

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

Fábio Takeshi Utida
Ronaldo Endo

**Sistema de posicionamento híbrido,
Manual e servo-assistido**

São Paulo
2006

Fábio Takeshi Utida

Ronaldo Endo

note final
9,9 (um e nove)
Ronaldo

Sistema de posicionamento híbrido,

Manual e servo-assistido

Trabalho de Formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia
Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para conclusão do curso de
Graduação em Engenharia Mecatrônica.

São Paulo

2006

Fábio Takeshi Utida

Ronaldo Endo

note final 9,9
(nove e nove)
Wny

**Sistema de posicionamento híbrido,
Manual e servo-assistido**

Trabalho de Formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia
Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para conclusão do curso de
Graduação em Engenharia Mecatrônica.

Curso:
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr.
Oswaldo Horikawa

São Paulo

2006

Endo
1574032

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600012459

1574032

Endo, Ronaldo

Sistema de posicionamento híbrido, manual e servo-assistido / R. Endo, F.T. Utida. -- São Paulo, 2006.

40 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

- 1. Sistemas de posicionamento dinâmico**
- 2. Servomecanismos**

3. Sistemas de controle I. Utida, Fabio Takeshi II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.t.

AGRADECIMENTOS

Ao professor doutor Oswaldo Horikawa, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Aos amigos Akira Takeyama, Ana Eun Mi Lee, Artur Yukio Sinzato e Carlos Augusto Ferreira Fernandes pelo apoio dado na execução deste trabalho.

Aos técnicos da oficina, em especial ao Cícero pelo auxílio dado na construção do protótipo.

Aos nossos familiares pelo incentivo dado durante toda a graduação.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento experimental de um projeto de um sistema de controle de posicionamento de precisão híbrido e servo-controlado. Este sistema de controle situar-se-ia entre o tradicional, totalmente manual, e de controle numérico computadorizado (CNC). Esse sistema de controle de posicionamento intermediário unirá as vantagens de ambos os métodos:flexibilidade, precisão e rapidez. Este será o escopo deste trabalho onde se projetará inicialmente um mecanismo de controle unidimensional sendo auxiliado por computador. Neste trabalho ainda se encontram os motivos para a realização desse projeto, os objetivos finais que se pretende alcançar, os métodos utilizados e os resultados obtidos.

Palavras-chave: Sistema de posicionamento, servo-sistema.

ABSTRACT

This work shows the experimental development of a prototype of a manual and servo-assisted hybrid positioning system. This system can be classified as an intermediate solution between the traditional fully manual system and the Computer Numerical Control (CNC) system. This intermediate system will gather the advantages of both methods. In order to achieve this objective, initially, a one-dimensional computer aided positioning system is developed. This work also shows the reasons for the accomplishment of this project, the final intended goal, the means to achieve it and the results obtained.

Keyword: Positioning system, servo-system

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão geral do dispositivo.....	4
Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema	5
Figura 3 – Esboço do sistema de movimentação.....	6
Figura 4 – Haste e pastilha de freio.....	7
Figura 5 – Apoios de sustentação	7
Figura 6 – Sistema de frenagem montado	8
Figura 7 – Curva de calibração do freio magnético	9
Figura 8 – Circuito de Acionamento	10
Figura 9 - Placa de interface de entradas e saídas digitais	12
Figura 10 – Encoder óptico	13
Figura 11 – Circuito Contador.....	14
Figura 13 – Carta de tempo para sentido anti-horário	14
Figura 14 – Sinais enviados pelo circuito contador para giro em sentido horário (esq.) e anti-horário (dir.)	16
Figura 15 – Sensor de intenção de movimento	17
Figura 16 – Fluxograma do software de controle	18
Figura 17 – Gráfico do deslocamento do bloco para as posições -10 mm (esq.) e 10 mm (dir.)	21
Figura 18 – Gráfico do deslocamento do bloco para as posições -20 mm (esq.) e 20 mm (dir.)	22
Figura 19 – Gráfico do deslocamento do bloco para as posições -50 mm (esq.) e 50 mm (dir.)	22
Figura 20 – Comparativo entre sistemas servo-assistido (esq.) e manual (dir.) para posição 10 mm.....	22
Figura 21 - Comparativo entre sistemas servo-assistido (esq.) e manual (dir.) para posição 20 mm.....	23
Figura 22 - Comparativo entre sistemas servo-assistido (esq.) e manual (dir.) para posição 50 mm.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valor das Resistências do Circuito	10
Tabela 2– Estágios de acionamento	11
Tabela 3 – Mapa de Endereços.....	12
Tabela 4 – Resultados dos Experimentos de Posicionamento.....	21
Tabela 5 – Comparativo de Desempenho de Tempo dos Sistemas.....	23
Tabela 6 – Posicionamentos a baixas velocidades	24
Tabela 7 – Teste comparativo para diferentes velocidades de avanço	26

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1. Motivação	2
2. Objetivos	3
3. Método	3
3.1. <i>Descrição geral do dispositivo</i>	4
3.2. <i>Diagrama de bloco</i>	5
3.3. <i>Descrição dos sub-sistemas</i>	6
3.3.1. Sistema de movimentação manual e apoio	6
3.3.2. Sistema de frenagem	6
3.3.3. Circuito de acionamento	9
3.3.4. Interface digital.....	11
3.3.5. Encoder.....	13
3.3.6. Circuito contador.....	13
3.3.7. Sensor de intenção de movimento.....	16
3.3.8. Software de controle e de interface com o usuário	18
4. Resultados	20
5. Discussão.....	24
6. Conclusão	27
7. Bibliografia.....	29
ANEXO 1 – Código Fonte do software de controle e interface.....	30

1. Introdução

A forma mais primitiva de controle de uma máquina é a manual, onde o operador pode controlar a velocidade de rotação, o avanço, etc. Para se chegar nas dimensões desejadas da peça o operador precisa realizar constantes medições e repetir o processo de usinagem até obter o valor desejado. Percebeu-se ao longo do tempo que o homem era incapaz de produzir peças com alto padrão de repetibilidade por um longo período de tempo.

Da necessidade de se produzir um alto volume de peças dentro de tolerâncias específicas, surgiram novas tecnologias que puderam substituir o controle manual de máquinas de usinagem. Quando os computadores passaram a fazer parte deste tipo de máquina, o seu controle recebeu a designação de comando numérico computadorizado ou controle numérico computadorizado (CNC).

Sob a ótica da produtividade, observa-se que os processos de controle citados podem diferir na sua capacidade de produção. Uma máquina CNC pode produzir um volume maior de peças com alto grau de repetibilidade para um determinado intervalo de tempo, comparada a uma de controle convencional (manual), já que as CNCs podem controlar os movimentos da ferramenta e/ou da peça de trabalho a uma velocidade maior. Além disso, as máquinas CNCs podem funcionar por um longo período de tempo de forma autônoma, ao contrário das máquinas convencionais que são limitadas pelo cansaço humano. Como resultado, para produzir um mesmo volume de peças, o método de controle manual dispende um tempo maior.

A capacidade de movimentação das guias, ferramentas de corte, peças de trabalho, etc em uma máquina convencional são limitadas pelas habilidades humanas. Dessa forma, para se obter movimentos precisos, o operador deve controlar cautelosamente o posicionamento dos itens citados acima para que possa ser atingida a precisão desejada e realizar a usinagem dentro das tolerâncias aceitáveis. Porém, tal requisito impõe um agravante, que seria o aumento do tempo gasto na usinagem da peça.

Porém deve-se levar em consideração os custos de produção envolvidos, que são maiores para as máquinas CNCs, tendo em vista a necessidade de uma mão-de-obra melhor qualificada e de dispositivos mais complexos para sua implementação.

Um outro aspecto relevante das máquinas CNCs é a necessidade da programação de toda a trajetória, de todos os passos e dos comandos a serem enviados para os atuadores, restringindo assim o processo de usinagem a um único caminho possível, pois as máquinas ainda não são providas de inteligência artificial para tomar decisões complexas por si só. No processo convencional, o operador tem a liberdade para escolher a trajetória da forma mais econômica e eficiente.

1. Motivação

Seria interessante se existisse um sistema intermediário entre o método convencional de usinagem e o CNC, que juntasse as vantagens de ambos os métodos, tais como:

- Movimentação precisa.
- Usinagem a altas velocidades.
- Baixo custo de operação e de implementação.
- Flexibilidade e versatilidade na otimização da escolha da trajetória de usinagem.

Esse sistema evitaria a necessidade do programa de controle do processo, bastando apenas fornecer o projeto da peça num sistema CAD. Dessa forma o equipamento reconheceria os contornos da peça que definiria uma “região proibida” além da qual a ferramenta de usinagem não poderia ultrapassar.

Outro fator que vale ressaltar é que nesse caso a automação do equipamento não dispensa a presença humana para que o processo seja realizado, de tal modo que ela não promove o desemprego, mas auxilia o ser humano a obter um melhor desempenho nessa atividade.

2. Objetivos

Diante da necessidade de um dispositivo de controle de posicionamento intermediário entre o manual e o CNC, tentaremos ao longo deste trabalho desenvolver um protótipo que atenda às características citadas acima e que possivelmente possa ser viável e aplicado comercialmente.

Devido às dificuldades de projeto e implementação em criar um protótipo de controle de posicionamento em duas dimensões, iniciaremos com a construção de um unidimensional.

Embora este ainda não possa ser utilizado em todo tipo de máquina, é possível encontrar aplicações para este dispositivo, como em trabalhos de furação de peças longas e esbeltas com furos alinhados. Este tipo de trabalho ocorre, por exemplo, em fusos de máquinas de corte de tecidos e de perfis estruturais.

3. Método

Para simplificar o desenvolvimento do projeto e a construção do respectivo protótipo, propôs-se uma arquitetura composta por oito subsistemas:

- Sistema de movimentação manual e apoio
- Sistema de frenagem
- Circuito de acionamento
- Interface digital
- Encoder
- Circuito Contador
- Sensor de intenção de movimento
- Software de controle e de interface com o usuário

Cada subsistema devido às suas características pode ser tratado de forma independente aplicando-se um método diferente no desenvolvimento de cada um deles.

Após desenvolver-se cada subsistema, realizaram-se testes preliminares individuais. A seguir foi feito, a integração dos subsistemas e realizado teste final do sistema integrado.

