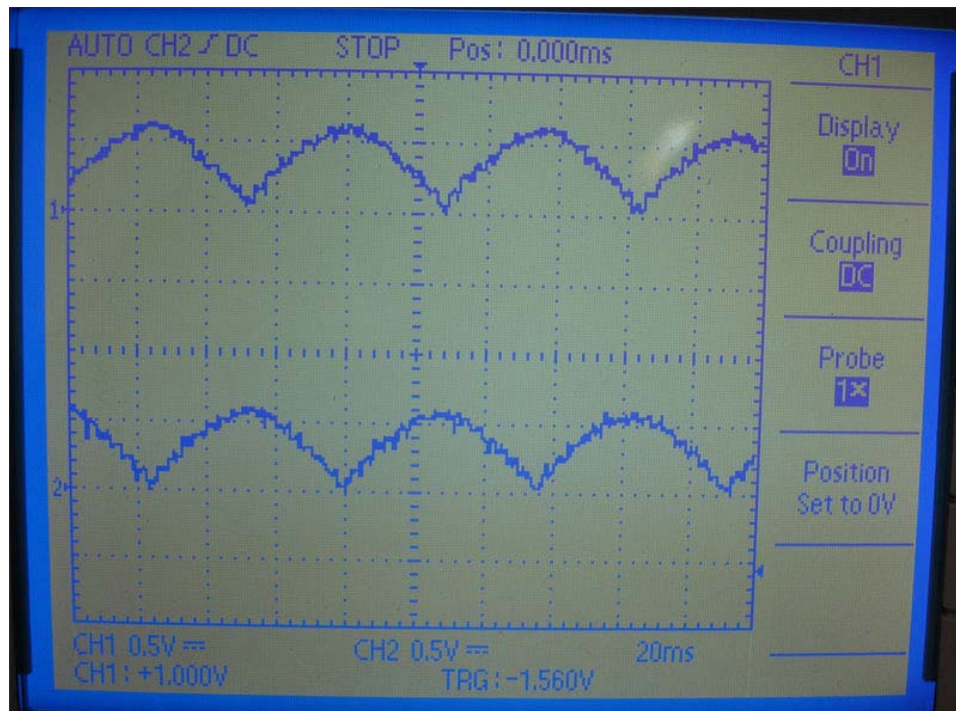


Figura 4.11 – Gráfico de sinais de tensão de referência para modo micropasso 1/16 passo.

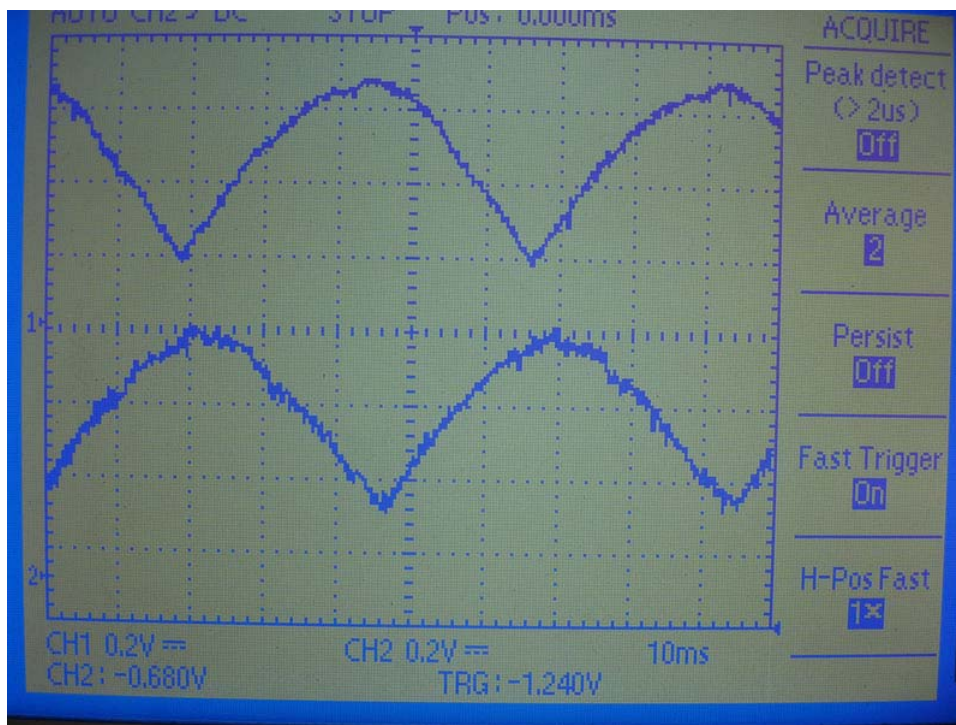


Figura 4.12 – Gráfico de sinais de tensão de referência para modo micropasso 1/64 passo.

