

hAm

# PROJETO DE UM MANCAL MAGNÉTICO

Trabalho de Formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

São Paulo, 2001

Dedico este trabalho aos meus pais, que  
sempre me apoiaram, e a Hérica por sua  
compreensão.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter alcançado todos os objetivos propostos.

Agradeço também ao Prof. Dr. Oswaldo Horikawa pela atenção dedicada na execução deste projeto e a minha família pelo apoio.

## ÍNDICE

RESUMO .....	1
INTRODUÇÃO .....	3
1 MANCAL INICIAL.....	4
1.1 O MANCAL MAGNÉTICO .....	4
1.2 ESTABILIDADE RADIAL .....	5
1.3 ESTABILIDADE QUANTO À INCLINAÇÃO DO ROTOR .....	5
1.4 ESTABILIDADE AXIAL .....	6
1.5 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO MANCAL .....	7
2 ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE .....	10
3 CONCEITOS BÁSICOS DE ELETROMAGNETISMO .....	11
3.1 CAMPO MAGNÉTICO NUM SOLENÓIDE .....	12
4 FECHAMENTO DO CIRCUITO MAGNÉTICO.....	15
4.1 MANCAL COM CIRCUITO MAGNÉTICO ABERTO .....	15
4.2 MANCAL COM CIRCUITO MAGNÉTICO FECHADO .....	16
4.3 RIGIDEZ AXIAL E RADIAL.....	17
4.4 PROTÓTIPOS PARA LEVANTAMENTO DA RIGIDEZ.....	18
5 PROJETO DO MANCAL.....	22
5.1 USINAGEM.....	22
5.2 ÍMÃS PERMANENTES.....	22
5.3 ELETROÍMÃ .....	27
6 MODELAGEM DO MANCAL .....	31
6.1 FUNCIONAMENTO DO MANCAL .....	31
6.2 MODELO DINÂMICO .....	33
6.2.1 MODELAGEM DO MANCAL .....	33
6.2.2 MODELAGEM DA BOBINA.....	34
6.3 O CONTROLADOR .....	35
6.3.1 CONTROLADOR <i>PID</i> .....	36
6.3.2 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA .....	37
6.3.3 ANÁLISE MATEMÁTICA DO CONTROLADOR.....	37
7 ESCOLHA DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR.....	44
7.1 ESCOLHA DO PARÂMETRO PROPORCIONAL.....	45

7.2	ESCOLHA DO PARÂMETRO DERIVATIVO .....	47
7.3	ESCOLHA DO PARÂMETRO INTEGRAL.....	49
7.4	ESCOLHA DO PARÂMETRO DO FILTRO DO CONTROLADOR.....	51
8	IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE NO MANCAL.....	53
8.1	CONTROLADOR NO DOMÍNIO $s$ .....	53
8.2	CONTROLADOR NO DOMÍNIO DA VARIÁVEL $z$ .....	53
8.3	EQUAÇÃO DE DIFERENÇAS DO CONTROLADOR.....	55
8.4	A PLACA DE CONVERSÃO A/D E D/A.....	56
8.4.1	FUNÇÕES PRÉ-DEFINIDAS.....	56
8.4.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA PLACA [7].....	56
8.4.3	ENDEREÇO DA PLACA.....	57
8.4.4	CONTADORES .....	57
8.4.5	MODO DE INTERRUPÇÃO E DMA .....	57
8.4.6	PROGRAMA DE CONTROLE .....	58
8.5	COMPORTAMENTO REAL DO SISTEMA.....	61
8.5.1	NOVA DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ELETROMAGNÉTICA ...	64
8.5.2	RIGIDEZ AXIAL E RADIAL.....	65
	CONCLUSÃO .....	66
	TRABALHOS FUTUROS .....	68
	BIBLIOGRAFIA .....	69
	ANEXO.....	71