3.1. Descrição geral do dispositivo

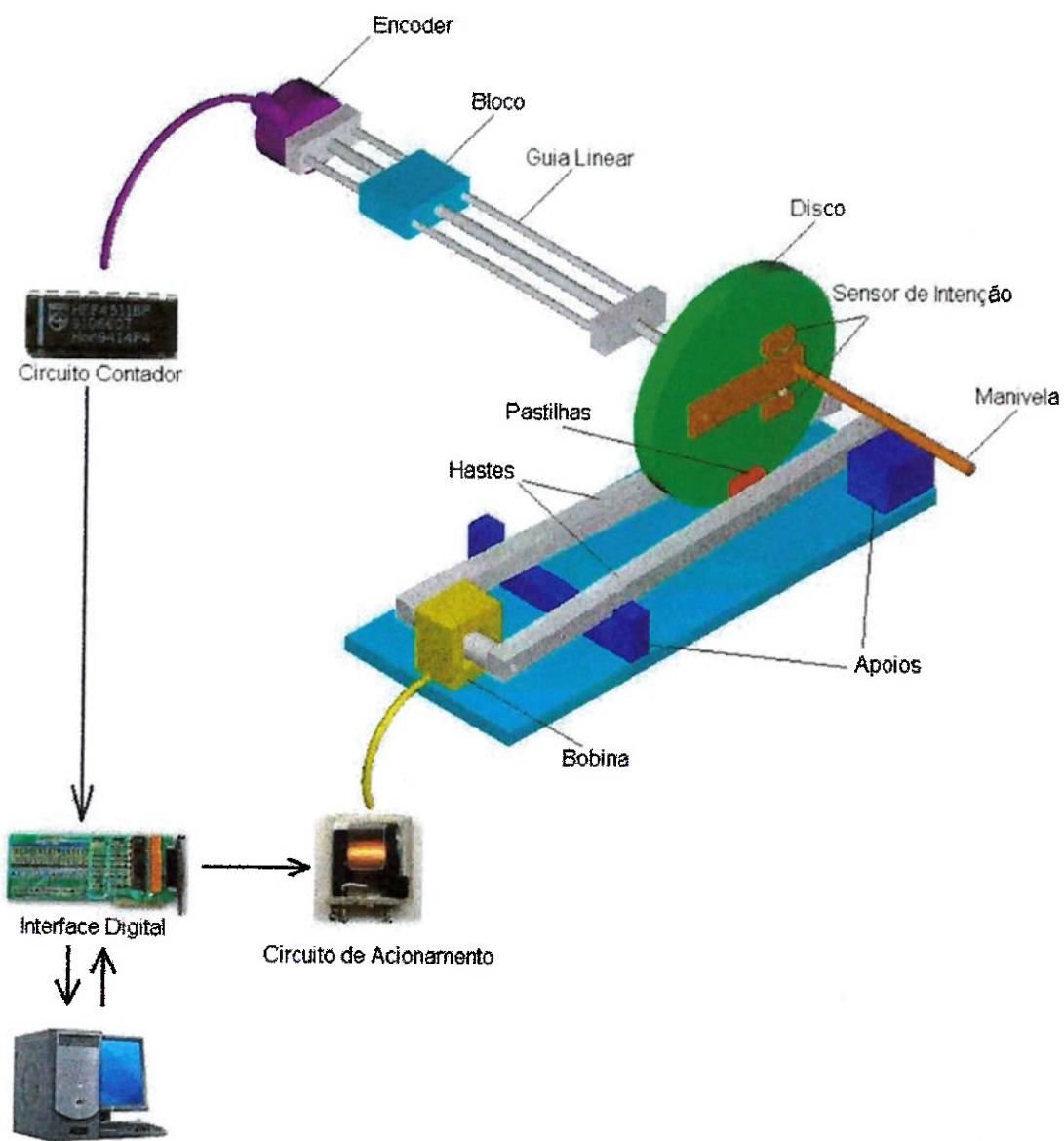


FIGURA 1 – VISÃO GERAL DO DISPOSITIVO

Inicialmente o operador da máquina entrará, por meio do software de interface, com a posição desejada de parada da ferramenta no **computador**. Assim, ao girar a **manivela**, operador irá impor o movimento do **bloco da guia linear**. O sistema fará a leitura da posição do bloco através do **encoder**, que por sua vez enviará os sinais de quadratura para um **circuito contador**, responsável pela transformação dos sinais em um sinal digital de cinco bits. Esses bits serão aquisitados pela **interface digital**, que controla a troca de informações do computador com os demais dispositivos.

Quando o bloco se aproximar da posição desejada o sistema de frenagem deve acionar a **bobina** de indução gradativamente através do **círculo de açãoamento**, baseado em relés. A bobina impõe um movimento de encontro entre as duas **hastes** que por fim acabam pressionando as **pastilhas** contra o **disco**, possibilitando um torque de frenagem. Quando a posição desejada for atingida o freio deve parar completamente o movimento imposto na manivela pelo operador.

Por fim observa-se o **sensor de intenção de movimento** cuja finalidade é inerente ao funcionamento deste dispositivo. O objetivo da máquina é evitar que o operador não ultrapasse uma determinada região de usinagem, que poderia ser a própria geometria da peça a ser usinada.

A partir deste ponto, o avanço não seria mais permitido; entretanto, o movimento no sentido oposto deveria ser permitido, o que não ocorre, pois o freio impede o movimento em ambos os sentidos. Com esse sensor seria possível detectar essa intenção do operador de retroceder da posição limite. Quando este sensor for ativado, enviaria um sinal de controle ao dispositivo para desativar o freio.

3.2. Diagrama de bloco

Abaixo segue o diagrama de blocos da arquitetura geral proposta:

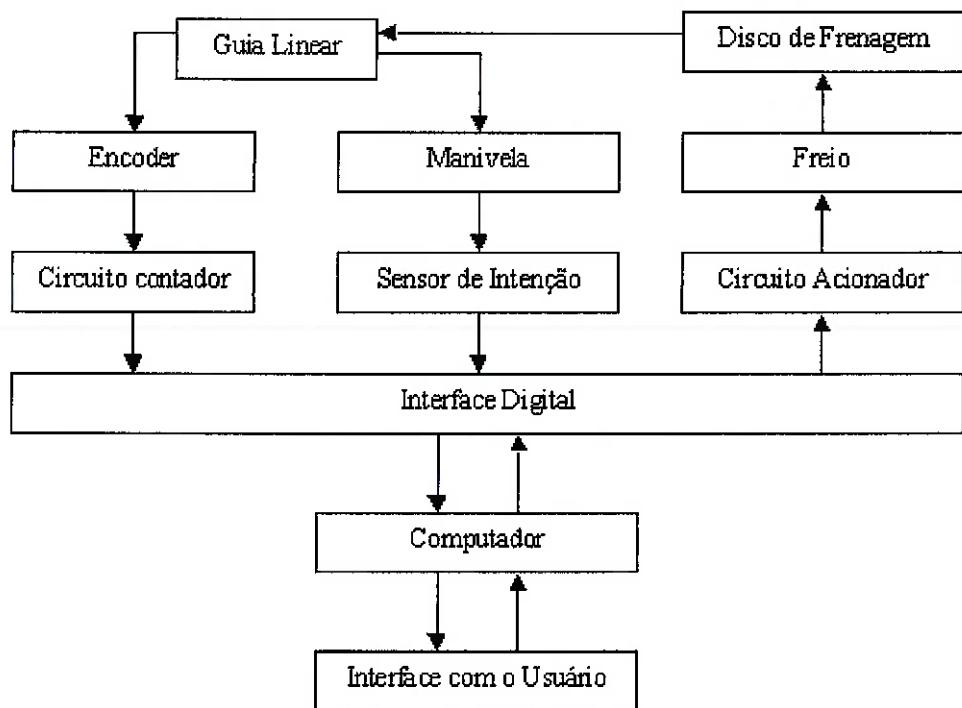


FIGURA 2 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA

A seguir descreveremos detalhadamente o funcionamento de cada um dos subsistemas a ser desenvolvido.

3.3. Descrição dos sub-sistemas

3.3.1. Sistema de movimentação manual e apoio

Consiste basicamente de uma guia linear, cujo posicionamento do bloco é o ponto de maior interesse. O movimento do bloco será realizado pelo giro do parafuso da guia que, acoplado a uma manivela, será acionado pelo operador da máquina.

A guia linear utilizada é do tipo de fuso de esfera recirculantes, cujo parafuso possui passo 10 mm/volta e comprimento útil de 400 mm. A guia está fixada à base por apoios localizados em suas extremidades. A altura destes apoios é limitada pelo diâmetro do disco acoplado à guia de forma a permitir a rotação da manivela.

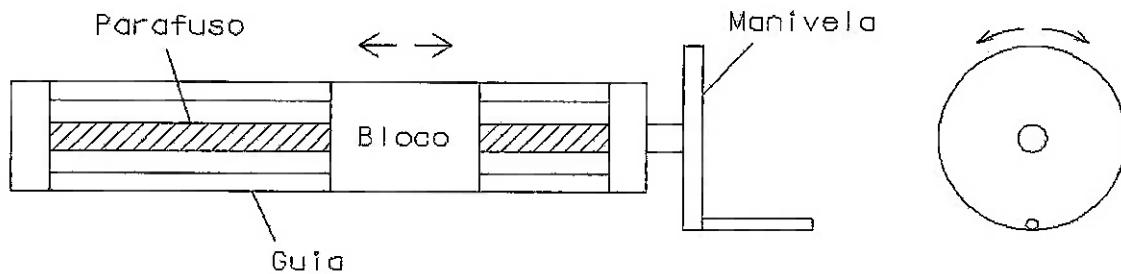


FIGURA 3 – ESBOÇO DO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

3.3.2. Sistema de frenagem

Para que o bloco da guia linear pare exatamente na posição indicada pelo operador será preciso um atuador que impeça o movimento rotativo do parafuso da guia linear. Para isso será necessário um mecanismo que se acople ao sistema de movimentação descrito acima. O atuador para esse sistema será implementado através de uma bobina eletro-magnética, cujo princípio de funcionamento seria basicamente controlar a corrente de indução e dessa forma controlar também a força de frenagem.