Pelos gráficos nota-se que quanto mais o sinal PWM filtrado aproxima-se de um semi-ciclo de uma senóide maior a resolução de passo. No entanto, observa-se que o sinal tende a não “zerar” o que pode trazer problemas com relação à precisão do passo.

- Formas de onda da corrente em uma das fases do motor de passo:



Figura 4.13 – Gráfico de corrente em uma das fases do motor de passo – modo meio passo.

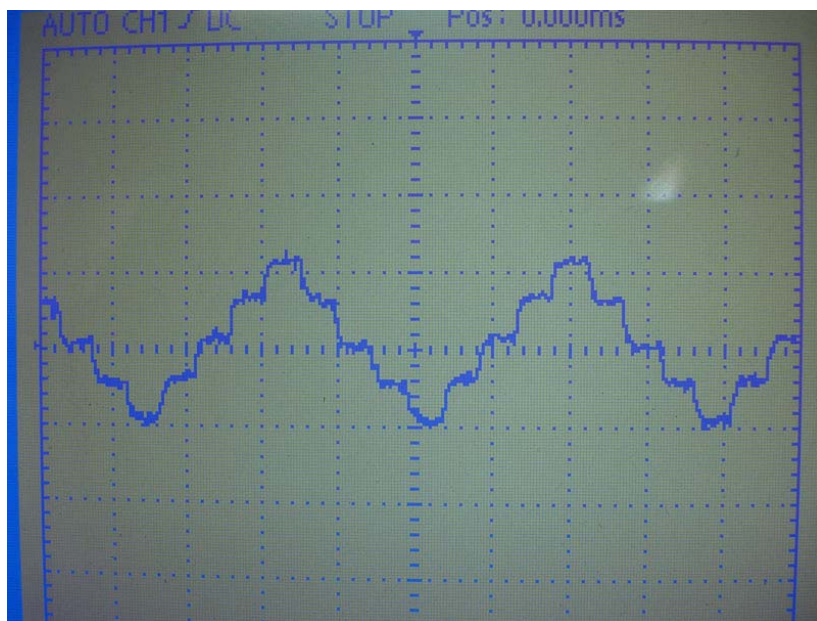


Figura 4.14 – Gráfico de corrente em uma das fases do motor de passo – modo 1/4 passo.

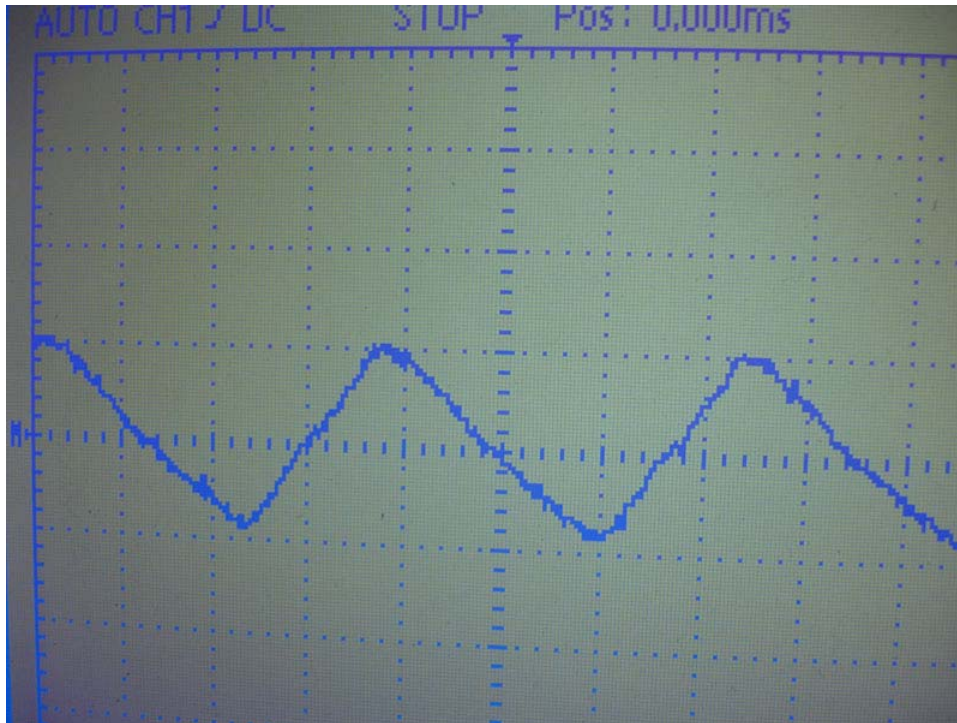


Figura 4.15 – Gráfico de corrente em uma das fases do motor de passo – modo 1/64 passo.