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mancal magnético com circuito magnético aberto .....	4
Figura 2: Deslocamento radial .....	5
Figura 3: Inclinação do rotor.....	5
Figura 4: Posição axial do mancal com rotação nula .....	7
Figura 5: Reposta à entrada em degrau.....	7
Figura 6: Posição axial do rotor com rotação de 900 rpm .....	8
Figura 7: Posição radial do rotor com 900 rpm – medição do sensor 2 .....	8
Figura 8: Posição radial do rotor com 900 rpm – medição do sensor 3 .....	9
Figura 9: Campo magnético num condutor com corrente elétrica.....	11
Figura 10 : Campo magnético num solenóide percorrido por corrente elétrica – solenóide em corte.....	12
Figura 11: Fluxo magnético orientado por material ferromagnético – Desenho em corte .....	13
Figura 12: Conjunto esquerdo do mancal prévio.....	15
Figura 13: Mancal com circuito magnético fechado .....	16
Figura 14: Mancal fora da posição de equilíbrio.....	17
Figura 15: Protótipo do lado direito do mancal com campo magnético fechado por material ferromagnético. ....	18
Figura 16: Protótipo do lado direito do mancal com campo magnético fechado por material não-ferromagnético .....	18
Figura 17: Protótipo do lado direito do mancal com campo magnético aberto.....	19
Figura 18: Dispositivo para medir a força de atração entre um par de protótipo.....	19
Figura 19: Levantamento da curva de deslocamento da viga versus a distância entre os ímãs .....	20
Figura 20: Configuração para medir a rigidez da viga.....	23
Figura 21: Curva de rigidez da viga .....	24
Figura 22: Configuração para levantar a rigidez magnética $k_{mag}$ .....	25
Figura 23: Curva da folga <i>versus</i> força para o ímã permanente .....	26
Figura 24: Configuração com rotor deslocado de $\Delta x=0.5mm$ para a esquerda .....	26
Figura 25: Eletroímã projetado.....	28
Figura 26: Configuração para levantar a curva força <i>versus</i> corrente do eletroímã..	28

## PROJETO DE UM MANCAL MAGNÉTICO COM CIRCUITO MAGNÉTICO FECHADO

Figura 27: Gráfico da força <i>versus</i> corrente para o eletroímã .....	29
Figura 28: Configuração do novo mancal magnético .....	31
Figura 29: Rotor deslocado axialmente para a esquerda.....	32
Figura 30: Rotor deslocado de $b$ para a direita – Configuração para obter a Equação 12.....	34
Figura 31: Representação elétrica de um circuito RL .....	35
Figura 32: Representação em diagrama de blocos do sistema com controlador <i>PID</i> .....	36
Figura 33: Diagrama de blocos do sistema .....	45
Figura 34: Resposta do sistema a uma entrada em degrau de 0,2mm – controlador puramente proporcional com $K=-0,5$ .....	45
Figura 35: Resposta do sistema a uma entrada em degrau de 0,2mm – sistema com controlador <i>PID</i> , com os valores de $P$ apresentados na figura .....	46
Figura 36: Ampliação da Figura 33 .....	47
Figura 37: Resposta do sistema com controlador <i>PD</i> a entrada em degrau de 0,2mm .....	48
Figura 38: Resposta do sistema a uma entrada em degrau de 0,2mm – sistema com controlador <i>PID</i> , com os valores de $D$ apresentados na figura .....	49
Figura 39: Resposta do sistema com controlador <i>PI</i> a entrada em degrau de 0,2mm .....	50
Figura 40: Resposta do sistema a uma entrada em degrau de 0,2mm – sistema com controlador <i>PID</i> , com os valores de $I$ apresentados na figura.....	51
Figura 41: Resposta do sistema a uma entrada em degrau de 0,2mm – sistema com controlador <i>PID</i> , com os valores de $\tau=1/N$ apresentados na figura .....	52
Figura 42: Diagrama de blocos para o sistema com controlador discreto.....	54
Figura 43: Resposta a uma entrada em degrau de 0,1mm para o sistema com controlador <i>PID</i> contínuo e discreto .....	54
Figura 44: Resposta real do sistema à entrada em degrau de 0,1mm – sistema com controlador <i>PID</i> .....	61
Figura 45: Sinal de saída do sensor apontado para um alvo parado .....	62
Figura 46: Posicionamento axial do rotor do mancal magnético .....	62
Figura 47: Mancal magnético projetado com rotor levitando.....	63
Figura 48: Resposta à entrada em degrau de 0,1mm obtida por simulação para os novos valores dos parâmetros <i>PID</i> e para $k_{em}=4$ N/A.....	64

## PROJETO DE UM MANCAL MAGNÉTICO COM CIRCUITO MAGNÉTICO FECHADO

Figura 49: Ímãs em campo aberto ..... 65

Figura 50: Ímãs em campo fechado ..... 65



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de Tensão obtido na saída do sensor .....	20
Tabela 2: Peso versus flexão da viga .....	23
Tabela 3: Flexão da viga <i>versus</i> folga entre os ímãs .....	24
Tabela 4: Peso <i>versus</i> corrente para o eletroímã .....	29
Tabela 5: Dados do mancal magnético .....	30
Tabela 6: Tabela de <i>Routh</i> para o sistema com controlador P .....	38
Tabela 7: Tabela de <i>Routh</i> para sistema com controlador PD.....	40
Tabela 8: Tabela de <i>Routh</i> para o sistema com controlador PI .....	42

## RESUMO

Esse trabalho pretende apresentar o projeto de um mancal magnético com controle ativo somente na direção axial do rotor. O projeto do mancal foi baseado num outro já existente que foi objeto de uma tese de mestrado [5] e de um projeto de iniciação científica[4]. No corpo do trabalho são apresentados o mancal magnético existente e as alterações propostas para o novo mancal, bem como seus resultados.