O sistema de frenagem é composto por:

- Bobina eletromagnética
- Hastes metálicas (2 peças)
- Pastilhas de freio (2 peças)
- Apoios de sustentação da haste

Abaixo segue figuras do sistema de frenagem:

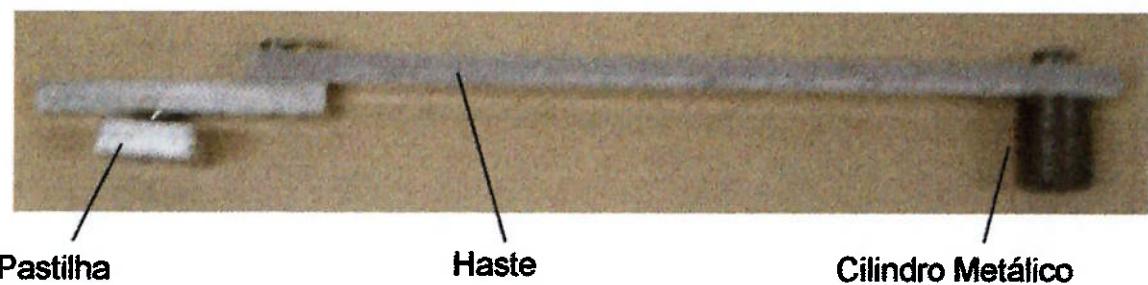


FIGURA 4 – HASTE E PASTILHA DE FREIO

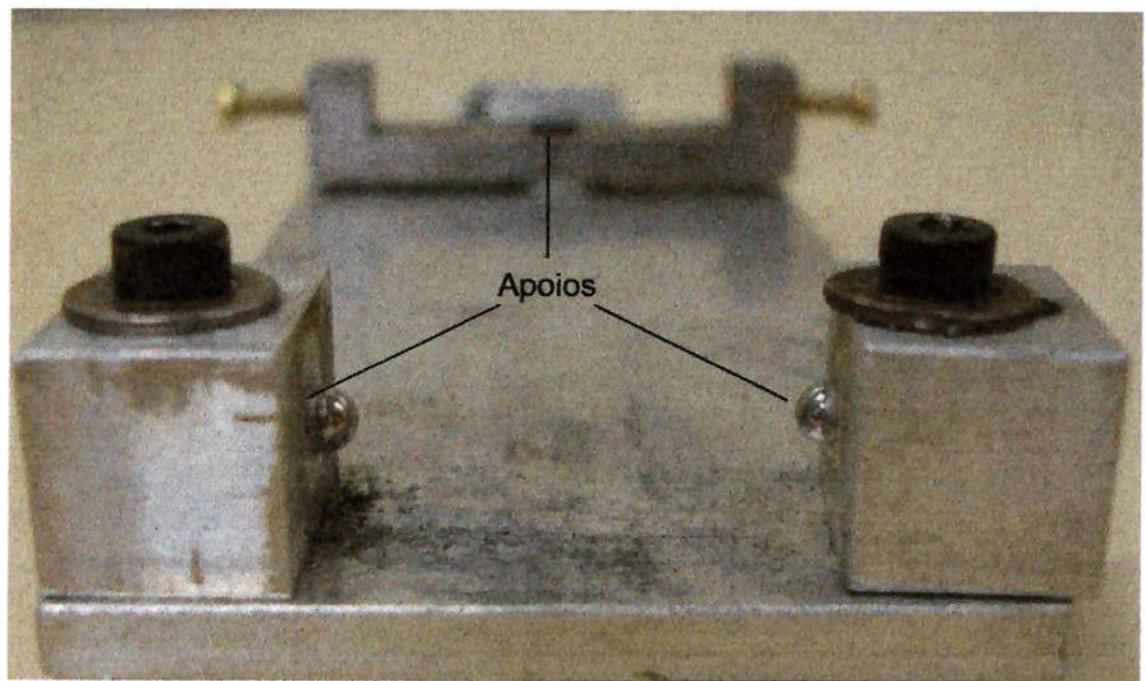


FIGURA 5 – APOIOS DE SUSTENTAÇÃO

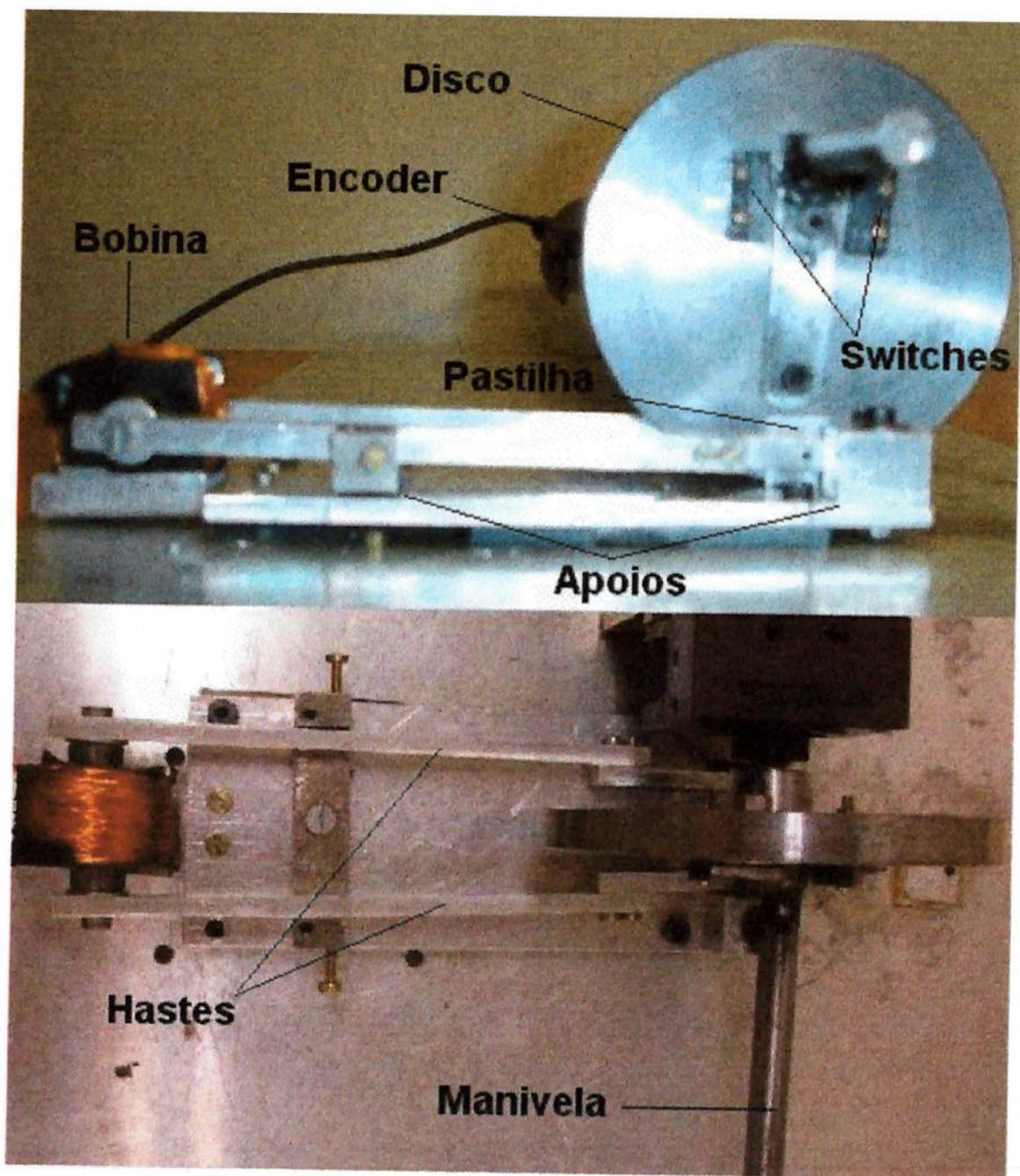


FIGURA 6 – SISTEMA DE FRENAGEM MONTADO

Como se pode perceber pela figura 4, em uma das extremidades de cada uma das hastes do freio há um cilindro metálico inicialmente desmagnetizado. Estes cilindros são encaixados dentro da bobina magnética enquanto as outras extremidades das hastes posicionam as pastilhas contra cada um dos lados do disco.

Na situação inicial, quando não há corrente passando pela bobina de indução

Na situação inicial, quando não há corrente passando pela bobina de indução e, portanto não há força magnética de atração entre os cilindros, as pastilhas não atritam contra o disco e este gira livremente.

Ao ligar-se o circuito de acionamento da bobina, esta induzirá um campo magnético que magnetizará os cilindros, criando uma força de atração entre eles. Esta força de atração será transmitida à outra extremidade, pressionando as pastilhas contra o disco e gerando uma força de atrito suficiente para diminuir gradativamente a velocidade do disco e por fim fazendo-o parar.

Testes realizados permitiram o levantamento da curva de calibração desse sistema, relacionando o torque de frenagem com a corrente de indução imposta na bobina, a ser mostrado a seguir:

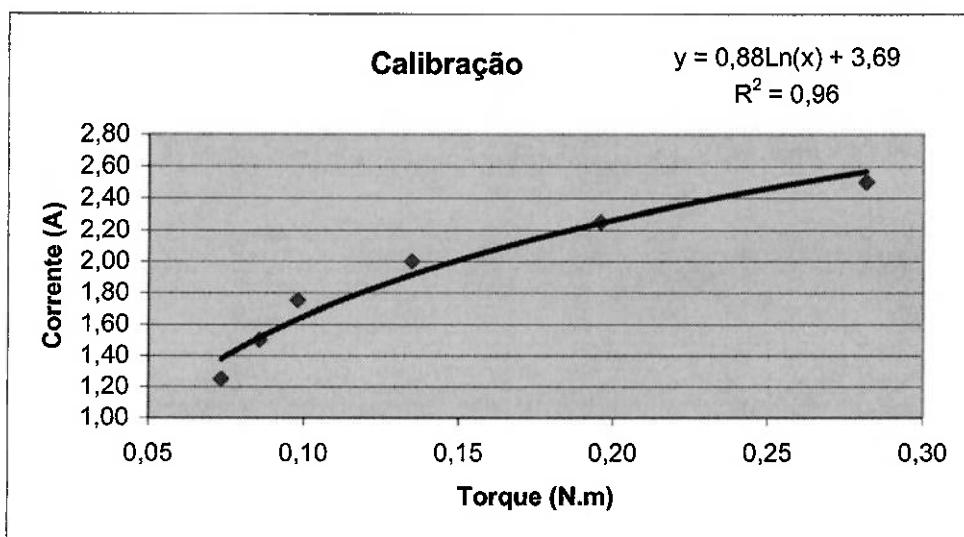


FIGURA 7 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO FREIO MAGNÉTICO

3.3.3. Circuito de acionamento

Este circuito tem por finalidade amplificar o sinal de controle do freio magnético enviado pelo computador por meio da placa de interface digital, fornecendo a corrente de indução para a bobina, garantindo a confiabilidade do sistema, caso contrário a precisão do posicionamento do bloco pode ser afetada.

