

DAVI YOSHINOBU KIKUCHI

Nota final

10 (dez)

hbm

22/01/04

**PROJETO DE UM SISTEMA ROBÓTICO PARA INSPEÇÃO DE
DUTOS**

Relatório final apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para o Projeto de Conclusão de Curso

São Paulo

2003

DAVI YOSHINOBU KIKUCHI

**PROJETO DE UM SISTEMA ROBÓTICO PARA INSPEÇÃO DE
DUTOS**

Relatório final apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para o Projeto de Conclusão de Curso

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica e
Sistemas Mecânicos

Orientador: Prof. Dr.
Lucas Antonio Moscato

São Paulo
2003

Dedico este trabalho à minha família
e aos meus amigos por sempre me apoiarem
e ajudarem nas horas em que preciso

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, ao Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato por ser meu professor, orientador, tutor, coordenador ..., enfim, um mestre durante esses últimos anos.

Ao Miguel, por “pôr minha plaquinha para funcionar”.

Aos meus amigos e colegas por sempre se dispuserem a me dar dicas e ajudar a solucionar os problemas deste trabalho.

Agradecimentos especiais:

Para Adinan, pelo apoio constante e por ter possibilitado a construção do protótipo.

E para Rodrigo, pelas aulas de eletrônica e montagem de placas de circuitos eletrônicos.

RESUMO

A manutenção a ser realizada em tubulações pode ser muito complexa, se efetuada manualmente, sobretudo se o sistema apresentar comprimentos muito extensos. Dessa maneira, este trabalho consiste no projeto de um sistema automatizado a ser movimentado e posicionado no interior de uma tubulação de modo a realizar medições em sua superfície. Para a interpretação dos dados adquiridos pelo dispositivo, é apresentado também um software para visualização gráfica do tubo, permitindo a verificação da existência de possíveis defeitos em algum ponto do duto. O projeto consiste na elaboração de uma solução para o problema e no projeto mecânico do dispositivo, do sistema de controle e do software para visualização gráfica.

ABSTRACT

The maintenance to be accomplished in pipelines can be much complex, if manually fulfilled, especially if the system presents very extensive lengths. Thus, this work consists on the project of an automatized system to be put in motion and positioned inside a tubing in order to promote measurements on its surface. For the data acquired interpretation, a software for graphical visualization of the pipe is presented, allowing the verification of the existence of possible defects in some duct point. The project consists on the elaboration of a solution for the problem and on the mechanical project for the device, the control system and graphical visualization software.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	1
2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	2
3. SOLUÇÕES CONSIDERADAS	4
3.1. Solução 1	4
3.2. Solução 2	4
3.3. Solução 3	5
3.4. Solução 4	5
4. ALTERNATIVA MAIS ADEQUADA	7
5. PROJETO MECÂNICO DO DISPOSITIVO	8
5.1. Mecanismos do Dispositivo	8
5.1.1. Acoplamento sensor-parede	8
5.1.2. Desacoplamento sensor-parede	9
5.2. Estrutura do Dispositivo	10
5.2.1. Eixo	11
5.2.2. Haste fixa	12
5.2.3. Haste móvel	12
5.2.4. Fim de curso	13
5.2.5. Tampa	13
5.2.6. Suporte	14
5.2.7. Suporte motor	14
5.2.8. Conector	15
5.3. Dimensionamento dos Motores do Dispositivo	15
5.3.1. Dimensionamento do motor para movimentação do dispositivo	16
5.3.2. Dimensionamento do motor para desacoplamento sensor-parede	17
6. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	19
7. PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE	20
7.1. Sensores	20
7.1.1. Sensor para medição da espessura da parede do tubo	20

7.1.2. Sensor para medição do deslocamento relativo entre as hastes	21
7.2. Atuadores	22
7.2.1. Motor para movimentação do dispositivo	22
7.2.2. Motor para o mecanismo de desacoplamento sensor-parede	23
7.3. Conversores	24
7.3.1. Sensor de ultra-som	24
7.3.2. Potenciômetro linear	24
7.4. Drivers	25
7.4.1. Driver para o motor CC	25
7.4.2. Driver para o motor de passo	26
7.5. Computador.....	27
7.5.1. Movimentação do dispositivo	27
7.5.2. Aquisição de dados	28
7.5.3. Geração do arquivo de saída	28
7.5.4. Comunicação com o usuário	29
8. PROJETO DO SOFTWARE DE VISUALIZAÇÃO GRÁFICA	30
8.1. Componentes do Software	31
8.2. Utilização do Software	33
9. CONCLUSÕES	35
ANEXO A – Desenhos de Fabricação do Dispositivo	36
ANEXO B – Layout da Placa Contendo os Drivers do Dispositivo.....	47
ANEXO C – Código fonte do software de controle.....	49
ANEXO D – Fotografias do dispositivo.....	53
REFERÊNCIAS	56

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1: Esquema da solução 1.	4
Fig. 2: Esquema da solução 2.	5
Fig. 3: Esquema da solução 3.	5
Fig. 4: Esquema da solução 4.	6
Fig. 5: Esquema do mecanismo de acoplamento sensor-parede.	9
Fig. 6: Esquema do mecanismo de desacoplamento sensor-parede.	10
Fig. 7: Desenho de conjunto do dispositivo.	10
Fig. 8: Vista explodida do dispositivo.	11
Fig. 9: Eixo (duas vistas diferentes).	12
Fig. 10: Haste fixa.	12
Fig. 11: Haste móvel (duas vistas diferentes).	13
Fig. 12: Fim de curso.	13
Fig. 13: Tampa.	14
Fig. 14: Suporte.	14
Fig. 15: Suporte motor.	15
Fig. 16: Conector (duas vistas diferentes).	15
Fig. 17: Esquema de forças do mecanismo de desacoplamento sensor-parede.	17
Fig. 18: Sistema de controle do dispositivo.	20
Fig. 19: Sensor de ultra-som para medição da espessura do tubo.	21
Fig. 20: Potenciômetro linear para medição do “raio” do tubo.	22
Fig. 21: Motor de passo para movimentação do dispositivo.	23
Fig. 22: Motor CC para o mecanismo de desacoplamento sensor-parede.	24
Fig. 23: Desenho esquemático dos circuitos dos drivers.	25
Fig. 24: Esquema do driver para o motor CC.	26
Fig. 25: Esquema do driver para o motor de passo.	27
Fig. 26: Sequência de movimentação do dispositivo.	28
Fig. 27: Software de visualização gráfica do duto (I).	31
Fig. 28: Software de visualização gráfica do duto (II).	33
Fig. 29: Software de visualização gráfica do duto (III).	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Matriz de Decisão.....	7
Tabela 2: Diagrama lógico para o driver do motor CC.	26

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo a realização de um projeto de engenharia em seus vários aspectos, desde a definição de um problema até a apresentação final da solução encontrada, enquadrando as tarefas necessárias para o seu cumprimento em um determinado cronograma de trabalho.

O projeto escolhido consiste, na realidade, em uma parte de um projeto do programa PIPE, da FAPESP. O seu objetivo é a criação de um sistema robotizado para inspeção de dutos. A principal aplicação deste sistema é na área de manutenção de tubulações, de modo a realizar uma verificação não destrutiva de possíveis defeitos em sua superfície interna.

A princípio, o protótipo deste sistema consiste de três módulos independentes: um módulo para movimentação ao longo do tubo, outro para acomodar o microcontrolador a ser utilizado e um último comportando os sensores necessários para a aquisição de dados do duto. Este projeto de formatura consiste na construção de um protótipo para o terceiro módulo.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O sistema robótico para inspeção de dutos deve ser capaz de se movimentar e adquirir dados no interior de uma tubulação, de modo a verificar a existência de possíveis falhas na superfície das paredes ou na forma geométrica do tubo. Durante a inspeção, o duto se encontra vazio, ou seja, não há fluido escoando em seu interior.

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um protótipo do dispositivo para efetuar medições em relação a uma certa secção transversal do tubo, dada uma certa posição longitudinal na tubulação. Dessa maneira, a concepção do mecanismo de movimentação e posicionamento do sistema ao longo da tubulação está fora do escopo deste projeto.

Para verificar a existência de defeitos como orifícios, fissuras ou desgaste na parede de tubo, é necessária a utilização de algum tipo de sensor. Antes do início deste projeto, já havia sido adquirido um sensor de ultra-som, que é acoplado a uma superfície para medição de sua espessura. Este sensor se aplica a este caso, já que a aquisição de um valor consideravelmente diferente da espessura nominal da parede do duto acusaria a existência de algum tipo de defeito. Além disso, é necessário algum mecanismo que permita a medição em toda a superfície interna, como a utilização de vários sensores em posições diferentes ou um único sensor que se movimente ao longo de toda a circunferência. Neste último caso, é necessário utilizar também um outro tipo de sensor para a medição da posição angular do ponto medido.

O sensor de ultra-som apresenta um ímã em seu interior de modo a permitir um melhor acoplamento com uma superfície metálica. Entretanto, testes realizados indicam que a força magnética é tamanha que o seu deslocamento sobre uma superfície a ser inspecionada provoca uma deterioração considerável da mesma, mesmo com a utilização de um fluido acoplante. Dessa maneira, é interessante o desenvolvimento de algum mecanismo que permita o desacoplamento do sensor da parede do tubo quando o sistema tem necessidade de se movimentar, sobretudo por longas distâncias para posicionamento longitudinal, por exemplo.

Para verificar defeitos na forma geométrica da secção geométrica, como uma possível “ovalização”, deve-se medir o raio da tubulação. Esta medida é realizada através de algum tipo de sensor de posição e, assim como para o sensor de medição

de espessura da parede, é necessário adquirir dados ao longo da circunferência do duto.

Finalmente, com os dados adquiridos pode ser verificada a existência de defeitos. Contudo, a observação dos dados em sua forma numérica não é muito trivial e eficiente. Dessa maneira, é desejável o desenvolvimento de um software que possibilite esta visualização de forma gráfica, permitindo uma reconstrução dos dados na forma de gráficos na tela de um computador.

O protótipo a ser construído deve ser capaz de efetuar leitura de dados em um tubo de diâmetro nominal de 300 mm. A seguir, um breve resumo dos principais requisitos que se fazem necessários:

- Utilização de algum tipo de sensor para medir a espessura do duto;
- Utilização de algum tipo de sensor para medição do diâmetro do duto;
- Um sistema que permita a varredura de toda a circunferência da superfície do duto;
- Um sistema permitindo o acoplamento do sensor na parede do duto, para realizar medições, e o seu recolhimento, durante a sua movimentação ao longo da tubulação;
- Reconstrução gráfica do duto na tela de um computador com base nos dados obtidos.

3. SOLUÇÕES CONSIDERADAS

3.1. Solução 1

A primeira solução consiste de duas partes: um sistema para verificação de “ovalização” do tubo, dado por um conjunto de hastes não girantes de comprimento variável (modelo mola e pistão), cada uma com um sensor de posição, e suas extremidades em contato com a parede do duto; e um sistema para verificação de falhas na superfície do tubo, dado por uma outra haste semelhante às anteriores, mas girante (uma extremidade fixa ao eixo de um motor), e um sensor para medição da espessura em sua outra extremidade.

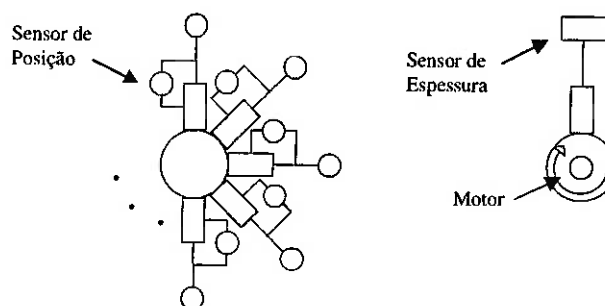


Fig. 1: Esquema da solução 1.

3.2. Solução 2

A segunda solução consiste em utilizar apenas um sistema para medição do diâmetro e da espessura do tubo. Para tanto, engloba-se um sensor de posição na única haste do sistema girante anterior. As principais vantagens são o menor custo, já que só são necessários um único sensor de posição e uma única haste, e a possibilidade de medição em qualquer ponto da superfície do tubo através da movimentação do motor, já que no sistema de hastes não girantes a medida é realizada em alguns pontos discretos. A desvantagem é o fato de o dispositivo que contém o sensor de medida de espessura possuir uma dimensão em contato com o

tubo relativamente alta em relação ao sistema anterior, em que o contato é praticamente pontual e, dessa maneira, a acurácia é maior.

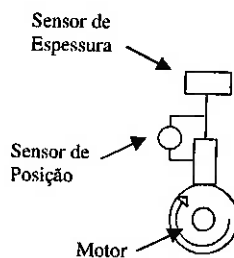


Fig. 2: Esquema da solução 2.

3.3. Solução 3

Esta terceira solução é praticamente idêntica à anterior, mas possui quatro hastes. A desvantagem, naturalmente, é o maior custo do mecanismo. Contudo, a principal vantagem é a resposta mais rápida deste sistema (o motor gira somente um quarto de volta para “varrer” toda a superfície do tubo), o que pode acarretar em vários benefícios, como menor tempo de parada para manutenção da tubulação.

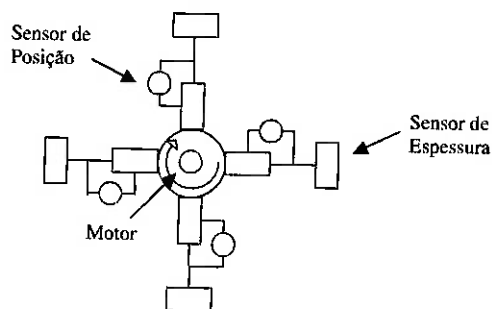


Fig. 3: Esquema da solução 3.

3.4. Solução 4

Esta última solução é semelhante à anterior, mas acrescentam-se mais hastes para separação entre medição de diâmetro e espessura. A desvantagem novamente é o custo, enquanto que a vantagem é o contato praticamente pontual das hastes para a medição do diâmetro, como já discutido anteriormente.

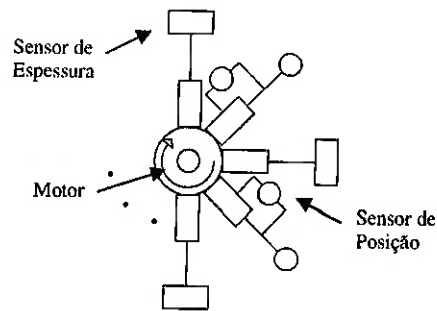


Fig. 4: Esquema da solução 4.