Apresenta-se a seguir um escopo dos assuntos tratados neste trabalho.

No tópico 1 é apresentado o mancal inicial e suas características construtivas, bem como sua resposta dinâmica. Partindo dessas características, no tópico 2 é estabelecida a necessidade que gerou o projeto de um novo mancal magnético, a qual é o aumento da rigidez magnética radial do mancal.

Em seguida, uma discussão sobre os conceitos básicos de eletromagnetismo, que são necessários para o entendimento deste trabalho, é apresentada no tópico 3. Abordou-se principalmente as diferenças entre campo magnético aberto e campo magnético fechado.

Para se provar o aumento de rigidez magnética ao se fechar o campo, construiu-se os protótipos apresentados no tópico 4. Com esses protótipos realizou-se os experimentos para levantar as curvas de rigidez dos mesmos, concluindo-se que o protótipo com campo magnético fechado possui rigidez bem maior que o mesmo com campo aberto.

Depois de provado esse aumento de rigidez, é realizado o projeto do novo mancal magnético no tópico 5. Após projetado, o mancal foi usinado pelo próprio aluno. Com o mancal pronto, realizou-se os experimentos para levantar a rigidez magnética dos ímãs permanentes e dos eletroímãs, bem como as características do sensor e amplificador utilizados no controle do mancal.

Com todas as características dos elementos que compõem o sistema, partiu-se para a modelagem matemática do mesmo apresentada no tópico 6. Essa modelagem matemática do sistema é representada por uma Função de Transferência, a qual serviu de base para a discussão de controladores que estabilizam o sistema.

Após definido o controlador que seria utilizado para estabilizar o sistema, no caso um *PID*, escolheu-se seus parâmetros de forma a ter uma resposta à entrada

em degrau que atendesse os requisitos estabelecidos para o sistema. Isso foi discutido no tópico 7.

O passo seguinte foi implementar o controlador no sistema físico real. Para tanto, o controlador obtido no domínio contínuo do tempo foi discretizado, pois o controle é realizado digitalmente, via computador. Apresenta-se também a placa de aquisição de dados utilizada para ler o sinal de sensor de posição, o qual, depois de tratado pelo programa de controle, é enviado para o atuador do sistema. Além disso, relaciona-se o diagrama NS do programa de controle utilizado. Feito isso, o sistema foi posto em funcionamento e mediu-se as características dinâmicas do mesmo, que estão apresentadas no tópico 8.

Para finalizar, conclui-se o trabalho discutindo os resultados obtidos e apresentando possíveis temas para trabalhos futuros sobre mancais magnéticos.

## INTRODUÇÃO

Esse Trabalho de Formatura tem como objetivo aplicar num projeto de pesquisa os conceitos de engenharia obtidos ao longo do curso. Esse projeto envolve principalmente conceitos de Eletromagnetismo, Projeto Mecânico e Teoria de Controle.

O projeto é um mancal magnético controlado axialmente, que tem como principal característica a ausência de atrito mecânico entre as partes móveis. Isso é uma grande vantagem em relação aos mancais de rolamento[14], por exemplo, os quais tem sua vida útil reduzida pela fadiga provocada pelo atrito mecânico. Outra vantagem decorrente é que não necessita de lubrificação, pois não há contato mecânico.

Além disso, esses mancais permitem rotações da ordem de 100.000rpm[13], muito maior do que a permitida por mancais de contato. A ausência de ruído sonoro é uma outra vantagem desses mancais. Entretanto, o mancal aerostático possui algumas dessas características[13], mas o grande diferencial do mancal magnético é trabalhar mesmo no vácuo e possuir alto grau de limpeza.

Dessa forma, o mancal magnético apresenta-se como um campo promissor no seguimento de microeletrônica, devido às características acima mencionadas. Já é aplicado em diversos equipamentos, tais como bomba turbomolecular de vácuo, equipamentos espaciais, bombas centrífugas e outros equipamentos.

## 1 MANCAL INICIAL

Apresenta-se nesse tópico o mancal inicial e suas características, bem como seu princípio de funcionamento[5]. O objetivo é embasar a discussão que é realizada nos próximos tópicos.