Pode-se levantar a curva de calibração da força de frenagem pela corrente de indução da bobina, e assim frear gradativamente o movimento do bloco, de forma a conseguir um movimento mais suave ao invés de uma parada brusca.

A seguir tem-se o esquema elétrico proposto para o circuito de acionamento:

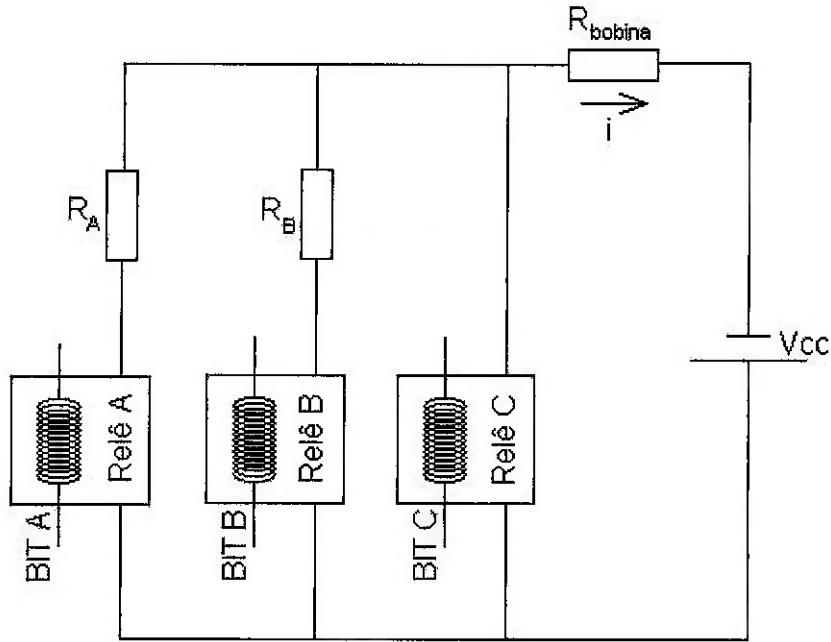


FIGURA 8 – CIRCUITO DE AÇÃOAMENTO

TABELA 1 – VALOR DAS RESISTÊNCIAS DO CIRCUITO

Resistência	Valor (Ω)
R_{bobina}	4,3
R_A	4,3
R_B	2,2

Os relês são acionados por um sinal de tensão nominal de 6 . O circuito é alimentado por uma tensão (Vcc) de 12V.

A força de frenagem é consequência da força de atração entre as hastes gerada pelo campo magnético na bobina, que é proporcional a corrente de indução. Logo a força de frenagem também será proporcional a corrente de indução.

Como o controle da corrente de indução da bobina será realizado pelo computador, o circuito de acionamento irá receber sinais bit a bit provenientes da interface digital que poderão alterar essa corrente. Do diagrama da figura 6 pode-se perceber que a lógica do circuito elétrico irá se basear em relés. Cada relé é controlado por um dos sinais do bit A, B ou C, que pode abrir ou fechar os seus respectivos contatos. O acionamento do freio será realizado em três estágios, pela combinação dos estados (um ou zero) de cada bit. Cada estágio corresponderá a um valor de corrente de indução da bobina.

TABELA 2– ESTÁGIOS DE ACIONAMENTO

	Corrente de indução	BIT A	BIT B	BIT C
1ºEstágio	0,50 i_{\max}	1	0	0
2ºEstágio	0,75 i_{\max}	1	1	0
3ºEstágio	i_{\max}	1	1	1

Inicialmente não há corrente na bobina, já que os contatos se encontram em normalmente abertos, portanto não há força de frenagem que impeça o giro do disco e consequentemente o movimento do bloco. À medida que o bloco se aproxima da posição desejada o circuito muda seqüencialmente de estágio. No 1ºestágio somente o bit A aciona o seu respectivo relé de tal forma que a corrente de indução da bobina é determinada pela resistência R_A . Se o valor dessa resistência for igual ao da resistência da bobina (R_{bobina}), a corrente de indução será igual a 50% da corrente máxima (i_{\max}). No 2º estágio os bits A e B acionam seus respectivos relés de tal forma que a resistência equivalente do circuito determinará uma corrente de indução cujo valor será de 75% da corrente máxima. Por último, no 3ºestágio, o bit C inutilizará as resistências R_A e R_B . Supondo que os fios são ideais, a corrente na bobina será máxima, assim como a força de frenagem que impedirá totalmente o movimento do bloco. Os valores das resistências utilizados são mostrados na tabela 1.

Notou-se que a corrente de indução da bobina a ser controlada apresentava valor relativamente elevado, sendo necessário à inclusão de resistores de elevada potência (aproximadamente 10W) e de relés capazes de suportá-la.

3.3.4. Interface digital

Como todo controle do sistema deverá ser realizado pelo computador é importante que os sinais de sensoriamento possam ser lidos por entradas digitais, e que os sinais de saída possam controlar o circuito de acionamento.

Serão utilizadas a porta paralela do computador e a placa de interface de entradas e saídas digitais ESD3201, ligada diretamente ao computador através do barramento ISA. Esta placa apresenta dezesseis entradas digitais, oito saídas de relés e oito saídas digitais.

Serão utilizadas cinco entradas digitais da porta paralela para a leitura dos sinais do circuito contador. Além disso, da placa de interface digital serão utilizadas

sinais do circuito contador. Além disso, da placa de interface digital serão utilizadas duas entradas digitais para o sensor de intenção de movimento e, para o circuito de acionamento da bobina, serão utilizadas três saídas de relés. Estas saídas permitirão o fechamento dos contatos dos relés A, B e C, externos a essa placa. A utilização em dois estágios para o acionamento dos relés foi preciso devida à alta corrente necessária para a indução da bobina, de cerca de 3A.

Os microcomputadores da família IBM PC permitem utilizar até 1024 endereços diferentes para dispositivos de E/S. Para a leitura de dados através da porta paralela será utilizado o endereço 379h. Por sua vez, a placa de interface ESD3201 possui quatro endereços de barramento, cujo endereço base é o 350h. Esses endereços são utilizados de acordo com a tabela a seguir:

TABELA 3 – MAPA DE ENDEREÇOS

	Endereços	Tipo	Funções
End. Base + 0	350h	Leitura	Entradas 1 a 8
		Escrita	Relés 1 a 8
End. Base + 1	351h	Leitura	Entradas 9 a 16
		Escrita	Saídas TTL
End. Base + 2	352h	Leitura	Relés 1 a 8
		Escrita	Reconhecimento de Interrupção
End. Base + 3	353h	Leitura	Saídas TTL

Abaixo segue a figura da placa de interface utilizada:

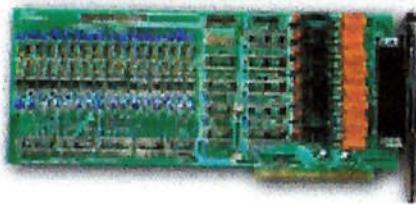


FIGURA 9 - PLACA DE INTERFACE DE ENTRADAS E SAÍDAS DIGITAIS

Com o compilador Turbo C 3.0 é possível acessar os endereços específicos com os comandos *inp* e *outp*. A porta paralela apresentou melhor desempenho na aquisição de sinais de alta freqüência, e por isso foi utilizada para obter o sinal

proveniente do circuito contador. Já a placa de interface foi implementada para obter o sinal do sensor de intenção de movimento, cuja freqüência do sinal não é tão crítica para ser detectada, e também para realizar o controle do freio, cuja implementação é mais simples devido as suas características.

3.3.5. Encoder

O tipo de encoder a ser utilizado será o rotativo e incremental. O encoder, acoplado ao parafuso da guia linear, será capaz de indicar a posição do bloco com precisão considerável, tornando possível o controle do sistema em malha fechada. A resolução do encoder também é outro ponto importante tendo em vista que ele irá interferir na precisão do equipamento a ser montado.

O encoder utilizado terá resolução de 2500 bits/volta e será alimentado por uma tensão de 5V.

O encoder será acoplado no parafuso da guia do lado oposto ao qual foi acoplada a manivela para evitar que erros de deformação causados por um torque excessivo alterem o resultado.

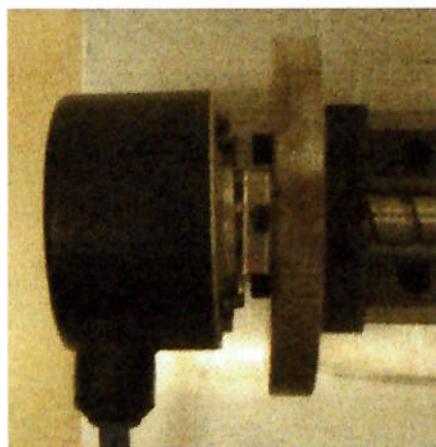


FIGURA 10 – ENCODER ÓPTICO

3.3.6. Circuito contador

Este circuito será responsável pela contagem dos pulsos enviados pelo encoder, que por sua vez envia os dados referentes a essa contagem para o computador. Dessa forma o computador pode interpretar esse sinal e saber qual é a posição do bloco da guia linear.