4. ALTERNATIVA MAIS ADEQUADA

Para a escolha da solução mais adequada, consideremos a seguinte matriz de decisão:

Tabela 1: Matriz de Decisão.

Critério	Peso	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4
Custo	3	1	5	3	2
Tempo de Resposta	3	2	1	5	5
Precisão	2	4	3	3	5
Manutenção	1	2	4	3	1
Total		19	28	<u>33</u>	32

Portanto, a solução escolhida é a 3.

A seguir, teremos o projeto do dispositivo escolhido. Este projeto consiste basicamente no desenvolvimento da parte mecânica do dispositivo, contendo os mecanismos de suporte para sensores e motores, o sistema de mola e pistão das hastes e o sistema de acoplamento e desacoplamento do sensor de ultra-som; da parte de controle do dispositivo, contendo o sistema de envio de dados para movimentação de atuadores e aquisição de dados dos sensores; de um protótipo, para visualização na prática do dispositivo projetado; e do software de visualização gráfica da tubulação.

5. PROJETO MECÂNICO DO DISPOSITIVO

Serão apresentados a seguir os principais mecanismos utilizados no dispositivo para cumprir os requisitos citados anteriormente. Em seguida, será exibida a estrutura mecânica do protótipo, bem como um detalhamento completo de seus principais componentes. Será representada apenas uma das quatro hastes do dispositivo.

5.1. Mecanismos do Dispositivo

5.1.1. Acoplamento sensor-parede

Este mecanismo tem a função de cumprir o requisito de acoplar o sensor de medição de espessura à parede do tubo, o que é necessário para o seu funcionamento. Além disso, o mecanismo deve permitir um deslocamento interno, já que a distância até a parede pode sofrer variações decorrentes de uma possível “ovalização” do tubo ou excentricidade do eixo de rotação em relação ao eixo central do duto.

O mecanismo consiste de um sistema haste-pistão acoplado a uma superfície envoltória, permitindo o seu deslocamento. Axialmente, o movimento é limitado por uma mola de compressão, que se encontraria comprimida durante a operação do dispositivo e, dessa maneira, fornecendo uma força elástica contra o tubo, permitindo o acoplamento sensor-parede. Além disso, entre as superfícies móveis do mecanismo há um sensor para medir o seu deslocamento relativo, de modo a fornecer a variação do diâmetro do duto.

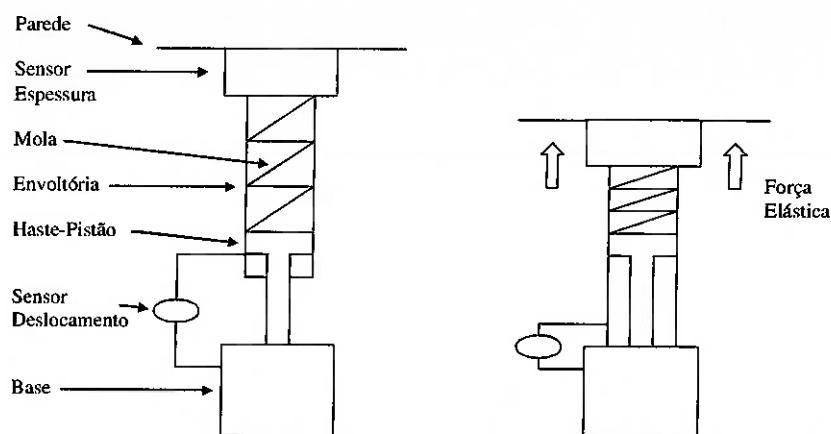


Fig. 5: Esquema do mecanismo de acoplamento sensor-parede.

5.1.2. Desacoplamento sensor-parede

Este mecanismo cumpre o requisito de recolher o sensor de medição de espessura de modo a desacoplá-lo da parede do tubo para movimentações em seu interior.

O mecanismo consiste basicamente de um motor e um carretel preso a um cabo de aço. O carretel é conectado ao eixo do motor, o cabo circula no interior da haste móvel do mecanismo anterior e a sua outra extremidade é ligada à base do dispositivo. Quando o motor é acionado, o cabo é recolhido e, portanto, o sensor se movimenta e é desacoplado do tubo. Este sistema pode ser utilizado para o recolhimento das 4 hastes do dispositivo simultaneamente.

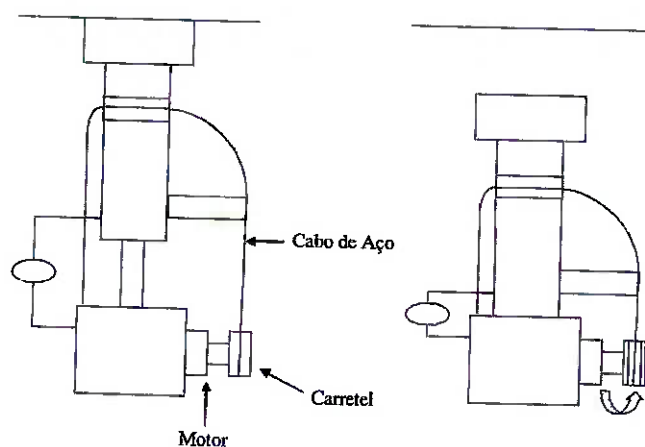


Fig. 6: Esquema do mecanismo de desacoplamento sensor-parede.

5.2. Estrutura do Dispositivo

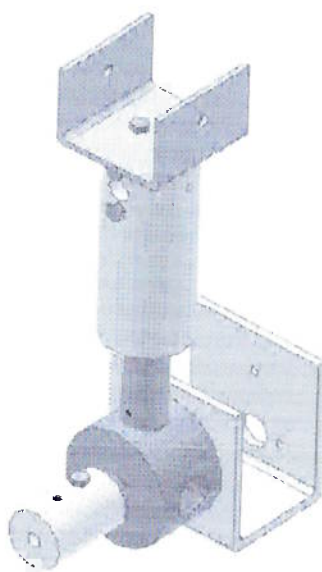


Fig. 7: Desenho de conjunto do dispositivo.

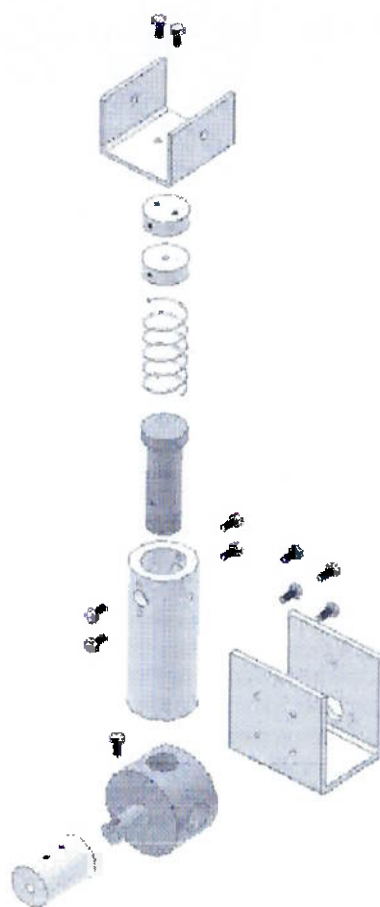


Fig. 8: Vista explodida do dispositivo.

5.2.1. Eixo

A função desta peça é o suporte principal do dispositivo, que é ligado ao motor para a sua movimentação. O eixo em si possui um rasgo para chaveta, para a sua ligação a um acoplamento, e quatro furos rosqueados radiais, para conectar as hastes onde se encontram os sensores. Os quatro furos rosqueados paralelos são para parafusos, de modo a permitir a junção de um suporte para o motor para desacoplamento sensor-parede. À região de menor diâmetro desta peça é presa também uma das extremidades dos cabos do mecanismo de desacoplamento.

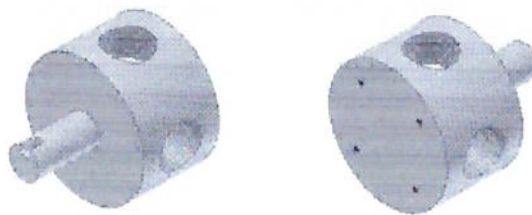


Fig. 9: Eixo (duas vistas diferentes).

5.2.2. *Haste fixa*

Esta peça corresponde ao sistema haste-pistão de deslocamento radial do dispositivo. Ela é rosqueada à peça *Eixo*, sendo a sua envoltória móvel. Há também um furo rosqueado para parafuso cuja função é conectar uma das extremidades do sensor de medição de deslocamento radial.



Fig. 10: Haste fixa.

5.2.3. *Haste móvel*

Esta peça é a componente móvel do sistema de deslocamento radial do dispositivo, envolvendo a peça *Haste fixa*. Há um furo lateral, para passagem do cabo de aço do sistema de desacoplamento sensor-parede, e furos em suas proximidades, para passagem de parafusos para fixação das peças *Fim de curso* e *Tampa*. Os outros furos laterais são para a passagem de um pino para realizar contato

com o cabo de aço e também para fixação da outra extremidade do sensor de medição de deslocamento.

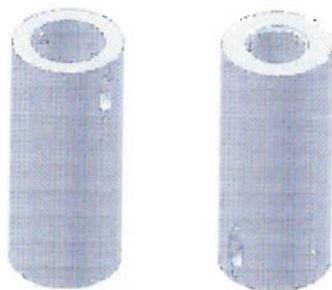


Fig. 11: Haste móvel (duas vistas diferentes).

5.2.4. *Fim de curso*

Esta peça tem a função de limitar o curso do pistão da peça **Haste fixa**, permitindo um espaço para a passagem do cabo do sistema de desacoplamento sensor-parede. Ela é fixada à peça **Haste móvel** através de furos rosqueados laterais e parafusos. O furo central tem a função de escape de ar durante a movimentação da **Haste móvel**.



Fig. 12: Fim de curso.

5.2.5. *Tampa*

Esta peça tem a função de conectar as peças **Haste móvel** e **Suporte**. Ela é fixada a ambas por meio de parafusos em seus furos rosqueados.



Fig. 13: Tampa.

5.2.6. Suporte

Esta peça tem a função de suporte para o sensor de medição de espessura. A sua dimensão está diretamente relacionada ao sensor, que já havia sido adquirido anteriormente, como já mencionado. Ela é conectada à peça *Tampa* por meio de seu furo central e parafuso e ao sensor por meio de um parafuso e seus furos laterais.

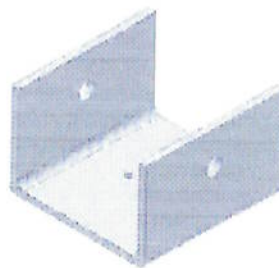


Fig. 14: Suporte.

5.2.7. Suporte motor

A função desta peça é o suporte do motor para desacoplamento sensor-parede e sua conexão à peça *Eixo*. Esta ligação é realizada através dos quatro furos formando um quadrado, enquanto que os furos restantes são para conexão e passagem do eixo do motor.

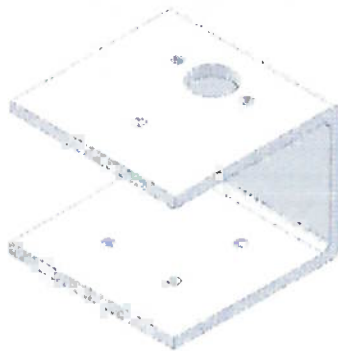


Fig. 15: Suporte motor.

5.2.8. Conector

Esta peça tem a função de acoplar a peça *Eixo* ao eixo do motor para movimentação do dispositivo.

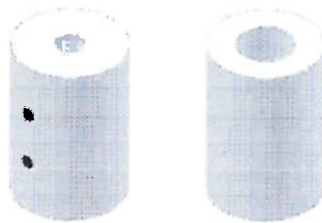


Fig. 16: Conector (duas vistas diferentes).

OBS.: Como pode ser observado, não foram representados nos desenhos os motores e outros elementos, como o cabo de aço e o carretel para o seu recolhimento. Para uma visualização completa do dispositivo, ver o ANEXO D – Fotografias do Dispositivo.

5.3. Dimensionamento dos Motores do Dispositivo

Para a seleção dos motores a serem utilizados na movimentação do protótipo, é necessário estimar a carga a ser suportada por cada um deles. A seguir, teremos o

dimensionamento do motor para movimentação do dispositivo e do motor para desacoplamento sensor-parede.

5.3.1. Dimensionamento do motor para movimentação do dispositivo

Como já mencionado, no protótipo não haverá deslocamento do sensor acoplado à superfície a ser medida, não existindo, portanto, uma força de atrito entre o sensor de ultra-som e a parede do tubo. Dessa maneira, não há forças externas atuantes no dispositivo, incluindo forças gravitacionais já que, devido à simetria do mecanismo, a resultante da força peso atua sobre o eixo de rotação e, portanto, não gera torque. Dessa maneira, o único torque resistivo é o das forças inerciais.

Cálculo de torque e potência necessários para o motor:

$$T = J.\dot{\omega} \dots\dots\dots (5.3.1.1)$$

$$T_m = f.T \dots\dots\dots (5.3.1.2)$$

$$P_m = T_m.\omega \dots\dots\dots (5.3.1.3)$$

onde: T = torque das forças inerciais (N.m)

T_m = torque necessário para o motor (N.m)

P_m = potência necessária para o motor (W)

J = momento de inércia em relação ao eixo de rotação (kg.m^2)

ω = velocidade angular (rad/s)

$\dot{\omega}$ = aceleração angular (rad/s^2)

f = fator de segurança

OBS.: A utilização de um fator de segurança é justificada devido a fatores não considerados como atrito, rendimento do motor, inércia do eixo do motor e elementos do dispositivo não incluídos no cálculo da inércia, como parafusos e alguns suportes. Devido a todos estes fatores, é utilizado sobretudo um valor relativamente alto para o fator de segurança.

Sabendo que $J = 1,783.10^{-2} \text{ kg.m}^2$ (dado obtido pelo software Autodesk Inventor) e considerando uma aceleração angular máxima $\dot{\omega} = 2,513 \text{ rad/s}^2$ (24 rpm/s²), temos:

$$T = (1,783.10^{-2}).2,513 = 4,481.10^{-2} \text{ N.m}$$

$$\text{Para } f = 5, \text{ temos: } T_m = 5.(4,481.10^{-2}) \Rightarrow \boxed{T_m = 0,224 \text{ N.m}}$$

Portanto, para uma velocidade angular máxima $\omega = 1,257 \text{ rad/s}$ (12 rpm):

$$P_m = 0,224.1,257 \Rightarrow \boxed{P_m = 0,282 \text{ W}}$$

5.3.2. Dimensionamento do motor para desacoplamento sensor-parede

Para a sua seleção deste motor devem ser levadas em conta as forças elástica da mola e magnética entre o sensor de medição de espessura e a parede do tubo.