Dos gráficos produzidos, conclui-se que quanto maior a resolução de passo, mais a forma de onda da corrente na bobina aproxima-se de uma senóide, embora o sinal vá sofrendo uma distorção crescente. Isso se deve às próprias limitações do motor de passo em operar neste modo. Na verdade, com o aumento da resolução, requerem-se níveis de correntes cada vez mais baixos e isso se torna cada vez mais difícil para o circuito reproduzir em virtude suas próprias limitações.

- Testes de verificação de passo: foi efetuada uma série de medidas para testar o circuito em malha fechada. Não houve tempo hábil, até a conclusão desta monografia, de tratar esses dados estatisticamente de forma a fornecer resultados seguros. No entanto, constatou-se ser possível aumentar o limite de velocidade no qual o motor principia a apresentar falhas operando em malha aberta. Além disso, os erros de posicionamento final do movimento do motor em malha fechada foram menores que os do motor operando em malha aberta, como era de se esperar. Pôde-se notar, ainda, que na maioria dos movimentos certo erro sempre ocorria, erro este que é inerente às características mecânicas do motor de passo e

que por isso a inclusão do fator margem de erro no controle do sistema é perfeitamente aceitável. Em se tratando de operação em micropasso (os de resolução maior que oito) esse tipo de erro mostrou-se mais visível. De fato, como já foi dito anteriormente, neste modo várias limitações podem afetar a precisão do mesmo. Outro fator a se ressaltar é resolução do *encoder* utilizado. Com a interface de *encoder* em quadratura do dsPIC operando no modo de quatro vezes a resolução (modo 4x) os modos de passo completo, meio passo e $\frac{1}{4}$ passo tornam-se mais fáceis de serem corrigidos ao passo que os de maiores divisões ocorre o oposto. A Tabela 4.1 apresenta um conjunto de dados, obtidos da observação do funcionamento do sistema controlador para dois dos modos de passo possíveis para o motor de passo.

Tabela 4.1 – Resultados de testes do sistema controlador em termos de verificação/correção de passo para os modos passo completo e meio passo.

Modo	Velocidade	Número de passos	Margem de erro	Rampa 25%	Erro	Correção
Passo completo	Média	200	1%	Sim	Sim	Sim
Passo completo	Alta	200	1%	Sim	Sim	Não
Meio passo	Média	400	1%	Sim	Não	-
Meio Passo	Alta	400	1%	Sim	Sim	Sim

5 CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu conhecer mais de perto toda a problemática envolvendo um projeto com muitas nuances e opções. De fato, há muitas tecnologias disponíveis atualmente sendo que cada qual tem suas próprias limitações, vantagens ou desvantagens.

Um controlador de motor de passo, por exemplo, pode ser implementado utilizando diversos tipos de circuitos. Devido à sua popularidade e baixo custo eles se tornam uma alternativa razoável para competir com servos-motores. É claro que para o motor de passo alcançar performance satisfatória para conseguir competir nesse nicho de mercado é necessário que seu circuito de controle seja otimizado, preciso e rápido.

Os controladores de motor de passo que no início possuíam controle feito exclusivamente em *hardware*, com o tempo passaram a integrar circuitos microprocessados. Sem dúvida, os microprocessadores/microcontroladores dominaram o mercado, principalmente pelo baixo custo aliado com a flexibilidade de controle.

Uma característica de sistemas digitais como os microcontroladores e os DSP's é que estes seguem uma seqüência programada de instruções especificadas pelo projetista. Em aplicações que requerem respostas rápidas (um controlador de motor de passo em malha fechada, por exemplo) é provável que a utilização de circuitos digitais convencionais, em lugar de circuitos que obedeçam a uma seqüência de comandos (programa), ofereça vantagem com respeito à velocidade de processamento do mesmo (os sinais podem percorrer os circuitos de modo paralelo). Com o advento de dispositivos de lógica programável como os PLD's (do inglês, CPLD - *Complex Programmable Logic Device*) e os FPGA's (do inglês, *Field Programmable Gate Array*), é possível a implementação de circuitos digitais inseridos em um único *chip* proporcionando vantagens no que diz respeito a espaço ocupado em placa, consumo de energia, tempo de desenvolvimento de projeto e confiabilidade.

Uma vantagem inerente dos controladores digitais de sinais, utilizado nesse projeto, é o seu baixo custo, somado à presença de periféricos dedicados tal como o módulo de interface de *encoder* em quadratura que se mostrou muito eficiente nos experimentos.