Abaixo segue o diagrama lógico do circuito contador:

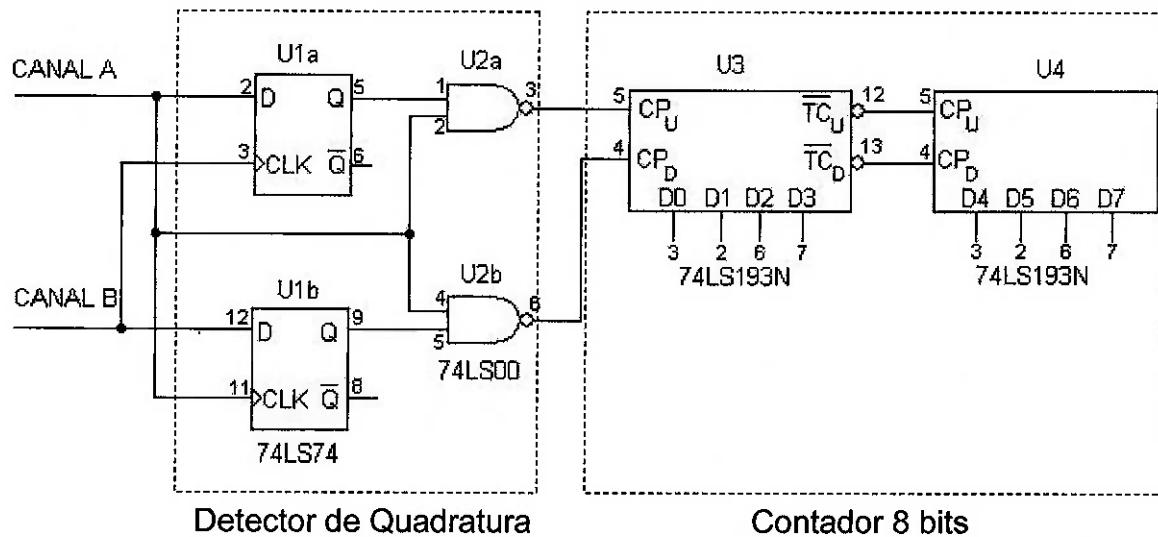


FIGURA 11 – CIRCUITO CONTADOR

A princípio utilizaram-se dois flip-flops tipo D (74LS74) e as portas lógicas NAND (74LS00) que geraram os sinais de clock de *UP/DOWN* que indicam os sentidos de rotação da manivela (horário ou anti-horário). A seguir observam-se as cartas de tempo com os sinais do encoder em quadratura (A e B) nos dois sentidos (horário e anti-horário) e seus respectivos sinais de *UP/DOWN*.

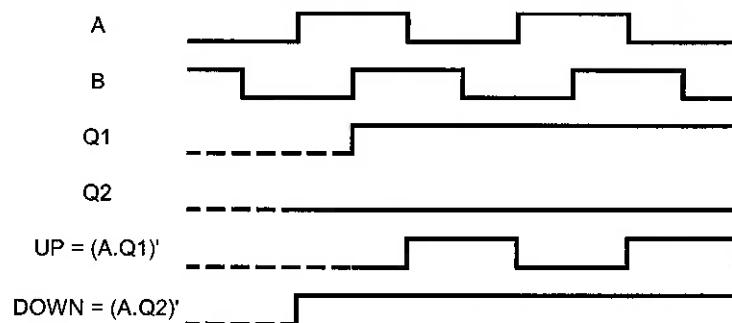


Figura 12 – Carta de tempo para sentido horário

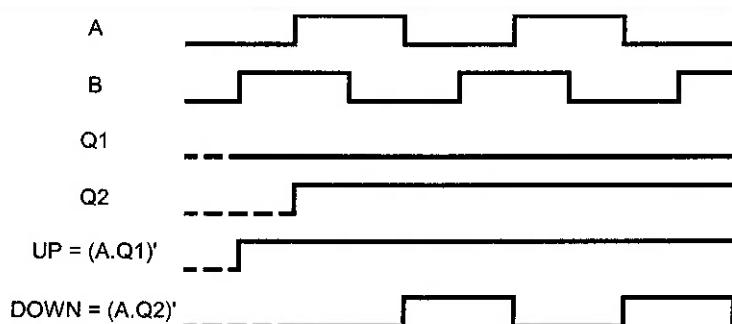


FIGURA 13 – CARTA DE TEMPO PARA SENTIDO ANTI-HORÁRIO

Por sua vez, os contadores (74LS193N) serão capazes de transformar os sinais de clock em um sinal de oito bits referentes à posição angular da manivela. Estes sinais são aquisitados pela porta paralela que através do software de controle e interface informará a posição exata do bloco ao operador.

Apesar do circuito contador disponibilizar um sinal de oito bits, serão descartados os dois bits menos significativos e o bit mais significativo, o que reduz a resolução efetiva do encoder para 625 bits/volta e o máximo valor que pode ser lido pela porta paralela antes de ocorrer o “overflow” para 32 pulsos.

Considerando que o passo da guia linear é de 10 mm/volta, esta resolução limitará a precisão mínima do equipamento em 0,016 mm.

Com o software adequado foi possível contornar o problema do overflow contanto que, sob a máxima velocidade de movimentação do bloco da guia, o mínimo intervalo de tempo entre duas aquisições de dados do computador para verificar a posição do bloco fosse respeitada. Como o overflow ocorre quando o contador atingir o valor de 32 pulsos contabilizados, divide-se esse valor em 2 trechos, de 0 a 16 e de 17 a 32. Para verificar que o overflow ocorreu de 32 para 0 (sentido positivo), deve-se garantir que a penúltima leitura do circuito contador esteve no segundo trecho, e a última leitura no primeiro trecho. Vice-versa para o overflow de 0 para 32. Então, deve-se garantir a que a freqüência de amostragem seja alta o suficiente para que duas leituras consecutivas não ultrapassem a diferença de 16 pulsos. De acordo com a análise dimensional a seguir, obtém-se o tempo de amostragem, que é o inverso da freqüência desejada.

$$T_{amostragem} = 16 \text{ pulsos} \cdot \underbrace{\frac{1 \text{ volta}}{625 \text{ pulsos}}}_{\text{Resolução do encoder}} \underbrace{\frac{10 \text{ s}}{44 \text{ voltas}}}_{\text{Máxima Velocidade de Rotação}} \cong 6 \text{ ms} \quad [1]$$

A leitura das posições era realizada a medida que o software de controle a solicitava. Pode-se observar que não houve intervalo de tempo maior que o estipulado para duas leituras consecutivas através da contabilização dos clocks do computador, dividido pela freqüência de trabalho do mesmo.

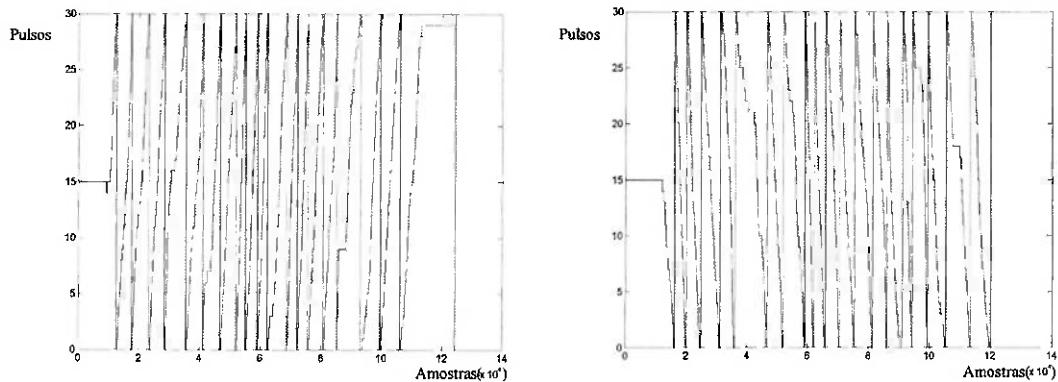


FIGURA 14 – SINAIS ENVIADOS PELO CIRCUITO CONTADOR PARA GIRO EM SENTIDO HORÁRIO (ESQ.) E ANTI-HORÁRIO (DIR.)

A figura acima mostra os gráficos dos sinais enviados pelo circuito contador para um deslocamento de 10 mm (figura a direita), correspondente a um giro em sentido horário, e um deslocamento de – 10 mm (figura a esquerda), correspondente a um giro em sentido anti-horário. Pode-se observar que o circuito realiza a somatória dos pulsos até atingir o overflow, neste momento o circuito é zerado e recomeça-se a contagem. O software implementado reconhece e compensa o overflow de modo obter um resultado contínuo, como poderão ser vistos nos gráficos apresentado no item 5.

3.3.7. Sensor de intenção de movimento

A finalidade deste dispositivo é indicar ao computador qual o sentido de movimento do bloco da guia linear. Assim, pode-se restringir o movimento apenas em um sentido, dando ao operador a liberdade de manusear o posicionamento do bloco em qualquer parte da região permitida, caso contrário uma vez que ele atinja o limite permitido, o freio impediria o movimento em qualquer um dos sentidos. Utilizar a manivela é o meio mais sensato para se implementar esse tipo de dispositivo, pois a ela é controlada pelo operador, e é ele quem decide o sentido de movimentação.

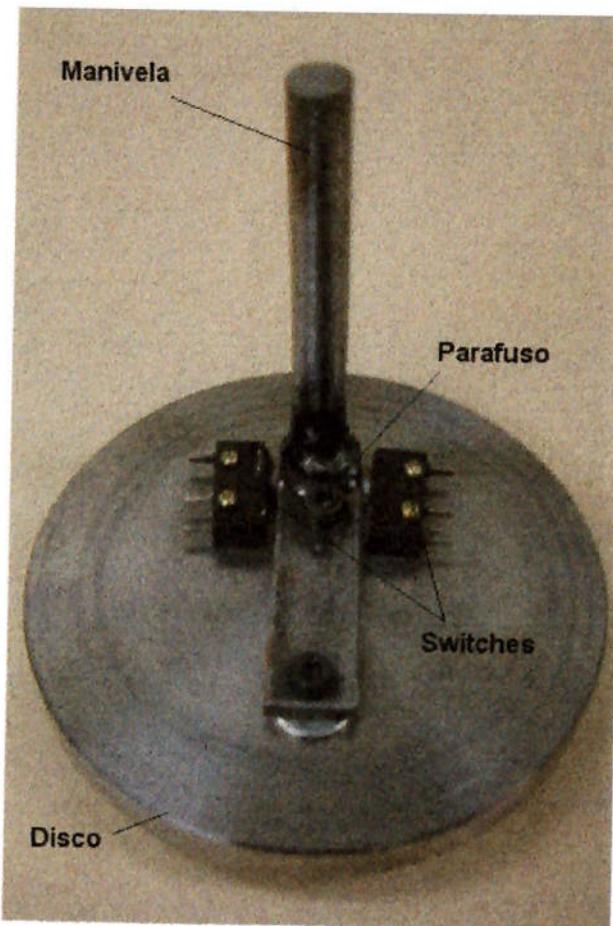


FIGURA 15 – SENSOR DE INTENÇÃO DE MOVIMENTO

Como se pode ver na figura acima, cada um dos “switches” verifica a intenção de movimento em um dos sentidos. Inicialmente a manivela está no centro do disco e nenhum dos switches está acionado. Ao girar a manivela, ela acionará o switch correspondente ao sentido de rotação que enviará um sinal ao computador. Assim, pode-se saber para qual lado o bloco irá se movimentar de acordo com a vontade do usuário. Além disso, é possível observar um parafuso que se encaixa ao disco e está localizado no meio da haste que segura a manivela num furo de diâmetro maior. Ele serve para limitar a rotação desta haste e para evitar que os esforços recaiam totalmente sobre os “switches”, o que pode danificá-los.