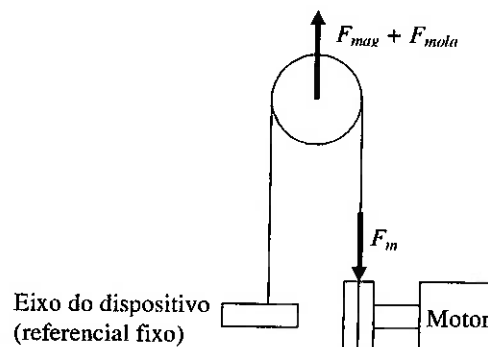


Fig. 17: Esquema de forças do mecanismo de desacoplamento sensor-parede.

De acordo com o esquema, temos as seguintes relações:

$$F_m = 4.f \cdot \frac{\max(F_{mag}, F_{mola})}{2} \dots\dots\dots (5.3.2.1)$$

$$F_{mola} = \frac{d^4 G x}{8 D^3 N} \dots\dots\dots (5.3.2.2)$$

$$T_m = \frac{F_m \cdot D_m}{2} \dots\dots\dots (5.3.2.3)$$

onde: F_m = força de tração necessária para o motor (4 hastes) (N)

F_{mag} = força magnética do sensor (N)

F_{mola} = força elástica da mola (N)

f = fator de segurança

d = diâmetro do fio da mola (m)

G = módulo de rigidez do material da mola (Pa)

x = deformação da mola (m)

D = diâmetro da mola (m)

N = número de espiras da mola

T_m = torque necessário para o motor (N.m)

D_m = diâmetro do carretel fixo ao motor (m)

OBS.: Também é utilizado um fator de segurança neste caso devido a fatores não considerados como atrito, rendimento do motor e forças gravitacionais (peso do sensor). O fator $\max(F_{mag}, F_{mola})$ na equação 5.3.2.1 se deve ao fato de as duas forças não atuarem ao mesmo tempo (quando o sensor está acoplado, a mola está praticamente em repouso e, quando o sensor está recolhido, não há força magnética atuante), o que leva ao dimensionamento àquela de maior valor.

A mola utilizada no projeto tem as seguintes características: $d = 1$ mm, $G = 79,3$ GPa, $D = 20$ mm e $N = 10$. A sua deformação máxima é $x = 30$ mm. Logo:

$$F_{mola} = \frac{(10^{-3})^4 \cdot (79,3 \cdot 10^9) \cdot (30 \cdot 10^{-3})}{8 \cdot (20 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 10} = 3,717 \text{ N}$$

Como $F_{mag} = 6$ N (medida experimentalmente), temos, para $f = 3$:

$$F_m = 4,3 \cdot \frac{6}{2} = 36 \text{ N}$$

$$\text{Como } D_m = 15 \text{ mm: } T_m = \frac{36 \cdot (15 \cdot 10^{-3})}{2} \Rightarrow \boxed{T_m = 0,270 \text{ N.m}}$$

6. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Os desenhos mecânicos do mecanismo foram realizados com o software Autodesk Inventor 5. Os desenhos de fabricação utilizados para a construção das peças do dispositivo podem ser encontrados no ANEXO A – Desenhos de Fabricação do Dispositivo.

7. PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle do dispositivo segue o formato do seguinte diagrama de blocos.

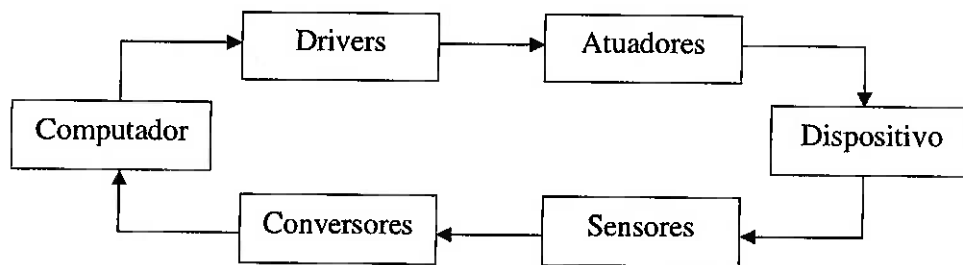


Fig. 18: Sistema de controle do dispositivo

Uma descrição detalhada de cada bloco mostrado acima (com exceção do bloco dispositivo, que já foi apresentado) será realizada a seguir.

OBS.: Apesar de o projeto PIPE original estabelecer um microcontrolador para controle do sistema, como mencionado no início do relatório, neste projeto de formatura o controle é realizado via um computador PC, para maior facilidade de programação.

7.1. Sensores

7.1.1. Sensor para medição da espessura da parede do tubo

Como já mencionado anteriormente, este sensor já havia sido adquirido. Trata-se de um sensor de ultra-som, da empresa Tecnomedicação – Sistemas de Medição Ltda, que fornece propriamente a medida da espessura de uma superfície a qual esteja em contato. Quanto à sua aparência, é basicamente uma caixa preta com um furo passante, permitindo a sua fixação com a peça *Suporte* (ver item 5.2.6). A superfície de contato em que se realiza a medição possui forma cilíndrica, própria para acoplamento com um tubo. Ele possui também um ímã em seu interior, permitindo o acoplamento com uma superfície metálica condutora, e, como saída, uma porta serial (DB09) de comunicação, permitindo a aquisição de dados por um

computador. Para que a medição seja realizada corretamente, é necessária a utilização de um fluido acoplante entre o sensor e a superfície a ser medida.



Fig. 19: Sensor de ultra-som para medição da espessura do tubo (Tecnomedição – Sistemas de Medição Ltda. Disponível em: <<http://www.tecnomedicao.com.br/>>).

7.1.2. Sensor para medição do deslocamento relativo entre as hastes

A função desse sensor não é realizar uma medida altamente acurada da distância entre o eixo de rotação do dispositivo e a superfície do duto, e sim permitir a verificação da forma de uma secção da tubulação. A estrutura do dispositivo, por sinal, não permite esse tipo de medida de elevada exatidão, já que o contato com a parede do tubo é realizado pelo sensor de ultra-som, que possui uma superfície de contato relativamente extensa e, portanto, não é capaz de realizar medidas em pequenos comprimentos da superfície do duto. Entretanto, como já mencionado, essa função não está relacionada a este projeto.

Para realizar a verificação da forma do tubo, foi selecionado como sensor um potenciômetro linear, com 10K8 de resistência elétrica e 60 mm de curso, fabricado pela empresa ALPS Electric. Ele possui três fios de saída, sendo dois para alimentação elétrica e um para medição. Ele é composto também de um elemento deslizante, cujo deslocamento ocasiona em uma variação na resistência medida. A medida realizada é, na verdade, uma medida de tensão elétrica, necessitando ser convertida para uma medida de distância. Como este é um dado analógico, é necessário um conversor analógico-digital para a sua transmissão para um computador.



Fig. 20: Potenciômetro linear para medição do “raio” do tubo (ALPS Electric – Electronic Devices and Electronic Components Manufacture. Disponível em: <<http://www.alps.com/>>).

7.2. Atuadores

7.2.1. Motor para movimentação do dispositivo

Como já mencionado, no protótipo não haverá deslocamento do sensor acoplado à superfície a ser medida, ou seja, esse tipo de movimentação será realizado somente quando o mecanismo de desacoplamento sensor-parede estiver acionado.

Portanto, a velocidade e o torque necessário para o sistema não será muito elevado (basicamente, só está sujeito a forças inerciais, com baixas acelerações) e será utilizado um motor de passo, não necessitando, dessa maneira, de um sensor para medição da posição angular do eixo.

O motor utilizado neste projeto possui as seguintes características:

Motor de passo – 2 fases, acionamento unipolar – Sanyo Denki

Modelo: 103H5208

1,8 graus por passo

Torque estático: 0,3 N.m

Comprimento do motor: 39 mm

Momento de inércia do rotor: $56,0 \cdot 10^{-7} \text{ kg.m}^2$

6 ligações



Fig. 21: Motor de passo para movimentação do dispositivo (Sanyo Denki – America. Disponível em: <http://www.sanyo-denki.com/>).

7.2.2. Motor para o mecanismo de desacoplamento sensor-parede

Será utilizado um motor CC com função liga-desliga e inversão do sentido do movimento, para desacoplamento e acoplamento entre o sensor e o tubo. Além disso, para o funcionamento correto do mecanismo, o eixo do motor deve permanecer travado quando não estiver em movimento.

O motor utilizado neste projeto possui as seguintes características:

Motor CC com redutor – Buehler Motor Group

Modelo: 1.61.046.315

Torque nominal: 300 mN.m

Rotação nominal: 15,5 rpm

Tensão nominal: 12 V

Corrente nominal: 220 mA

Rotação sem carga: 16,5 rpm

Resistência entre os terminais: 9,0 Ω

Relação de redução: 299:1 – 5 estágios



Fig. 22: Motor CC para o mecanismo de desacoplamento sensor-parede (Buehler Motor Group – DC Motors, DC Gearmotors, Actuators, Precision Metal Parts. Disponível em: <http://www.buehlermotor.com/>).

7.3. Conversores

7.3.1. Sensor de ultra-som

Como já mencionado, este sensor se comunica diretamente com o computador via porta serial. Dessa maneira, não é necessário nenhum tipo de conversor para aquisição de dados (ou seja, o conversor já está incluído no sensor, bastando ao software de controle adquirir corretamente os dados pela porta correspondente).

7.3.2. Potenciômetro linear

Este sensor fornece como saída um valor analógico de tensão elétrica. Para que este dado seja adquirido e interpretado pelo computador, é necessário um conversor analógico-digital. O conversor utilizado neste projeto é uma placa CAD 12/36, da Lynx.

Contudo, o valor desejado para este sensor é o de distância, o que pede uma nova conversão. Para isso, considera-se uma aproximação linear entre os valores de tensão e comprimento. Dessa maneira, obtêm-se experimentalmente os valores de posição e tensão correspondentes às posições extremas do potenciômetro, de modo que uma posição intermediária pode ser obtida por interpolação. Esta conversão é implantada através do software de controle.

7.4. Drivers

Os drivers utilizados no projeto têm a função de converter os sinais de controle dados pelo computador em movimento dos atuadores. Como os sinais de controle não podem ser utilizados para fornecer potência aos motores, sua função é, basicamente, realizar o chaveamento de transistores de potência de modo a conectar ou desconectar os terminais dos motores à fonte de energia. Os sinais são dados pelo computador via porta paralela.

A seguir, temos o esquema dos circuitos dos drivers.

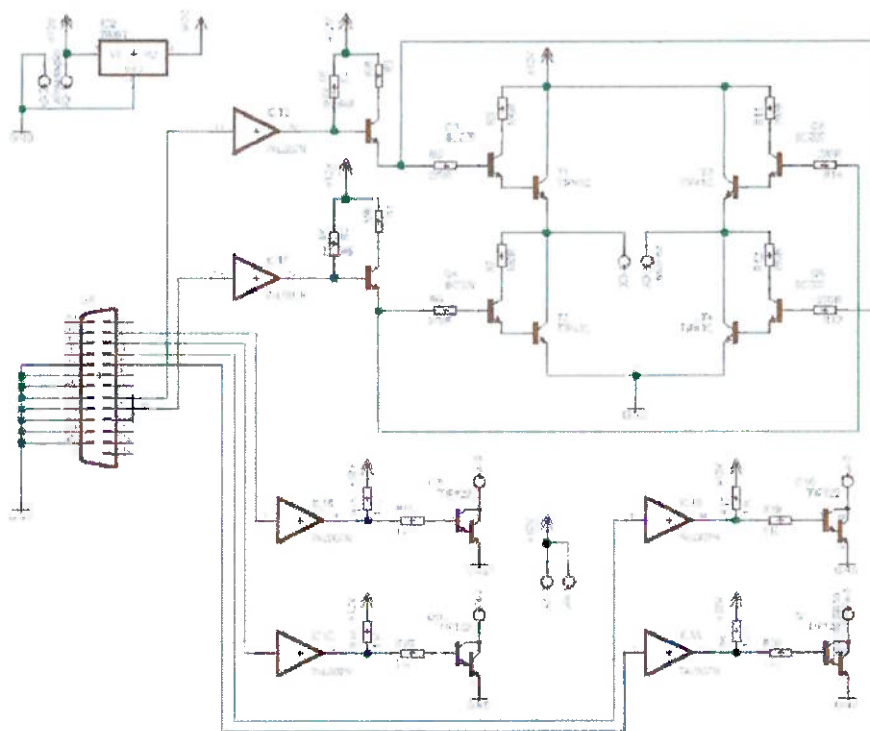


Fig. 23: Desenho esquemático dos circuitos dos drivers.

7.4.1. Driver para o motor CC

O motor CC utilizado no projeto necessita de inversão de sentido de movimento, mas não é necessário um controle de posicionamento. O driver utilizado para tanto é composto, basicamente, por uma ponte H.

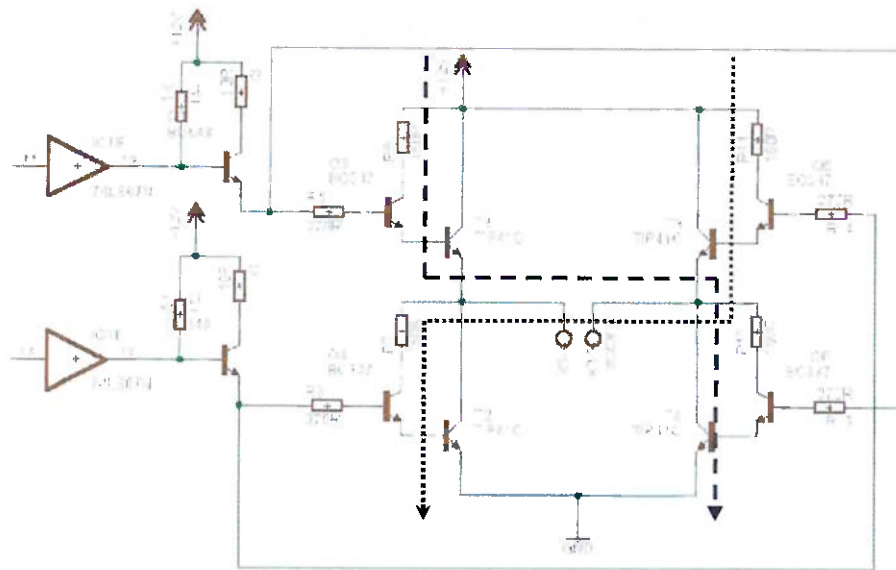


Fig. 24: Esquema do driver para o motor CC.