Diante de toda essa discussão, talvez uma solução promissora que traria ótimos resultados seria mixar tecnologias diferentes em um mesmo projeto, ou seja, juntar as características positivas de cada uma com o intuito de se obter um circuito com performance superior. Fica, portanto, como sugestão para aqueles que optarem por continuar pesquisa neste campo, implementar um sistema controlador de motor de passo utilizando conjuntamente ambas as tecnologias DSC e CPLD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KUO, B. C. Theory and applications of step motors. 5.ed. Urbana, Illinois, West Publishing company, 1974.
- [2] KENJO, T. Stepping motors and their microprocessor controls. 1.ed. Oxford University Press, 1986.
- [3] CUNHA, H. Tipos e especificações de motores de passo. Revista Controle e Instrumentação, p. 24-32, Dezembro/83.
- [4] TECHNICAL ENGLISH - SPANISH VOCABULARY. Ilustração Alterada Motor de Passo V.R..
Disponível em:
<<http://www.sapiensman.com/ESDictionary/docs/d6.htm>>.
- [5] TECNOLOGIA ELETROMECAÂNICA. Apostila 1600.231.01 BR. Parker Automation. Outubro de 2006
- [6] ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES, UNIVERSIDADE DE COIMBRA. Actuação de um motor de passo.
Disponível em:
<http://aquarius.ime.eb.br/~pinho/micro/trabalhos/Mecatronica_TP1.pdf>.
Acesso em 20 de Outubro de 2007.
- [7] SAX H. Stepper Motor Driving. Application Note AN235, SGS – Thomson Microelectronics. 1995. Disponível em:
<<http://www.technologicalarts.com/myfiles/data/1679.pdf>>.
- [8] JONES D. W. Stepping Motors. The University Of Iowa Department of Computer Science. Ilustração alterada Motores Bipolares e Ponte H.
Disponível em:
<<http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/circuits.html>>.
- [9] TUTORIAL SOBRE MOTORES PASO A PASO. Ilustração Seqüência de fases.
Disponível em:
<<http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/stepper-tutorial.htm>>.
- [10] WEYMAR R. Motor de Passo. Eletrônica CEFET-RS.
Disponível em:
<<http://www.cefetrs.tcche.br/tro/alunos/motordepasso/toppage1.htm>>.

- [11] CUNHA, JR.H. Alimentação e controle de um motor de passo em malha fechada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 4., Campinas, 1982. Anais. Campinas, Unicamp, 1982, v.1, p.292-297.
- [12] STAFF. Closed-Loop Steppers: A Motion Control Alternative. Control Engineering Europe. September 1, 2005.
Disponível em:
<<http://www.controleng.com/article/CA6256106.html>>.
- [13] ENCODERS. Revista Mecatrônica Atual. Juliano Matias.
Disponível em:
<<http://www.mecatronicaatual.com.br/artigos/cnc/index.htm>>. Acesso em 29 de Outubro de 2007.
- [14] Introduction to Mechatronics and Measurement Systems. Useful Figures and Tables.
Disponível em:
<<http://www.engr.colostate.edu/~dga/mechatronics/figures/>>.
- [15] JONES D. W. Current Limiting for Stepping Motors. The University Of Iowa Department of Computer Science. Ilustração alterada Limitadores de Corrente Resistivos.
Disponível em:
<<http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/current.html>>.
- [16] MITRA, SUMIT. When MCUs and DSPs Collide: Digital Signal Controllers. Digital Signal Controller Division, Microchip Technology Inc. DSP-FPGA.com Product Resource Guide 2005.
Disponível em:
<<http://www.dsp-fpga.com/articles/id/?72>>
- [17] Microchip Technology. Disponível em: <http://www.Microchip.com>. Acesso em 25 de maio de 2007.
- [18] Oliveira, A. S. Sistemas Embarcados: hardware e o firmware na prática. 1. ed. São Paulo, Érica, 2006
- [19] dsPIC30F Family Reference Manual. Disponível em:
<http://ww1.Microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70046E.pdf>. Acesso em 3 de junho de 2007.
- [20] L6506D. Disponível em:
<www.ortodoxism.ro/datasheets/SGSThompsonMicroelectronics/mXyvus.pdf> Acesso em 15 de junho de 2007.

- [21] L6203. Disponível em:
<www.ortodoxism.ro/datasheets/stmicroelectronics/1373.pdf>. Acesso em 15 de junho de 2007.
- [22] MOTOR DE PASSO SM – 1.8 – D1 - SE.
Disponível em:
<<http://www.actionmotors.com.br/mot.8d1-se.htm>>. Acesso em 2 de Agosto de 2007.
- [23] HIN232. Disponível em:
www.datasheetsite.com/datasheet/HIN232. Acesso em 28 de Outubro de 2007.
- [24] Quick Assembly Two and Three Channel Optical Encoders, Technical Data. HEDM-550x/560x HEDS-50x/554x HEDS-560x/564x. Agilent Technologies.
Disponível em:
<<http://pdf1.alldatasheet.net/datasheet-pdf/view/88976/HP/HEDS-5640-E12.html>>.
- [25] Serial I/O (RS232) Using Delphi (RS232). Componente TcomPort..
Disponível em:
<http://mc-computing.com/languages/Delphi/Delphi_SerialIO.htm>.