3.3.8. Software de controle e de interface com o usuário

Por fim, deverá ser feito um programa capaz de interpretar os dados enviados pelos dispositivos de sensoriamento descritos acima e dados de comando do operador, de modo a enviar a resposta adequada para os atuadores. Além disso, o programa deverá apresentar uma interface com o usuário, indicando o posicionamento do bloco da guia linear e apresentando o campo correspondente para que o operador possa enviar os dados específicos para tarefa que ele irá realizar.

A seguir, o fluxograma proposto para o funcionamento do programa:

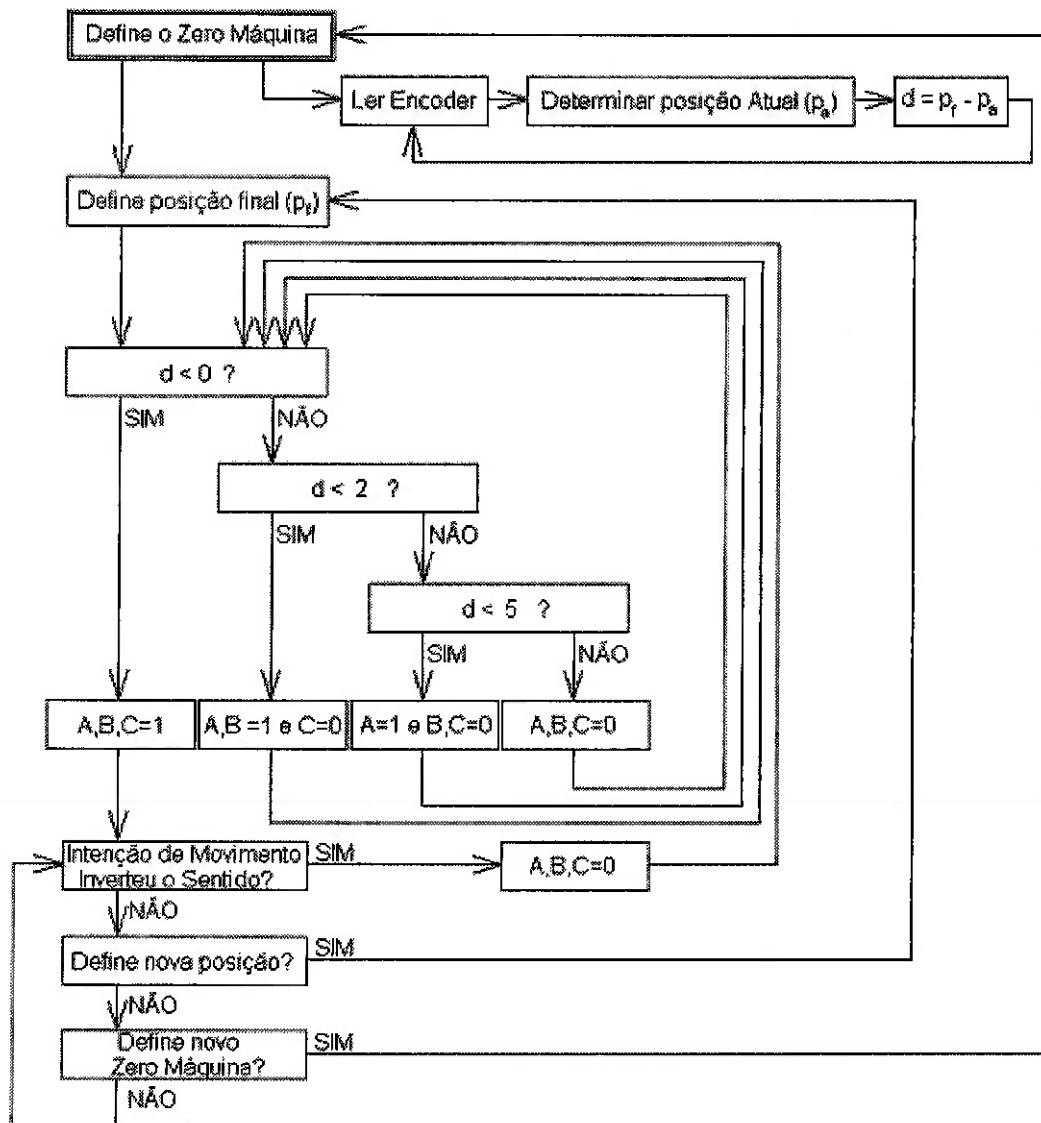


FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DO SOFTWARE DE CONTROLE

Para gerar o código fonte do programa foi utilizado o compilador Turbo C 3.0, com a execução em ambiente Windows 98. Esse sistema operacional possibilita o acesso direto ao endereço de barramentos via software, o que facilita sua comunicação com o hardware deste projeto.

O código fonte do programa está disponível em anexo com comentários pertinentes ao seu funcionamento.

4. Resultados

Com a integração e a montagem do dos subsistemas concluídas realizou-se os testes finais para averiguar a eficácia do conjunto, composto por partes mecânicas, eletrônicas e do software desenvolvido.

A princípio verificou-se o funcionamento do encoder acoplado ao sistema de movimentação. Então, os sinais enviados ao circuito contador puderam ser lidos e processados de forma adequada pelo computador para exibir a posição exata da guia linear.

Em seguida analisou-se a precisão do sistema de posicionamento ativando-se o freio-magnético. De acordo com o propósito deste projeto, o usuário é quem define a posição de parada. Para efeitos de comparação, optou-se por seis posições diferentes de parada de -50, -20, -10, 10, 20 e 50 mm, a partir de um sistema de referência adotado. Para cada uma dessas posições de parada, a partir da posição inicial adotada, girou-se a manivela e acompanhou-se a posição linear o bloco pelo computador, por meio do software de controle e interface, cuja velocidade média de avanço esteve em torno de 720 mm/min. Conforme previsto no projeto, o movimento do bloco era desacelerado a medida que este se aproximava do objetivo até que este parou totalmente em uma determinada posição. Repetiu-se esse procedimento dez vezes para cada uma das situações citadas anteriormente, de modo a obter uma média e que pudesse ser comparada com a posição de parada previamente definida. Por meio desta comparação é possível estimar a precisão do sistema, ou seja, o erro entre a posição encontrada e a desejada. Além disso, um outro parâmetro importante de análise é o desvio padrão da amostra, que indica a repetibilidade do sistema de posicionamento.

A seguir, observa-se a tabela com os resultados obtidos:

TABELA 4 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE POSICIONAMENTO

Valores Obtidos	Posições de Parada (x)					
	- 50mm	-20mm	-10mm	10mm	20mm	50mm
1	-50,02	-20,34	-10,06	10,10	20,02	50,13
2	-50,02	-20,11	-10,00	10,13	19,84	50,03
3	-50,02	-20,29	-9,90	9,82	19,79	50,22
4	-50,45	-20,32	-10,19	10,16	20,11	50,00
5	-50,02	-20,45	-9,76	9,87	20,24	50,22
6	-50,18	-20,32	-10,38	10,06	20,24	50,22
7	-50,14	-20,00	-10,05	10,19	20,08	50,26
8	-50,05	-20,13	-10,24	10,13	20,19	50,03
9	-50,19	-20,29	-10,00	10,16	20,96	50,16
10	-50,22	-20,34	-9,87	10,08	20,27	50,05
x (em mm)	-50,13	-20,26	-10,05	10,07	20,17	50,13
σ (em mm)	0,14	0,13	0,19	0,12	0,32	0,10
$ x - \bar{x} $ (em mm)	0,13	0,26	0,05	0,07	0,17	0,13
$\frac{ x - \bar{x} }{\bar{x}}$ (em %)	0,26%	1,29%	0,46%	0,70%	0,87%	0,27%

Os gráficos a seguir mostram exemplos de deslocamento do bloco ao longo do tempo para cada uma das situações simuladas.

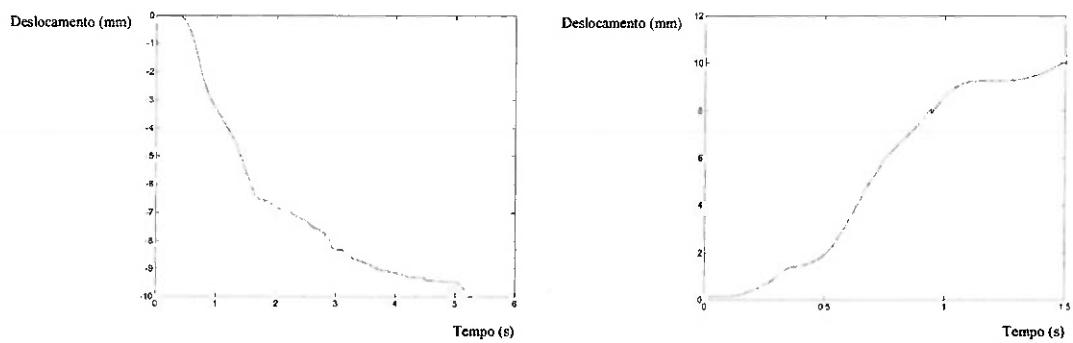


FIGURA 17 – GRÁFICO DO DESLOCAMENTO DO BLOCO PARA AS POSIÇÕES -10 MM (ESQ.) E 10 MM (DIR.)