Os sinais vindos das entradas 11 e 13 do buffer 74LS07N são os responsáveis pelo chaveamento dos transistores T1 a T4. Se as duas entradas estiverem em LOW, todos os transistores estão cortados e não há circulação de corrente. Se a entrada 11 estiver em HIGH e a 13 em LOW, os transistores T1 e T4 saturam e permitem a passagem de corrente nas terminais do motor (linha tracejada). Se a entrada 11 estiver em LOW e a 13 em HIGH, são T2 e T3 que saturam, permitindo o fluxo de corrente no sentido contrário (linha pontilhada). Caso as duas entradas se encontrem em HIGH, todos os transistores saturam e ocorre um curto-circuito na fonte, ou seja, é uma situação que nunca deve ocorrer.

Tabela 2: Diagrama lógico para o driver do motor CC.

Sinal de controle no conector DB25		Movimento do motor
Pino 8	Pino 9	
0	0	Parado
0	1	Sentido S
1	0	Sentido oposto a S
1	1	Curto-circuito

7.4.2. Driver para o motor de passo

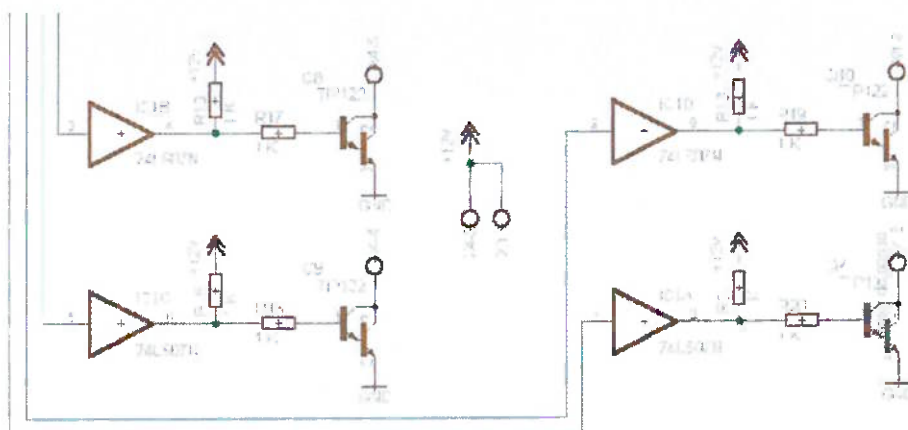


Fig. 25: Esquema do driver para o motor de passo.

Os sinais de controle nas entradas 1, 3, 5 e 9 do mesmo buffer 74LS07N têm como função apenas o chaveamento dos transistores Q7, Q8, Q9 e Q10, permitindo a energização das meia-bobinas correspondentes. A variação dos sinais para realizar a rotação do motor é dada pelo software de controle.

OBS.: Os esquemas e o layout dos componentes da placa contendo os drivers foram criados utilizando-se o software Eagle 4.09r2. A placa é composta também por 2 conectores para ligação de uma fonte de alimentação (12 V), 2 conectores para ligação do motor CC, 6 conectores para ligação do motor de passo e um conector DB25M para ligação de um cabo paralelo. O layout da placa pode ser encontrado no ANEXO B – Layout da Placa Contendo os Drivers do Dispositivo.

7.5. Computador

O computador é responsável pelo controle do sistema. Ele deve enviar sinais para movimentação dos motores, adquirir dados enviados pelos sensores e permitir interação com o usuário. Para cumprir essas tarefas, temos um software de controle, cujas principais funções estão listadas a seguir.

7.5.1. Movimentação do dispositivo

Como já mencionado, o computador se comunica com os drivers via porta paralela. Os drivers, por sua vez, acionam os atuadores que movimentam o dispositivo. O movimento do protótipo, implementado pelo software, obedece à seguinte sequência:

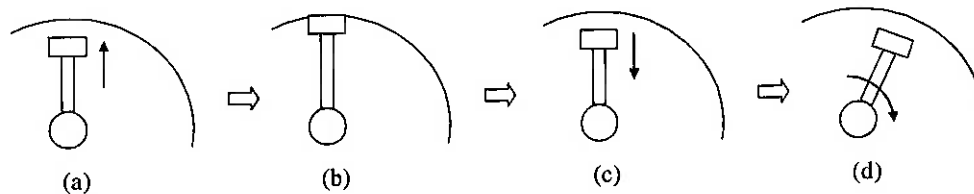


Fig. 26: Sequência de movimentação do dispositivo.

- a) Acoplar o sensor de ultra-som à parede do tubo (motor CC);
- b) Adquirir dados dos sensores uma vez que o sensor de ultra-som está acoplado à parede do tubo;
- c) Desacoplar o sensor de ultra-som da parede do tubo (motor CC);
- d) Girar o dispositivo em torno de seu eixo de rotação de um ângulo equivalente ao passo desejado (motor de passo);

A sequência é repetida até a conclusão da varredura da circunferência do duto, o que equivale a um ângulo de 90 graus. (vale lembrar que o sistema é composto por 4 hastes defasadas de 90 graus). Em seguida, o protótipo volta à sua posição inicial, esperando o seu deslocamento na direção longitudinal do duto.

7.5.2. Aquisição de dados

Os sensores fornecem informações relativas à espessura da parede e à distância entre o eixo de rotação do dispositivo e a parede da seção transversal do tubo. Estes valores são armazenados para cada ponto medido para a sua conversão em um arquivo de saída.

7.5.3. Geração do arquivo de saída

O arquivo de saída corresponde a um arquivo de extensão *.k que é a entrada do software de visualização gráfica do tubo. Ele é um arquivo de texto que possui duas colunas de números: os valores adquiridos pelo sensor de ultra-som e os valores adquiridos pelo potenciômetro.

7.5.4. Comunicação com o usuário

A interface com o usuário do software é dada por uma janela DOS, apenas para que possa ser realizado um setup antes do início da operação, ou seja, um posicionamento manual do dispositivo para a sua posição de partida.

Inicialmente, realiza-se o posicionamento do motor de passo. Digita-se o valor do ângulo a ser deslocado, em graus, e a tecla ENTER. O dispositivo, então, se desloca para a posição desejada (para movimentação no sentido contrário, basta escolher um ângulo negativo). Quando o sistema estiver devidamente posicionado, escreve-se “ok”, e ENTER. Em seguida, é realizado o posicionamento do motor CC. O procedimento é análogo: -1, para o eixo do motor rotacionar em determinado sentido; 1, para rotação em sentido oposto; qualquer outro comando, para o motor parar; e, finalmente, “ok”, para finalizar o posicionamento manual (mais a tecla ENTER, em todos os casos). Basta, então, pressionar mais uma vez em ENTER para iniciar a inspeção.

OBS.: A listagem do programa de controle pode ser encontrada no ANEXO C – Código Fonte do Software de Controle. O programa foi desenvolvido em ambiente Microsoft Visual C++ 6.0.

8. PROJETO DO SOFTWARE DE VISUALIZAÇÃO GRÁFICA

O objetivo deste software é converter os dados adquiridos pelos sensores do dispositivo em uma representação gráfica, de modo a facilitar a análise dos resultados obtidos. Os dados amostrados correspondem às medidas de espessura do tubo e distância entre o eixo principal do sistema e a parede do duto (o que corresponderia ao raio da tubulação, se considerarmos o eixo central do dispositivo coincidente ao eixo central do tubo. Ao longo deste documento, essa distância será referenciada como ‘raio’, sendo que as aspas são utilizadas como lembrete de que não é realmente o raio do tubo), tomados em cada ponto analisado em sua superfície. A resposta do programa são dois gráficos: um mapa de cores, representando a espessura do duto em toda a superfície analisada, e um gráfico da seção transversal, representando a circunferência do tubo em um determinado ponto na tubulação.

O programa de visualização gráfica foi criado utilizando o software MATLAB 6 (R 12). A figura a seguir ilustra a janela de interface do software desenvolvido.

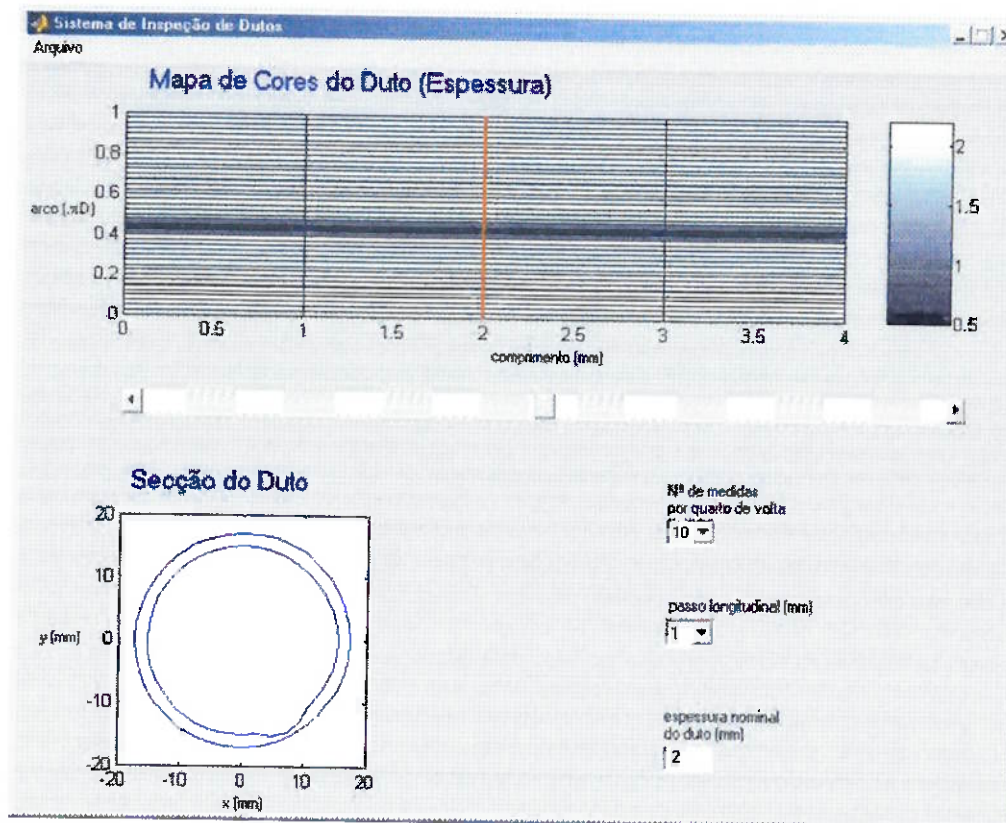


Fig. 27: Software de visualização gráfica do duto (I).

8.1. Componentes do Software

Entradas:

- **Arquivo de texto:** os dados adquiridos pelos sensores devem ser fornecidos com o formato de um arquivo de texto com extensão *.k. Este tipo de arquivo é composto por duas colunas de números, sendo a primeira medidas de espessura e a segunda medidas de 'raio' do tubo. Dessa maneira, cada linha do arquivo corresponde às medidas dos dois sensores tomadas em um determinado ponto da superfície da tubulação.
- **Número de medidas por quarto de volta:** deve-se escolher o passo transversal em que se o dispositivo se movimenta. Este número corresponde ao número de amostras obtidas em uma circunferência do tubo. Como são

amostrados quatro pontos simultaneamente, somente um quarto de volta é necessário para a varredura de toda a circunferência.

- **Passo longitudinal:** corresponde à distância longitudinal, em milímetros, percorrida pelo robô entre cada varredura de circunferência. Dessa maneira, assume-se que o sistema realiza medições na superfície em determinado ponto no comprimento da tubulação. Em seguida, ele se movimenta longitudinalmente a distância de um passo, para que possam ser realizadas novas medições.
- **Espessura nominal do duto:** como o próprio nome diz, corresponde à espessura, em milímetros, admitida para a superfície do tubo. Como a verificação de defeitos na superfície do tubo é realizada somente através da medida da espessura, não se tem o conhecimento de que o defeito está na superfície interna ou externa. Além disso, a verificação de “ovalização” do tubo é realizada pela medida do “raio” interno, não fornecendo a medida do raio externo. Dessa maneira, assume-se que o defeito se encontra internamente, ou seja, a superfície externa não possui defeitos e o raio externo é dado pela soma do raio interno com a espessura nominal.

Gráficos:

- **Mapa de cores do duto:** este gráfico mostra a espessura do tubo em toda a sua superfície, tomando como base os valores adquiridos do sensor de medição de espessura. Entre os pontos o software faz uma reconstrução de ordem zero. Os eixos do gráfico são a posição ao longo do comprimento do tubo em mm e a posição na circunferência da secção transversal, considerando uma planificação da tubulação (note que os valores variam de 0 a $\pi.D$, dado que a referência utilizada é a de que o início da medição é no ponto superior da secção transversal). A relação entre a cor e a espessura correspondente é dada pela legenda ao lado. Além disso, há uma barra de rolagem abaixo do gráfico, permitindo a visualização da secção do duto nos diferentes pontos medidos. A secção atual é indicada pela linha vermelha.

- **Secção do duto:** este gráfico mostra o perfil da secção transversal do tubo, através dos valores adquiridos pelos sensores. Entre os pontos o software interpola linearmente. A reconstrução é realizada utilizando-se as hipóteses citadas anteriormente, e a mudança da secção visualizada é dada pela barra de rolagem, como também já mencionado anteriormente.

8.2. Utilização do Software

Após selecionados os valores de número de medidas por quarto de volta, passo longitudinal e espessura nominal do duto, utiliza-se a opção *Arquivo* → *Abrir...* do menu para seleccionar o arquivo *.k com os dados amostrados e, em seguida, os gráficos são gerados. Se o arquivo de dados apresenta um formato diferente do especificado, uma mensagem de erro é exibida.

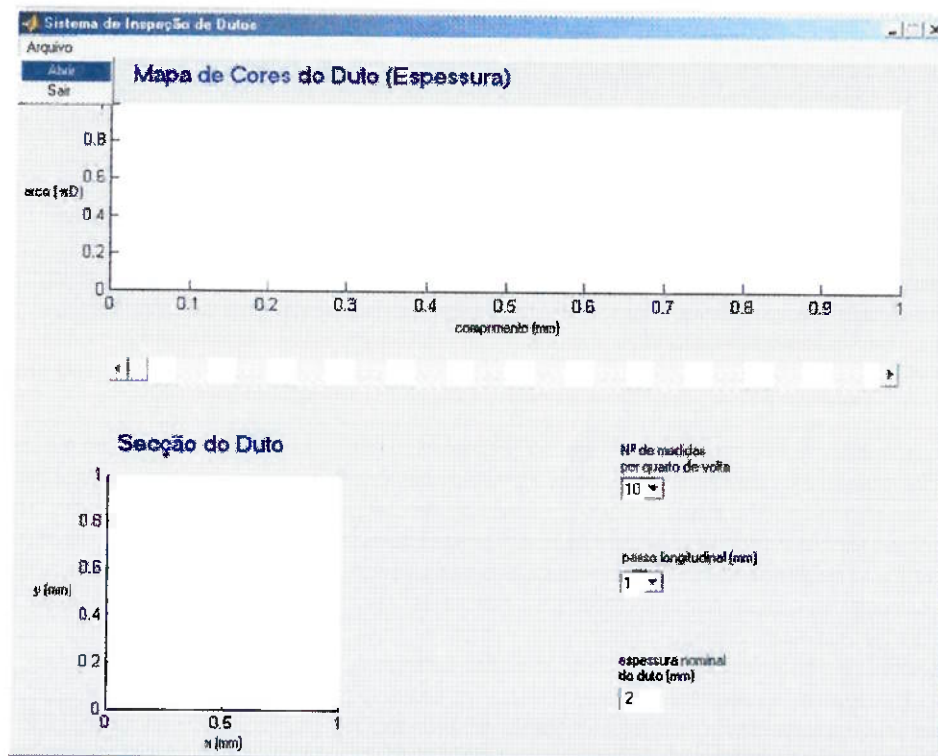


Fig. 28: Software de visualização gráfica do duto (II).

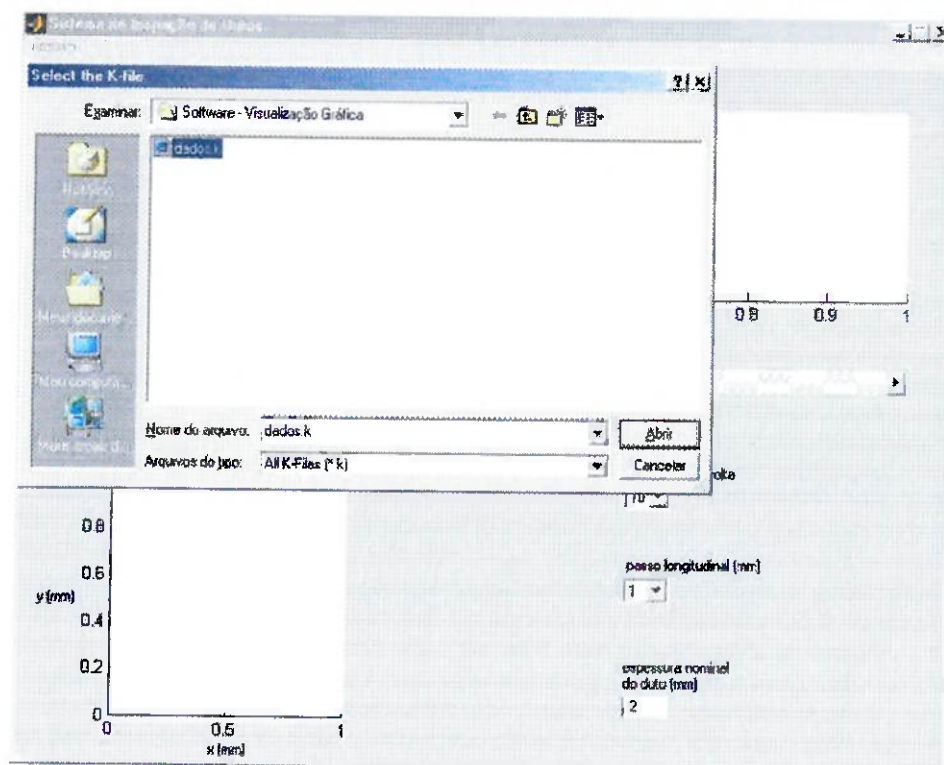


Fig. 29: Software de visualização gráfica do duto (III).

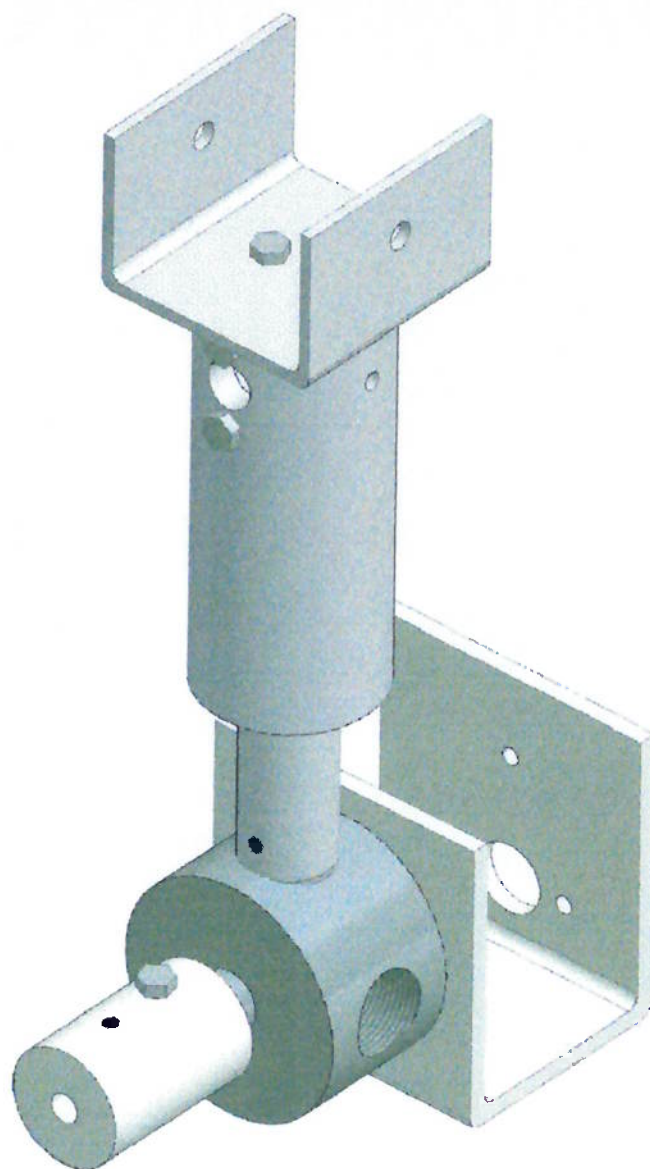
OBS.: Este software, criado em ambiente MATLAB, é composto por dois arquivos, de extensões *.m e *.fig. O arquivo *.fig apresenta não apresenta um formato do tipo texto, não sendo possível, portanto, reproduzi-lo neste relatório. O arquivo *.m, apesar de possuir formato do tipo texto, não será reproduzido porque necessita do arquivo *.fig para que possa ser interpretado.

9. CONCLUSÕES

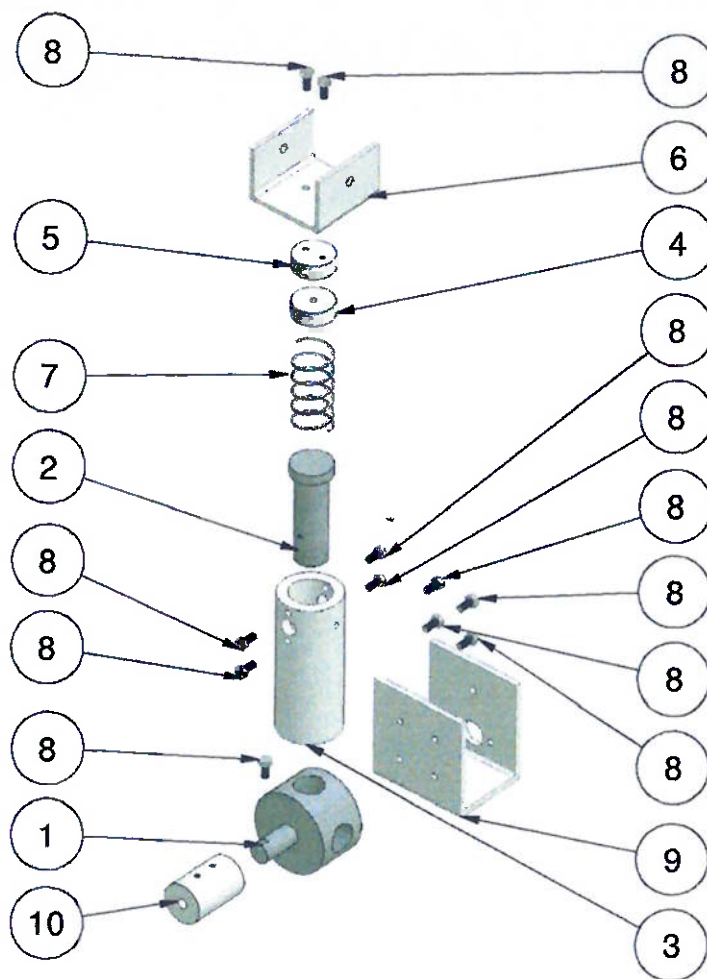
Este trabalho de conclusão de curso se mostrou de grande importância na medida que possibilitou a aplicação de vários recursos adquiridos ao longo do curso. Neste projeto na área de Engenharia Mecatrônica, em particular, observou-se claramente a integração das três principais áreas enfocadas no curso: Mecânica, Eletrônica e Computação. Este trabalho também possibilitou a verificação da necessidade de um planejamento bem estruturado, principalmente em relação ao tempo, por se tratar de um projeto de duração relativamente longa (1 ano).

Quanto aos resultados obtidos neste projeto, pode-se considerar que foram extremamente satisfatórios. Em relação ao protótipo, infelizmente não pôde ser implementado o item de aquisição de dados dos sensores, sendo a única parte que não foi estabelecida na prática. Como mencionado no início do relatório, o dispositivo projetado necessita de um sistema externo de posicionamento e movimentação ao longo do comprimento da tubulação. Com a ausência deste sistema, não foi possível a utilização do dispositivo para uma inspeção real no interior de um tubo. Contudo, este detalhe não comprometeu de forma significativa os objetivos deste projeto.

ANEXO A – Desenhos de Fabricação do Dispositivo

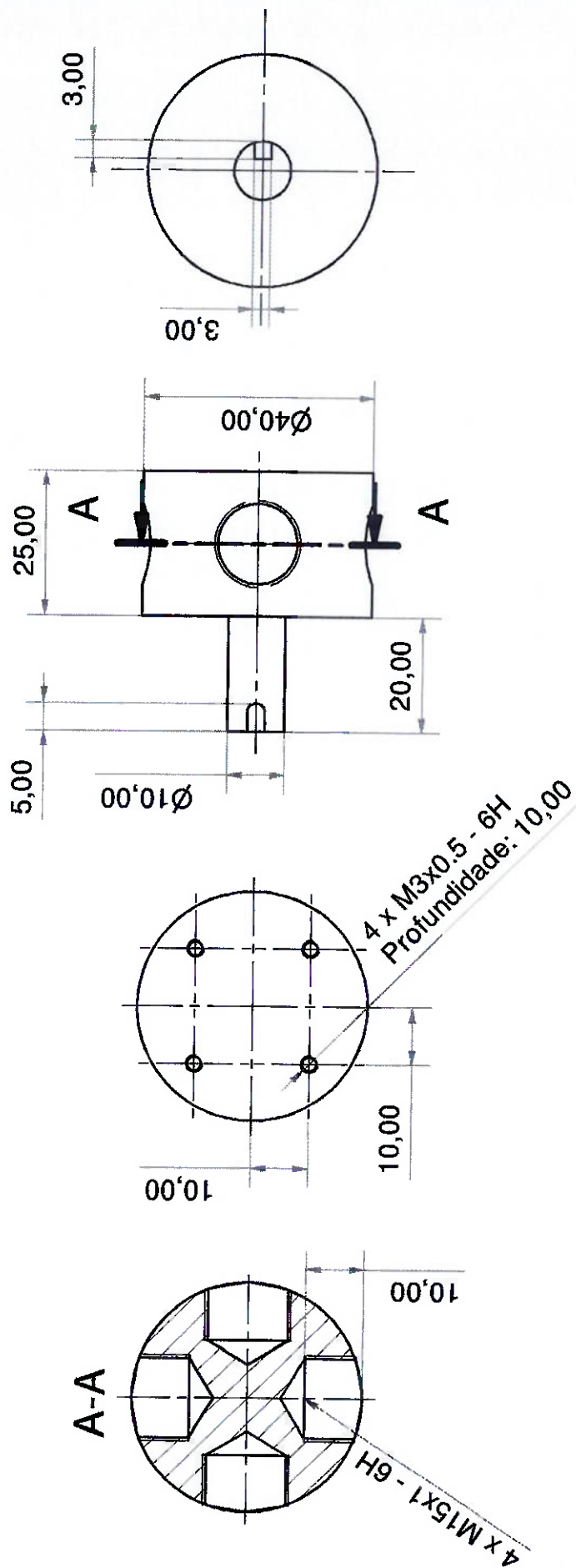


Designed by Davi Kikuchi	Checked by	Approved by - date	Date 3/6/2003	Zoom 1:1
Trabalho de Formatura		Desenho de Conjunto		
			Edition	Sheet 1 / 1



Parts List			
ITEM	QTY	TITLE	DESCRIPTION
1	1	Eixo	Aço
2	1	HasteFixa	Aço
3	1	HasteMóvel	Alumínio
4	1	FimDeCurso	Alumínio
5	1	Tampa	Alumínio
6	1	Suporte	Alumínio
7	1	Mola	
8	11	ParafusoM3x7	
9	1	Suporte - Motor	Alumínio
10	1	Conector	Alumínio

Designed by Davi Kikuchi	Checked by	Approved by - date	Date 18/6/2003	Zoom 1:3
Trabalho de Formatura		Vista Explodida		
			Edition	Sheet 1 / 1