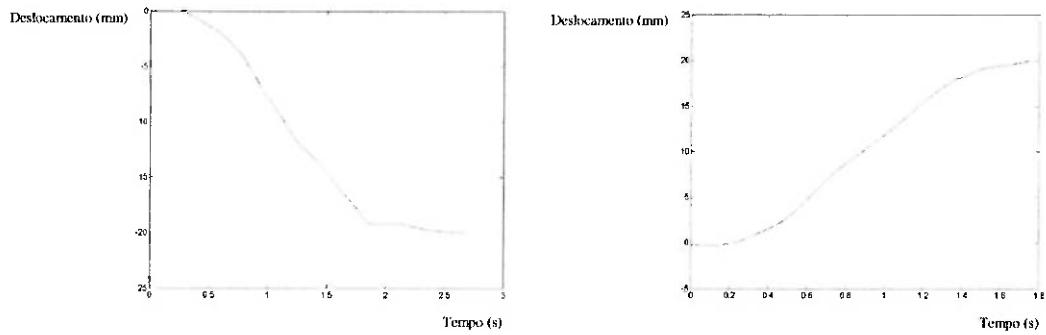


FIGURA 18 – GRÁFICO DO DESLOCAMENTO DO BLOCO PARA AS POSIÇÕES -20 MM (ESQ.) E 20 MM (DIR.).

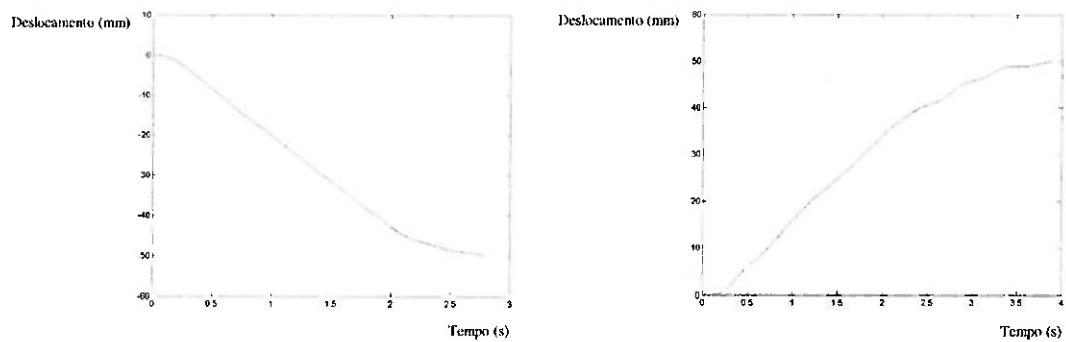


FIGURA 19 – GRÁFICO DO DESLOCAMENTO DO BLOCO PARA AS POSIÇÕES -50 MM (ESQ.) E 50 MM (DIR.).

Conforme citada anteriormente, uma das vantagens do sistema servo-assistido é a movimentação rápida e precisa quando se comparada à movimentação do sistema manual. Para averiguar esta vantagem, pode-se observar o tempo necessário para se posicionar o bloco em cada um dos sistemas, comparando-os para as posições 10, 20 e 50 mm. Abaixo seguem os gráficos comparativos obtidos. A linha tracejada indica o momento em que a posição final desejada foi atingida.

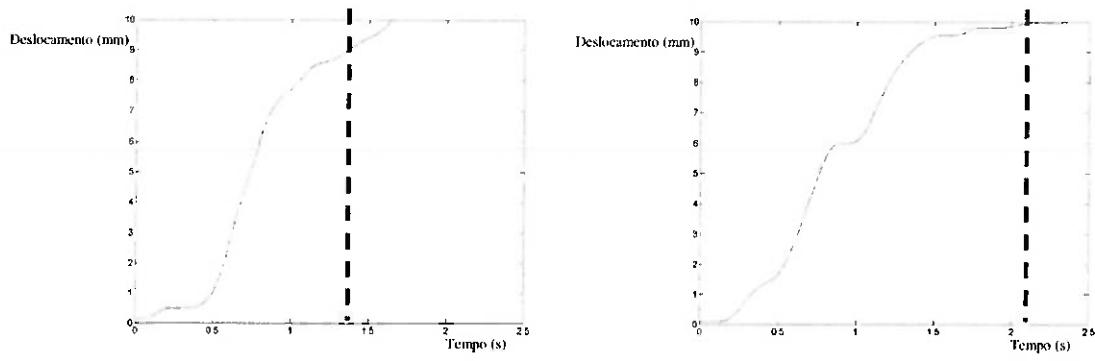


FIGURA 20 – COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS SERVO-ASSISTIDO (ESQ.) E MANUAL (DIR.) PARA POSIÇÃO 10 MM.

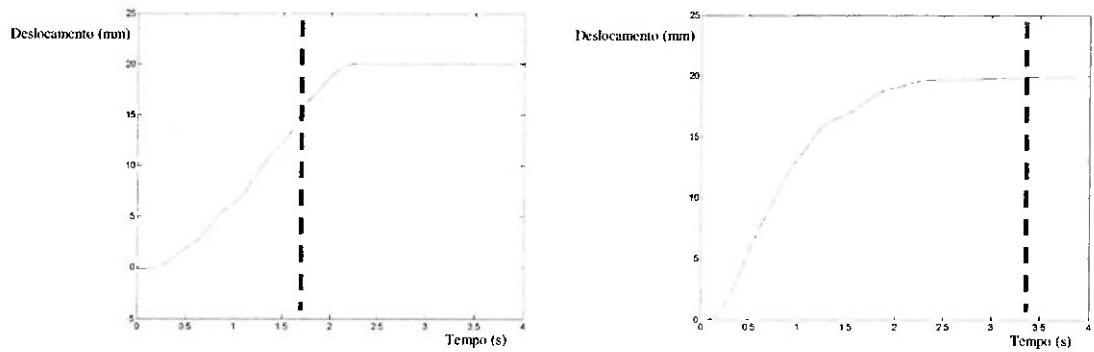


FIGURA 21 - COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS SERVO-ASSISTIDO (ESQ.) E MANUAL (DIR.) PARA POSIÇÃO 20 MM.

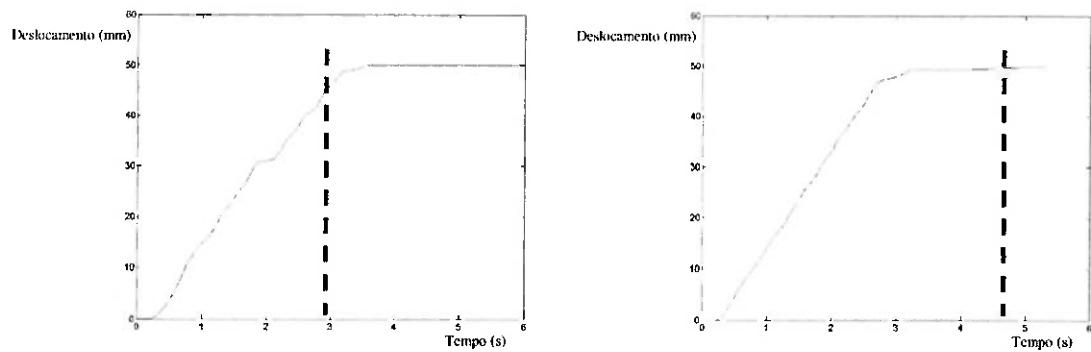


FIGURA 22 - COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS SERVO-ASSISTIDO (ESQ.) E MANUAL (DIR.) PARA POSIÇÃO 50 MM.

Tendo visto as figuras acima, os tempos para o posicionamento em cada um dos sistemas são resumidos na tabela a seguir.

TABELA 5 – COMPARATIVO DE DESEMPENHO DE TEMPO DOS SISTEMAS

Posição (em mm)	Tempo (s)		Diferença (s)
	Servo-assistido	Manual	
10,00	1,7	2,4	0,7
20,00	2,2	3,7	1,5
50,00	3,6	5,2	1,6
Média			1,3

Também foram realizados testes de posicionamento com o servo-sistema ativado impondo-se uma velocidade de movimentação menor. Dessa forma pode-se verificar a influência da velocidade de avanço sobre a precisão do sistema. A velocidade média de avanço estimada para essa situação foi em torno de 300 mm/min. A seguir são apresentados os resultados obtidos:

TABELA 6 – POSICIONAMENTOS A BAIXAS VELOCIDADES

Valores Obtidos	Posição de Parada (x)		
	10mm	20mm	50 mm
1	10,064	20,080	50,080
2	10,032	20,096	50,080
3	10,032	20,064	50,160
4	10,096	20,032	50,176
5	10,048	20,064	50,016
6	10,048	20,032	50,064
7	10,048	20,032	50,096
8	10,016	20,016	50,048
9	10,096	20,000	50,096
10	10,048	20,048	50,160
\bar{x} (em mm)	10,05	20,05	50,10
σ (em mm)	0,03	0,03	0,05
$ x - \bar{x} $ (em mm)	0,05	0,05	0,10
$\frac{ x - \bar{x} }{x}$ (em mm)	0,53%	0,23%	0,20%

5. Discussão

De acordo com os resultados dos testes pode-se avaliar a precisão de acordo com a velocidade de avanço e o tempo de posicionamento do sistema servo-assistido.

Pelos gráficos de deslocamento do bloco (figuras 17, 18 e 19) pode-se acompanhar o movimento ao longo do tempo e perceber os momentos em que o bloco é desacelerado gradativamente nas posições pré-estabelecidas, quando o bloco está a uma distância de 5 e 2 mm da posição final desejada. Esta desaceleração pode ser observada verificando a mudança da inclinação da curva nestas posições. Além disso, esta característica é válida para o movimento em qualquer distância e direção de movimento.

Na tabela 4 pode-se ver que os erros absolutos apresentaram valores próximos cuja média foi de 0,14 mm. Este erro está relacionado com a precisão do sistema de posicionamento servo-assistido, cuja resolução pode ser estimada para dois décimos de milímetro.

Obviamente esse sistema não pode ser aplicado para máquinas de alta precisão já que essa resolução apresentada está aquém do esperado para as máquinas desse tipo. Contudo, para operações que não requerem esse tipo de precisão o sistema de posicionamento servo-assistido é satisfatório, como por exemplo, em máquinas de furação de barras esbeltas e longas, com furos alinhados. Nesse tipo de operação o erro do posicionamento não é um fator relevante tendo em vista que o próprio erro causado pela broca ao furar a barra é maior.

Um dos motivos para a baixa precisão alcançada pode ser atribuído ao sistema de frenagem utilizado no projeto. O tempo de resposta desde o comando enviado pelo software de controle até sua atuação mecânica no disco de frenagem é um dos fatores críticos. Além disso, o circuito de acionamento baseado em relês implementado não atua de forma linear, mas por estágios de acionamento, que torna a frenagem mais brusca. Os componentes mecânicos do sistema de frenagem (hastes, pastilhas, disco e apoio) apresentavam problemas, pois as folgas existentes inviabilizavam os seus correto funcionamento atodo momento.