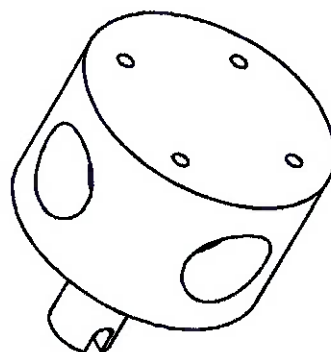


Tolerâncias gerais: $\pm 0,5$

OBS: Linhas escondidas não representadas

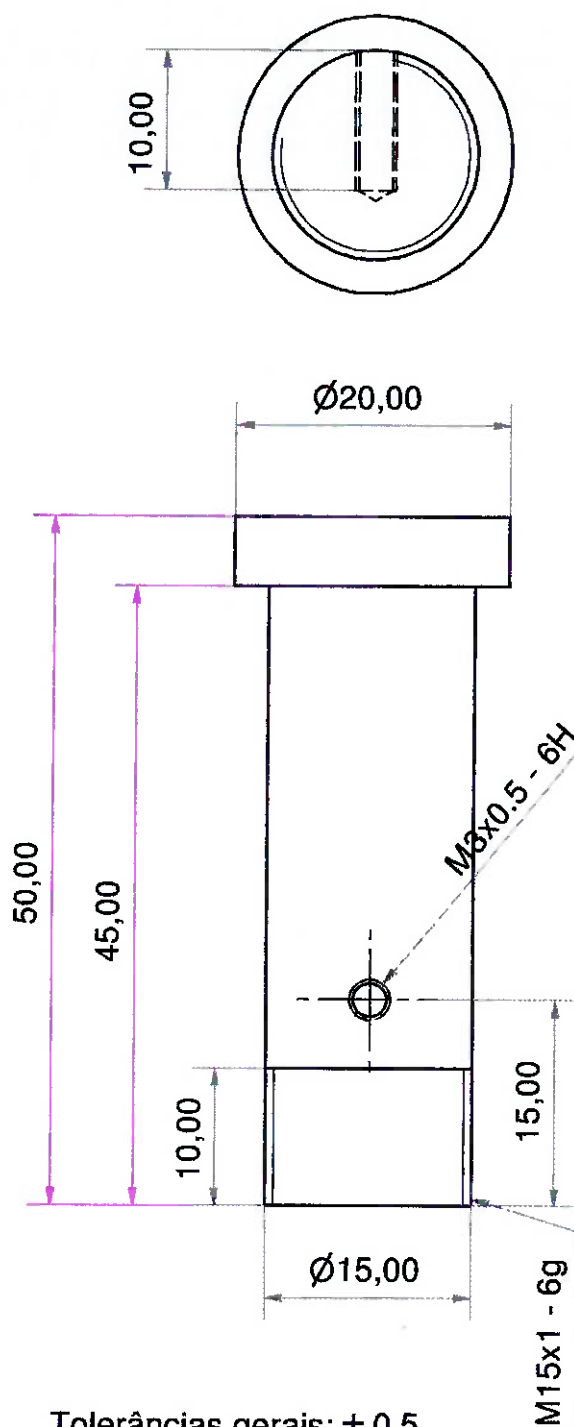
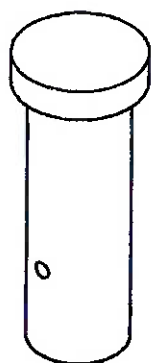
Roscas laterais são acopladas à peça HasteFixa

Roscas paralelas são acopladas a parafusos M3



Designed by Davi Kikuchi	Checked by	Approved by - date	Date 12/6/2003	Zoom 1:1
Trabalho de Formatura			Eixo	
Peça No.1			Edition	Sheet 1 / 1

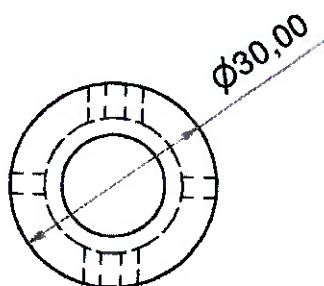
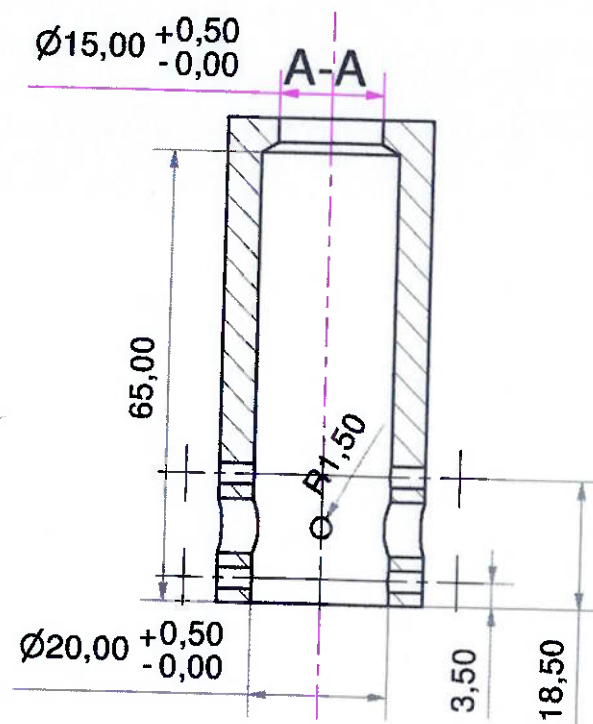
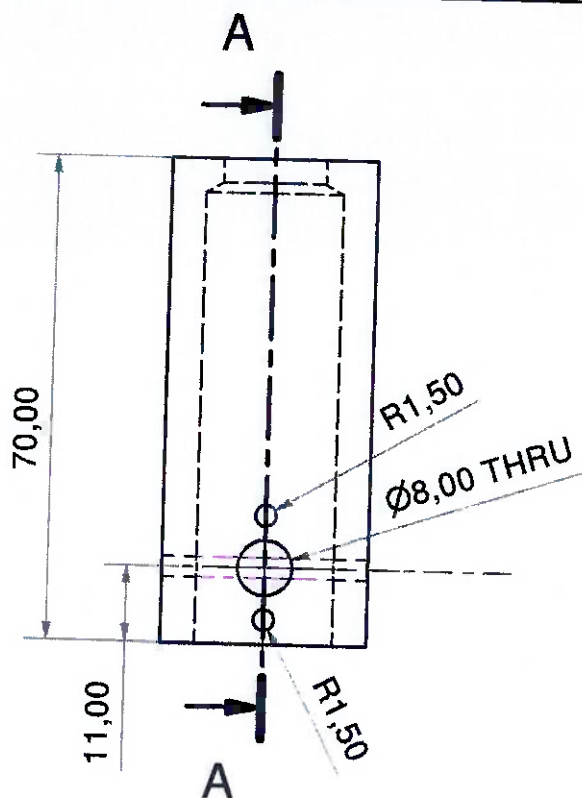
(1 : 1)



Tolerâncias gerais: $\pm 0,5$

OBS: Rosca externa acoplada à peça Disco
Furo rosqueado lateral acoplado à parafuso M3
Acoplada com folga à peça HasteMóvel
(diâmetros maior e menor)

Designed by Davi Kikuchi	Checked by	Approved by - date	Date 29/5/2003	Zoom 2:1
Trabalho de Formatura		HasteFixa		
		Peça No.2	Edition	Sheet 1 / 1



(1 : 2)

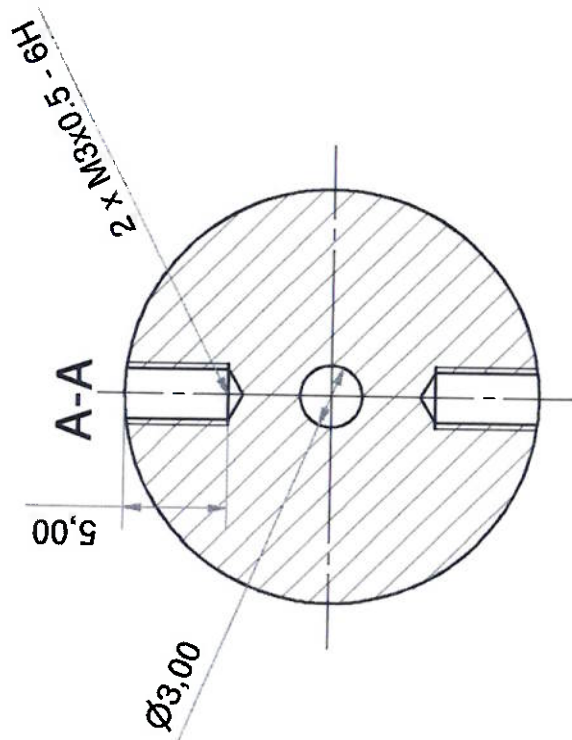
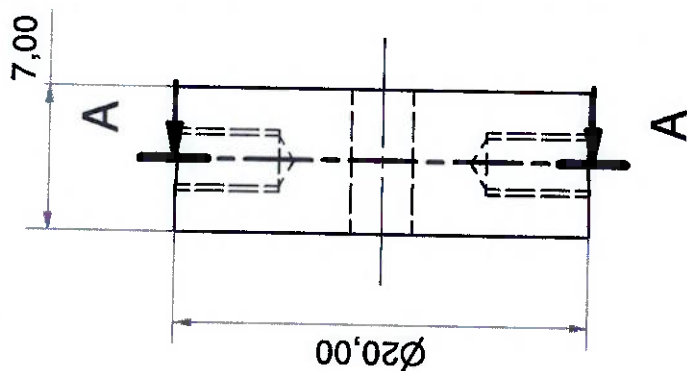


Tolerâncias gerais: $\pm 0,5$

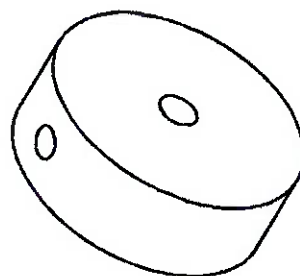
OBS: Furos laterais coincidentes aos furos laterais das peças
FimDeCurso e Tampa

Furos centrais (menor e alargado) são ajustados com folga
em relação à peça HasteFixa

Designed by Davi Kikuchi	Checked by	Approved by - date	Date 28/5/2003	Zoom 1:1
Trabalho de Formatura		HasteMóvel		
		Peça No.3	Edition	Sheet 1 / 1



(2 : 1)

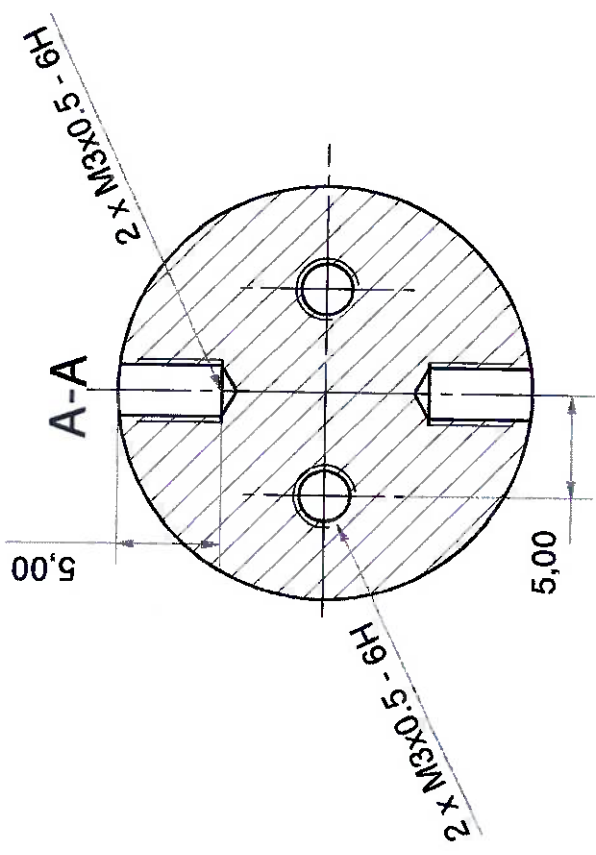
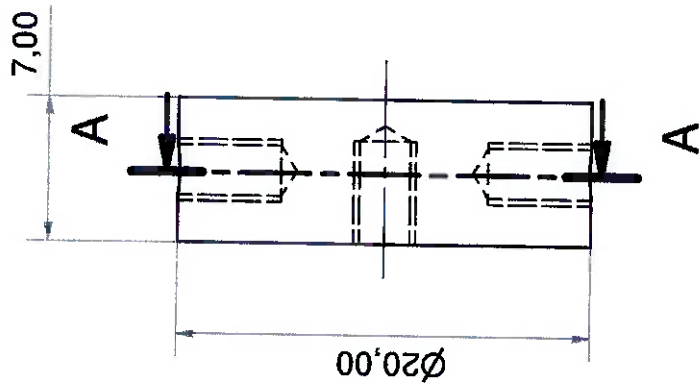


Tolerâncias gerais: $\pm 0,5$

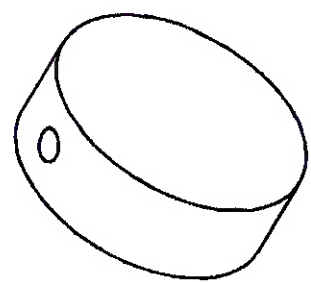
OBS: Roscas são acopladas à parafusos M3

Furos laterais coincidentes aos furos laterais da peça HasteMóvel

Designed by Davi Kikuchi	Checked by	Approved by - date	Date 26/5/2003	Zoom 3:1
Trabalho de Formatura			FimDeCurso	
Peça No.4			Edition	Sheet 1 / 1



(2 : 1)



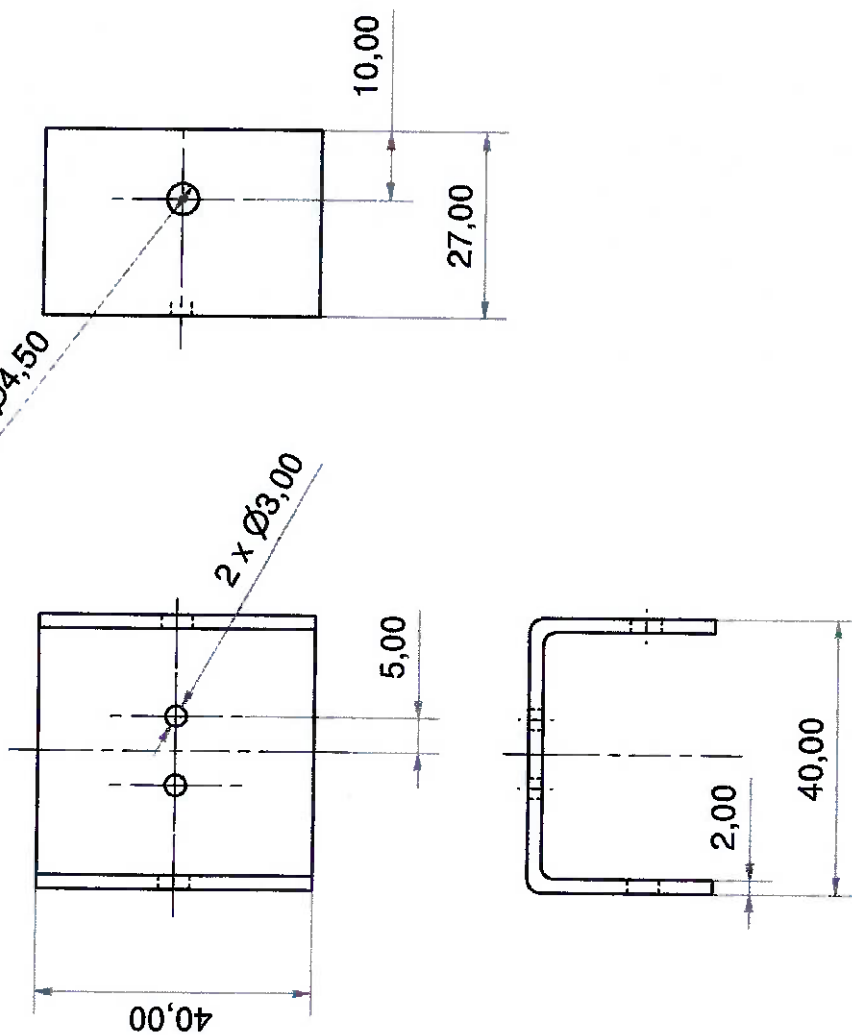
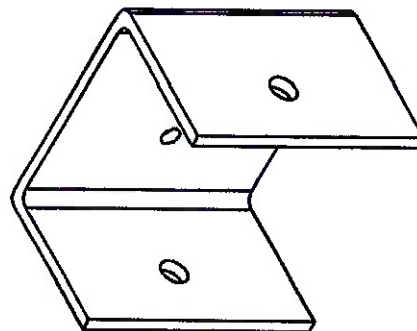
Tolerâncias gerais: $\pm 0,5$

OBS: Roscas são acopladas à parafusos M3

Furos laterais coincidentes aos furos laterais da peça Haste Móvel

Furos centrais coincidentes aos furos centrais da peça Suporte

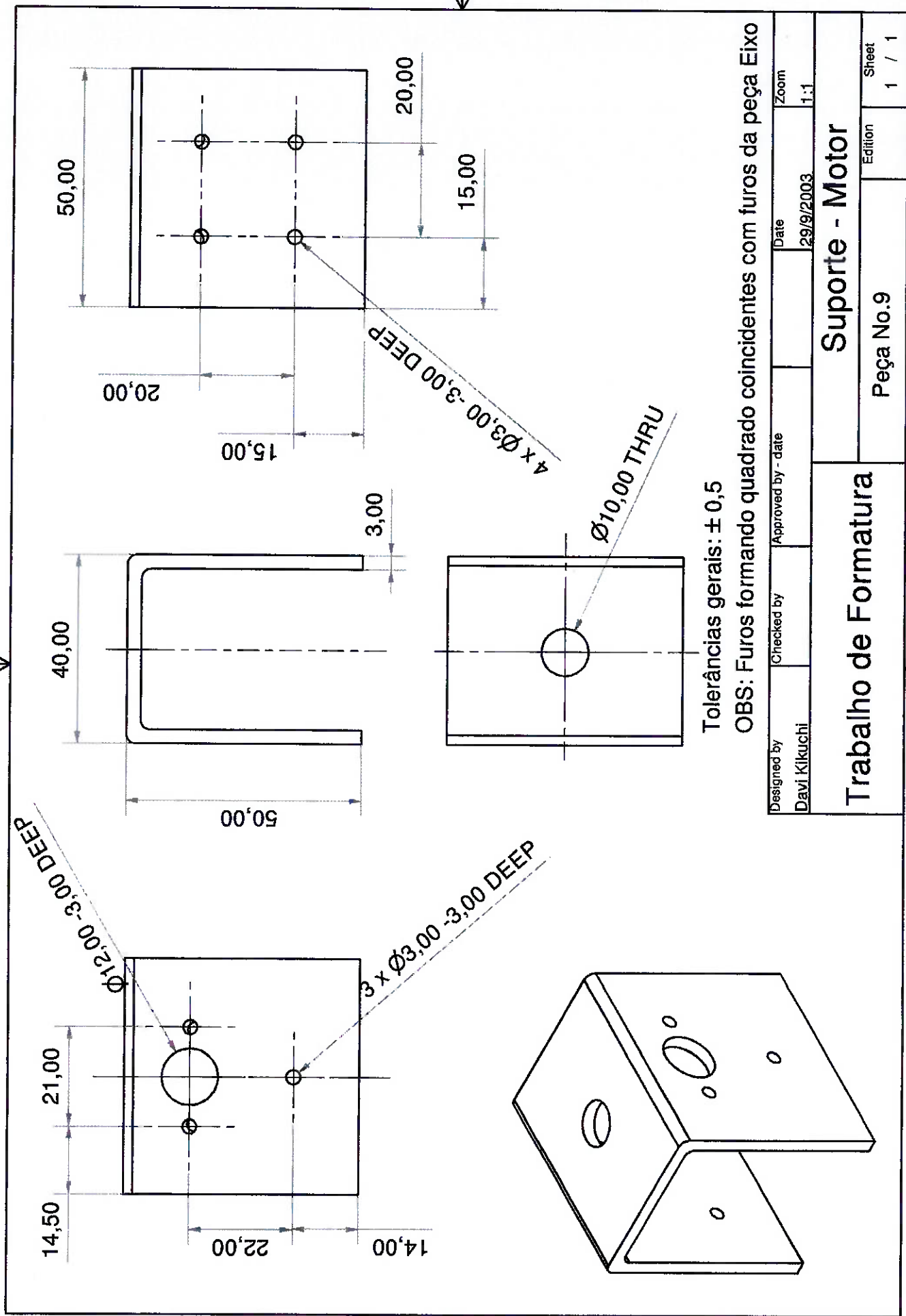
Designed by Davi Kikuchi	Checked by	Approved by - date	Date 27/5/2003	Zoom 3:1
Trabalho de Formatura			Tampa	
Peça No.5			Edition	Sheet 1 / 1



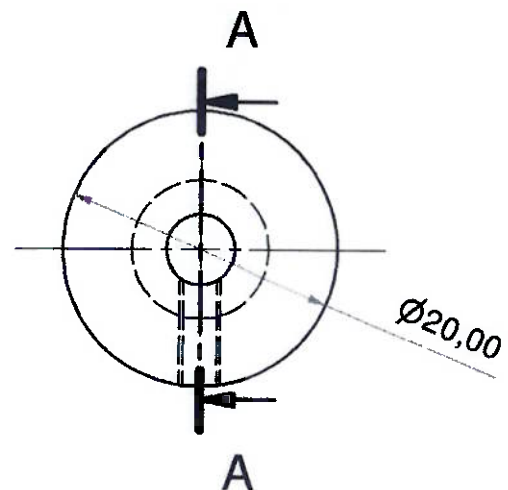
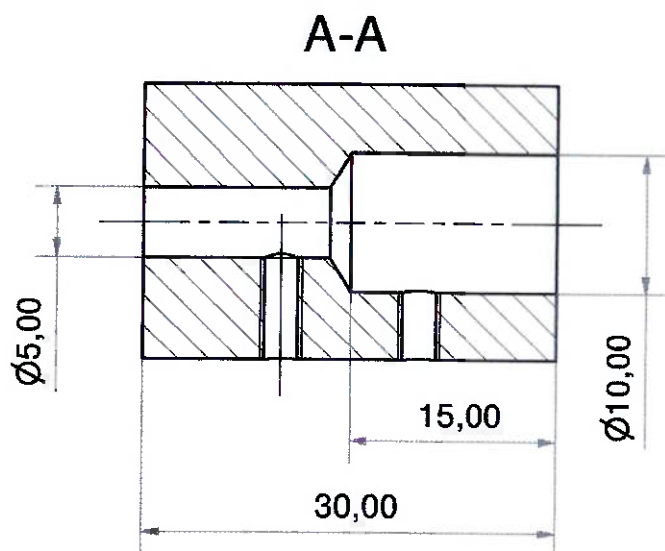
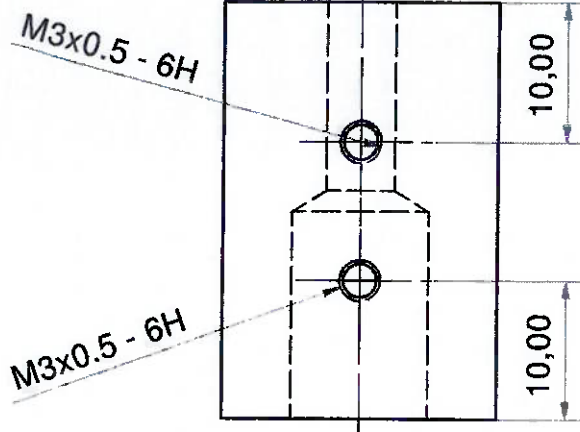
Tolerâncias gerais: $\pm 0,5$

OBS: Furos centrais coincidentes aos furos centrais da peça Tampa

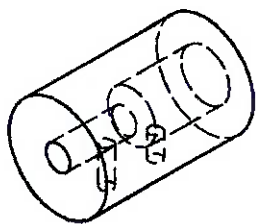
Designed by Davi Kikuchi	Checked by	Approved by - date	Date 27/5/2003	Zoom 1:1
Trabalho de Formatura			Suporte	
Peça No.6			Edition	Sheet 1 / 1



Designed by Davi Kikuchi	Checked by	Approved by - date	Date 29/9/2003	Zoom 1:1
Trabalho de Formatura			Suporte - Motor	
Peça No.9			Edition 1	Sheet 1 / 1



(1 : 1)



Tolerâncias gerais: $\pm 0,5$

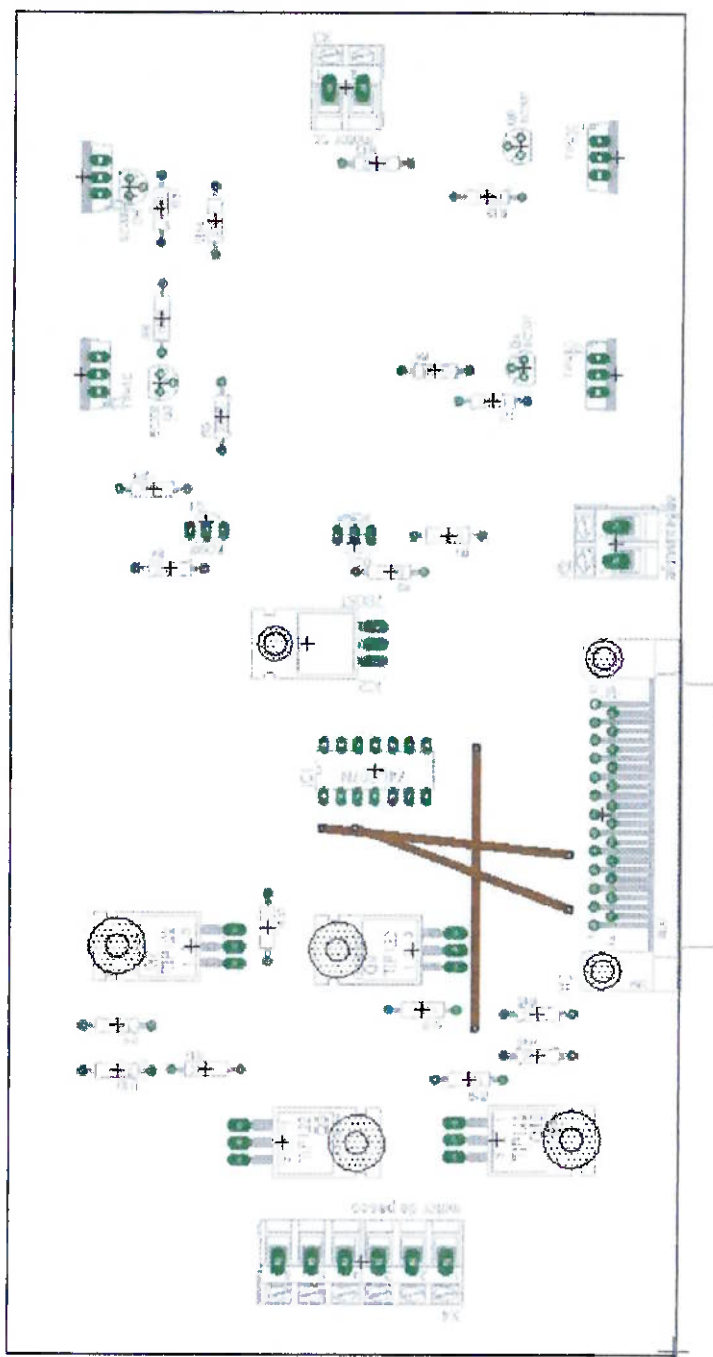
OBS: Roscas para parafusos M3

Furo maior ajustado à peça Eixo com interferência

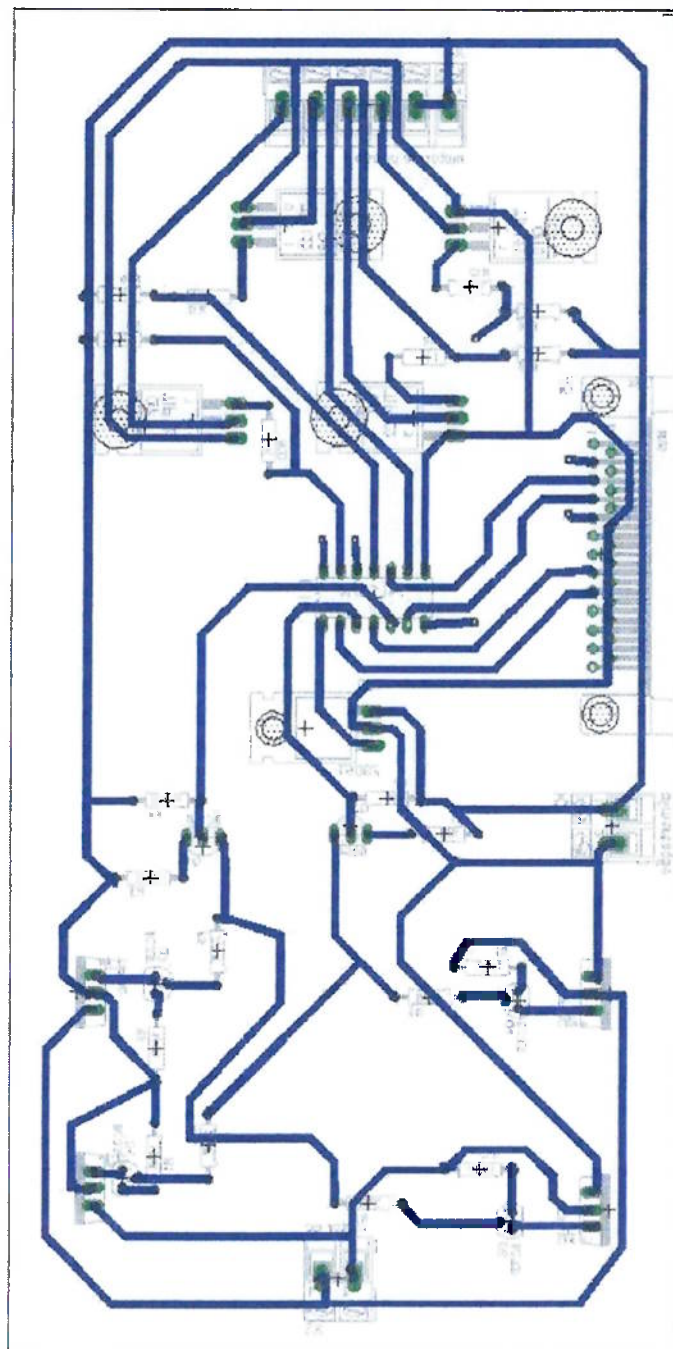
Designed by Davi Kikuchi	Checked by	Approved by - date	Date 17/11/2003	Zoom 2:1
Trabalho de Formatura		Conector		
		Peça No.10	Edition	Sheet 1 / 1