Na tabela 5 comparam-se os tempos de posicionamento que o usuário levaria utilizando o sistema servo-assistido e o manual. Há um ganho médio considerável de 1,3 segundos por operação. Essa diferença de tempo é devido ao fato de no sistema de posicionamento manual, ao se aproximar da posição final desejada, o operador deve realizar uma movimentação lenta e fina do bloco até que este atinja a posição desejada. Isto pode ser comprovado pelos gráficos de deslocamento do sistema manual (figuras 20, 21 e 22). Caso essa operação fosse a de furação de 50 pontos em posições diferentes, haveria um ganho médio de mais de um minuto por operação.

Por fim, comparando-se os resultados obtidos com o sistema de movimentação servo-assistido a diferentes velocidades de avanço (tabelas 4 e 6) é possível dizer que o sistema implementado no projeto apresenta uma melhora significativa na precisão e na acurácia, se a velocidade avanço imposta na movimentação for reduzida. Observe a tabela a seguir:

TABELA 7 – TESTE COMPARATIVO PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE AVANÇO

	10 mm (x)		20 mm (x)		50 mm (x)	
	lento	rápido	lento	rápido	lento	rápido
\bar{x}	10,053	10,070	20,046	20,174	50,098	50,133
σ	0,03	0,12	0,03	0,32	0,05	0,10
$ x - \bar{x} $	0,05	0,07	0,05	0,17	0,10	0,13
$\frac{ x - \bar{x} }{x}$	0,53%	0,70%	0,23%	0,87%	0,20%	0,27%

Os erros absolutos observados no “posicionamento lento” mostram que a baixas velocidades a precisão do sistema aumenta, com um erro estimado em torno de 0,05 mm. O desvio padrão das amostras também diminui, indicando que a repetibilidade do sistema também aumentou. De fato pode-se mostrar que o sistema é capaz de atingir uma elevada precisão baseado nos dados acima desde que respeitada uma certa velocidade de avanço.

6. Conclusão

Como pode ser visto neste relatório, ao longo desse trabalho desenvolveu-se o projeto conceitual do protótipo, incluindo o levantamento dos requisitos funcionais, a definição dos mecanismos de sensoriamento e controle, para poder ser implementado com sucesso.

O método utilizado foi inicialmente dividir o projeto em subsistemas, desenvolvê-los separadamente e realizar testes individuais. Posteriormente houve a fase de integração dos subsistemas, realizando testes preliminares para que eventuais correções fossem realizadas a fim de se atingir os objetivos e os requisitos de projeto levantados anteriormente.

Os resultados obtidos com relação à precisão desse dispositivo indicam a necessidade de uma melhora no sistema de frenagem para se garantir um tempo de resposta menor, assegurando a frenagem completa do sistema de movimentação no tempo adequado.

Observando também o circuito de acionamento desse sistema de posicionamento servo-assistido notou-se que os estágios de acionamentos baseados em relês não permitem um controle refinado da corrente de indução da bobina, que torna as frenagens bruscas. Se fosse utilizado um circuito baseado em pontes H, por exemplo, controlando mais precisamente a corrente de indução da bobina, evitar-se-ia que a frenagem do sistema de movimentação fosse tão brusca, tendo um controle maior sobre o sistema de frenagem até sua parada completa.

Contudo, baseado nos resultados obtidos, para uma velocidade de avanço menor, o sistema de posicionamento torna-se mais preciso e acurado. isso mostra que é possível se atingir uma precisão elevada com esse sistema, que é o objetivo desse projeto.

O tempo necessário para se posicionar o bloco da guia linear nesse tipo de sistema apresentou benefícios significativos para o usuário, já que não seria mais preciso uma movimentação lenta e precisa para atingir a posição final desejada, mostrando a eficácia do dispositivo no ganho de tempo.

Desta forma observa-se que o sistema de posicionamento proposto é aplicável em algumas situações práticas tais como:

- Furação de barras esbeltas com furos alinhados
- Eixos de máquinas de tecelagem.

Por fim, conclui-se que a premissa básica deste projeto de um dispositivo flexível, de baixo custo e de relativa precisão que realize o posicionamento segundo a estratégia proposta é possível de ser implementado baseado no dispositivo físico montado e no código de controle desenvolvido. O trabalho desenvolvido abre oportunidades de melhoria para o projeto, principalmente em relação ao dispositivo de frenagem e no circuito de acionamento para que de fato possa ser realizado o posicionamento a altas velocidades e alta precisão.

7. Bibliografia

1. A BIBLIOTECA VIRTUAL DO ESTUDANTE BRASILEIRO - Curso Profissionalizante [on-line]. [08-04-20068]. Disponível em <http://bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursoprofissionalizante/tc2000/tecnico.html>.
2. ROGERCOM PESQUISA E DESENVOLVIMENTO [on-line] [19-06-2006]. Disponível em <<http://www.rogercom.com>>.
3. MANUAL DO USUÁRIO E REFERÊNCIA TÉCNICA – ESD3201 – Entrada/Saída Digital para microcomputadores IBM PC/XT/AT – Elaborado por Lynx tecnologia Eletrônica LTDA.
4. Costa Neto, Pedro Luiz de Oliveira – ESTATÍSTICA - 2. ed. revista e atualizada - São Paulo : Edgard Blücher, 2002.
5. Slocum, Alexander H. - PRECISION MACHINE DESIGN - Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, 1992.
6. Schildt, Herbert - USING TURBO C++ - Berkeley : Osborne McGraw-Hill, 1990.
7. Gajski, Daniel D. - PRINCIPLES OF DIGITAL DESIGN - Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, 1997.
8. R. L. Norton - MACHINE DESIGN AN INTEGRATED APPROACH - Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, 1998

ANEXO 1 – Código Fonte do software de controle e interface

```

cprintf("*****");
cprintf("*****");
cprintf("***** Autores: Fabio Takeshi Utida    Orientador: Oswaldo Horikawa *****");
cprintf("*****      Ronaldo Endo                *****");
cprintf("*****");
cprintf("*****");
cprintf("*****");
cprintf("*****");
cprintf("*****\n\n");
cprintf("*****\n\n");

/*a rotina a seguir serve para que o usuário estabeleça o sistema de coordenadas em que ele
irá trabalhar*/
PONTO_INICIAL:
outp(CONTROLE,0);
cprintf("POSICIONE A FERRAMENTA NO PONTO INICIAL DE REFERENCIA (Pressione
uma tecla para continuar...)");
getch();
posicao_atual=0;
x_novo=inp(CONTADOR);
x_novo=(x_novo-7)/8;
printf("  \n\n");
printf("  \n\n");

/*Agora, o usuário deve estabelecer o ponto de parada, e assim, pode-se identificar em que
sentido o movimento será realizado pelo ID_DIRECAO*/
DEFINE_POSICAO:
cprintf("DEFINA A POSICAO DE PARADA:");
scanf("%lf",&posicao_final);
if (posicao_final-posicao_atual>=0){
    ID_DIRECAO=1;
}
else{
    ID_DIRECAO=-1;
}
clrscr();

/* A rotina a seguir é responsável pelo controle do circuito de acionamento do freio utilizando
as saídas de relés. Os estágios de acionamento ocorrem a medida que a distância do ponto final
diminui. Só é possível contornar esse looping se o usuário movimentar o bloco até a posição final
que ele tiver indicado.*/
ALGORITMO_DE_CONTROLE:
stream = fopen("grafico.txt", "w");
stream1= fopen("grafico1.txt","w");
lerposicao();
start=clock();
end=clock();
fprintf(stream,"%f\n",posicao_atual);
fprintf(stream1,"%f\n", (end-start)/CLK_TCK);
distancia=posicao_final-posicao_atual;
gotoxy(50,12);
printf("mm");
while(ID_DIRECAO*distancia>0){
    if(ID_DIRECAO*distancia<=0){
        outp(CONTROLE,111); //Posição final.
    }
    else{
        if(ID_DIRECAO*distancia<=2){
            outp(CONTROLE,10); // distância menor que 2mm.
        }
        else{
            if(ID_DIRECAO*distancia<=5){

```



```

        while((inp(SENSOR)==4)||time<1){
            lerposicao();
            end2=clock();
            time=(end2-start2)/CLK_TCK; //tempo para desmagnetização
            printf("Tempo: %f segundos\n",time);
        }
        clrscr();
        goto ALGORITMO_DE_CONTROLE;
    }
    getch();
    clrscr();
    nosound(); //fim do sinal sonoro

/*Nesse trecho do programa o usuário pode optar por definir uma nova posição de parada,
começar o programa novamente redefinindo o ponto inicial ou sair do programa. Caso ele faça uma
opção invalida deve-se realizar essa rotina novamente, para que uma opção valida seja feita.*/
    ESCOLHA:
    escolha=NULL;
    printf("\nAperte 'P' para redefinir uma nova posicao de parada.\n");
    printf("\nAperte 'Z' para redefinir um novo Ponto inicial.\n");
    printf("\nAperte 'E' para sair do programa\n");
    printf("\nOPCAO:");
    scanf("%c",&escolha);
    scanf("%c",&escolha);
    printf("%c",escolha);
    if(escolha=='p'||escolha=='P'){
        clrscr();
        goto DEFINE_POSICAO;
    }
    else if(escolha=='z'||escolha=='Z'){
        clrscr();
        goto PONTO_INICIAL;
    }
    else if(escolha=='e'||escolha=='E'){
        outp(CONTROLE,0);
        clrscr();
        printf("Seu Programa ir ser finalizado agora.\n\nPressione qualquer tecla...");
        getch();
        return 0;
    }
    else{
        clrscr();
        textcolor(4+128);
        cprintf("Escolha invalida! !! Tente novamente.\n");
        textcolor(15);
        goto ESCOLHA;
    }
/*Esse trecho final do programa não deve ser acessado em nenhum momento, mas caso venha
acontecer uma mensagem de erro é mostrada para o usuário e ocorre o fim da execução do
programa.
    outp(CONTROLE,0);
    clrscr();
    printf("O programa executou alguma operacao ilegal e sera finalizado.\n");
    getch();
    return 0;
}

```