ANEXO B – Layout da Placa Contendo os Drivers do Dispositivo

Vista superior



Vista inferior



ANEXO C – Código fonte do software de controle

TF_controle.cpp

```

/*****
/****
/****          TF_controle: Software de controle - Trabalho de Formatura          ****
/****          ****
/****          Autor: Davi Yoshinobu Kikuchi          ****
/****          ****
/****          ****
/****          ****
*****/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <fstream.h>
#include <conio.h>
#include <windows.h>

#define LPT 0x378

#pragma intrinsic (outp(unsigned short port, int databyte));

void tempo (int cont)

/* Promove um atraso entre o acionamento das bobinas do motor de passo. O valor cont corresponde
ao número de pares de bobinas já acionadas de modo a permitir uma aceleração através da alte-
ração do atraso. */

{
    switch (cont) {
        case 0:
            Sleep (125);
            break;
        case 1:
            Sleep (100);
            break;
        case 2:
            Sleep (75);
            break;
        case 3:
            Sleep (50);
            break;
        default:
            Sleep (25);
            break;
    }
}

int motor_cc (int valor_atual, int sentido)

/* Aciona o motor cc.
valor_atual: valor contido atualmente no endereço
sentido = +1 -> sentido horário
sentido = -1 -> sentido anti-horário
qualquer outro valor -> motor parado */

{
    int valor = valor_atual&0x0F;

    Sleep (50);
    outp (LPT, valor);
}

```

```

        Sleep (50);

        switch (sentido) {
            case 1:
                valor = valor|0x80;
                outp (LPT, valor);
                break;

            case -1:
                valor = valor|0x40;
                outp (LPT, valor);
                break;

            default:
                break;
        }

        return valor;
    }

int motor_passo (int valor_atual, double ang)

/* Aciona o motor de passo. A função retorna o valor contido no endereço após a movimentação.
   valor_atual: valor contido atualmente no endereço
   ang: ângulo a ser deslocado, positivo ou negativo (graus) */

{
    int valor = valor_atual;
    double ang_atual;

    if (ang > 0) {
        for (ang_atual=0; ang_atual<=ang-1.8; ang_atual=ang_atual+1.8) {
            valor = ((valor<<1) + ((valor&8)>>3))&15;
            outp (LPT, valor);
            tempo ((int)min((ang_atual/1.8), ((ang-ang_atual)/1.8-1)));
        }
        return valor;
    }

    if (ang < 0) {
        for (ang_atual=0; ang_atual>=ang+1.8; ang_atual=ang_atual-1.8) {
            valor = (valor>>1) + 8*(valor&1);
            outp (LPT, valor);
            tempo ((int)min((-ang_atual/1.8), ((-ang+ang_atual)/1.8-1)));
        }
        return valor;
    }

    if (ang == 0) {
        outp (LPT, valor);
        Sleep (25);
        return valor;
    }

    return valor;
}

int iniciar (void)

/* Inicializa os valores nos endereços das entradas dos motores. */

{
    int valor = 3;
    outp (LPT, valor);
    return valor;
}

```

```

int voltar_inicio (int valor)

/* Retornar o eixo do motor de passo para sua posição inicial. */

{
    int valor_atual = valor;
    motor_passo (valor_atual, -90);
    return valor_atual;
}

void dados_validos (void)

/* Verifica se os sensores de ultra-som estão conectados à superfície do tubo. */

{
    // Função não implementada!!!
}

void ler_sensores (int i, double dados[20][2])

/* Realiza a leitura dos dados adquiridos pelos sensores. */

{
    // Função não implementada!!!
    dados[i][0] = 3;
    dados[i+10][0] = 3;
    dados[i+20][0] = 3;
    dados[i+30][0] = 3;
    dados[i][1] = 15;
    dados[i+10][1] = 15;
    dados[i+20][1] = 15;
    dados[i+30][1] = 15;
    Sleep (1000);
}

int comando_manual (int valor)

/* Movimenta os motores através de comandos do teclado. */

{
    int valor_atual = valor;
    char ang[5];

    cout << "Movimentacao Manual" << endl << endl;
    cout << "Motor de Passo (angulo em graus): " << endl;
    cin >> ang;
    while (strcmp(ang, "ok") != 0) {
        valor_atual = motor_passo (valor_atual, atof(ang));
        cin >> ang;
    }
    cout << "Motor CC (1, -1 ou 0): " << endl;
    cin >> ang;
    while (strcmp(ang, "ok") != 0) {
        valor_atual = motor_cc (valor_atual, atoi(ang));
        cin >> ang;
    }
    cout << endl << "Iniciar inspecao" << endl;
    getch ();

    return valor_atual;
}

```

```

void inspecionar (int valor)
/* Realiza a movimentação para inspeção do duto. */
{
    int i;
    int valor_atual = valor;
    double dados[40][2];
    ofstream saida;

    saida.open ("dados.k");

    while (1) {
        for (i=0; i<10; i++) {
            valor_atual = motor_cc (valor_atual, 1);
            dados_validos (); Sleep (1000);
            valor_atual = motor_cc (valor_atual, 0);
            ler_sensores (i, dados);
            valor_atual = motor_cc (valor_atual, -1);
            dados_validos (); Sleep (1500);
            valor_atual = motor_cc (valor_atual, 0);
            valor_atual = motor_passo (valor_atual, 9);
        }
        valor_atual = voltar_inicio (valor_atual);

        for (i=0; i<40; i++)
            saida << dados[i][0] << " " << dados[i][1] << endl;
        Sleep (5000);
    }

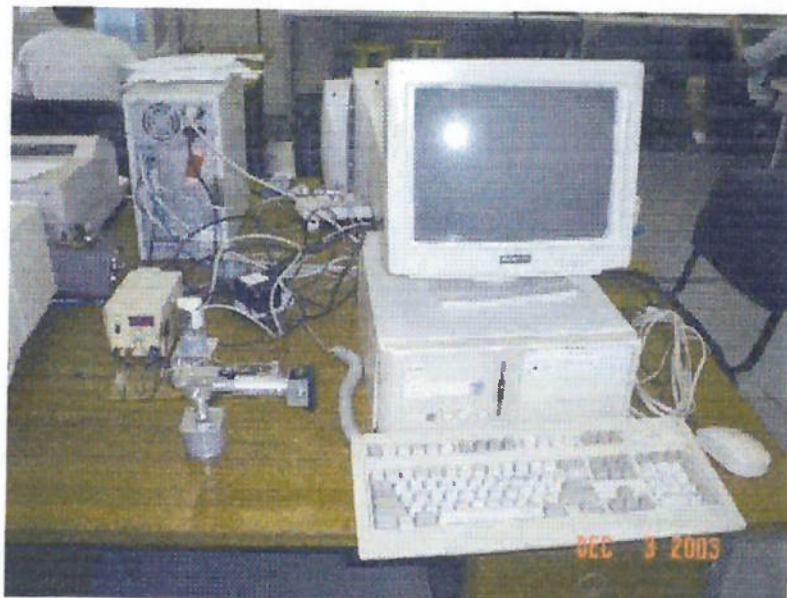
    saida.close ();
}

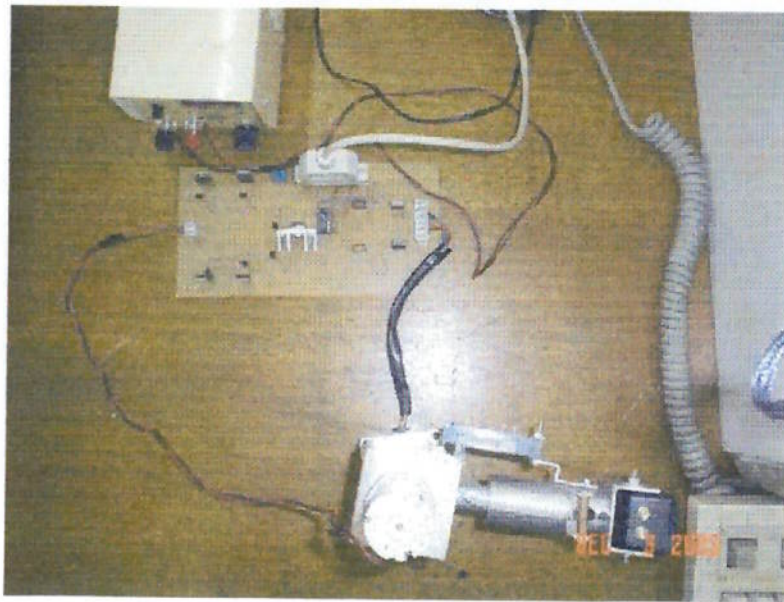
void main (void)
/* Função principal. */
{
    int valor;          // Valor contido atualmente no endereço

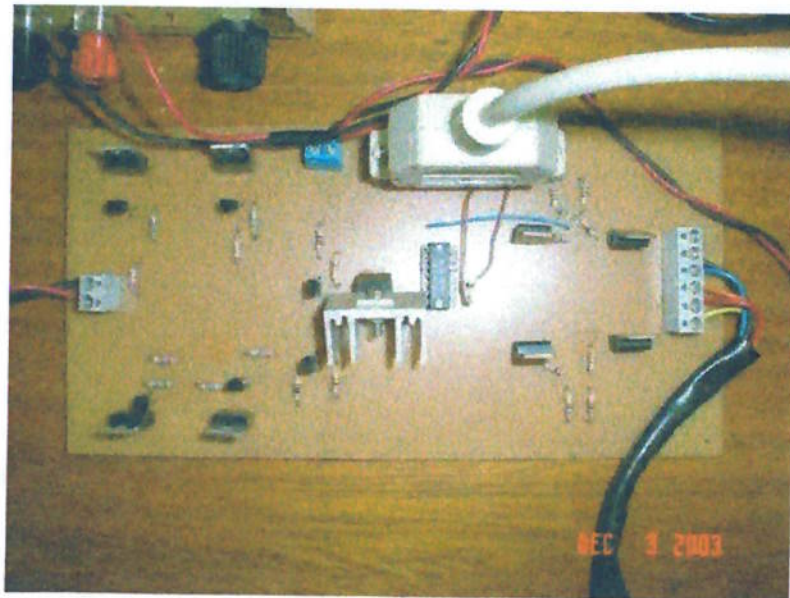
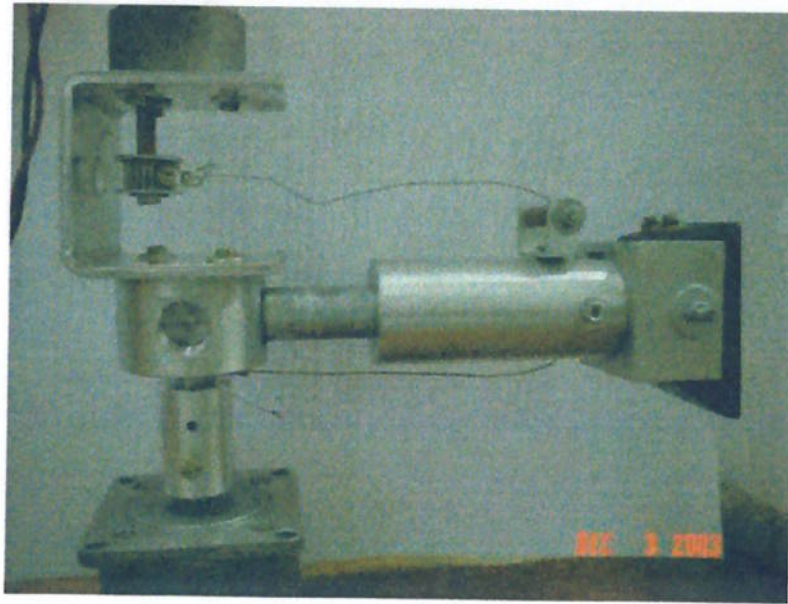
    valor = iniciar ();
    valor = comando_manual (valor);
    inspecionar (valor);
}

```

ANEXO D – Fotografias do dispositivo







REFERÊNCIAS

J. F. Shigley; C. R. Mischke **Mechanical Engineering Design**. 5. ed. McGraw-Hill, 1989.

Documentação on-line do MATLAB. Disponível em:

<<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.shtml>>.

BARD HP. Apresenta projetos e teorias usadas na construção de robôs. Disponível em: <<http://www.vabsco.com/bardhp/>>.

PORTA PARALELA. Informações sobre como utilizar a porta paralela de um computador. Disponível em: <<http://www.rogercom.com/pparalela/introducao.htm>>.

Datasheets de componentes eletrônicos.

- Motor CC. Disponível em:

<<http://www.buehlermotor.com/img/products/ppdf/1.61.046.311-12Vus.pdf>>.

- Motor de passo. Disponível em: <<http://www.sanyo-denki.com/Products/Stepping%20Motors/catalog/file/2phase.pdf>>.

- Regulador de tensão 7805. Disponível em:

<<http://www.ee.washington.edu/stores/DataSheets/voltreg/78xx.pdf>>.

- Buffer 74LS07N. Disponível em: <http://elektrotechnik.fh-gelsenkirchen.de/ie_lab/Labor/Datenblaetter/digital/74ls07n.pdf>.

- Transistor BC337. Disponível em:

<http://www-us.semiconductors.philips.com/acrobat/datasheets/BC337_3.pdf>.

- Transistor TIP 41C. Disponível em:

<<http://pubpages.unh.edu/~aperkins/pdf/TIP-devices/TIP41.pdf>>.

- Transistor TIP122. Disponível em:

<<http://www.fairchildsemi.com/ds/TI/TIP120.pdf>>.