### 1.1 O MANCAL MAGNÉTICO

O mancal magnético é do tipo híbrido, ou seja, possui ímãs permanentes e eletroímãs. Na Figura 1 apresenta-se o croqui desse mancal prévio.

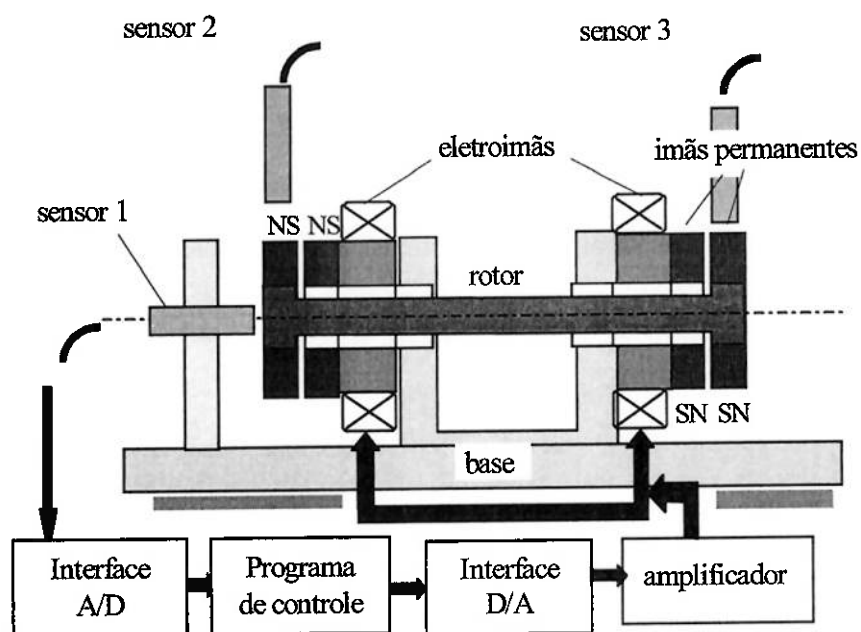


Figura 1: Mancal magnético com circuito magnético aberto

Nota-se que o mancal é constituído por dois pares de ímãs permanentes, dois eletroímãs, um rotor de alumínio, uma base de alumínio e três sensores para medir os deslocamentos axial e radial do rotor.

## 1.2 ESTABILIDADE RADIAL

Os ímãs permanentes são magnetizados na direção axial, sendo que cada par de ímãs está disposto na forma de atração. Um ímã de cada par está preso ao rotor, enquanto o outro está fixo no eletroímã, que por sua vez está solidário à base.

Esses ímãs garantem a estabilidade radial, pois conforme citado em [5], a rigidez radial ( $k_r$ ) é positiva e a força radial ( $f_r$ ) tende a alinhar os ímãs de forma a deixá-los concêntricos, pois a força radial é nula para  $\theta=90^\circ$ , vide Figura 2.

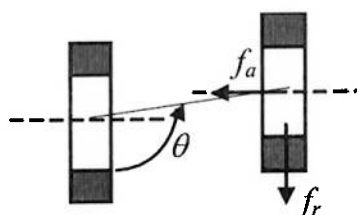


Figura 2: Deslocamento radial

Entretanto, de acordo com [5] a rigidez axial ( $k_a$ ) é negativa e a força axial ( $f_a$ ) é máxima para essa configuração ( $\theta=90^\circ$ ). Como a rigidez axial é negativa, os ímãs são instáveis nessa direção. Logo, os ímãs permanentes não garantem a estabilidade axial.

## 1.3 ESTABILIDADE QUANTO À INCLINAÇÃO DO ROTOR

O rotor tem a possibilidade de girar em torno de um eixo perpendicular ao de rotação, vide Figura 3.

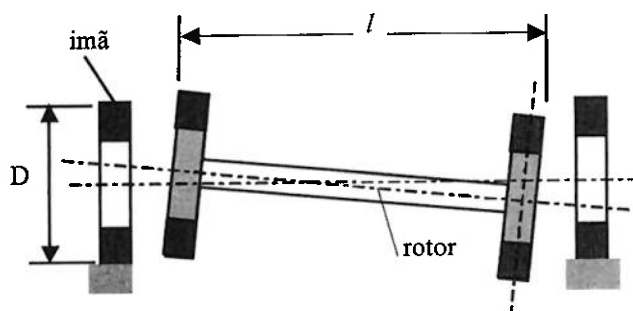


Figura 3: Inclinação do rotor

De acordo com [5] a estabilidade quanto à inclinação apresentada na Figura 3 é garantida se:

$$I > D \quad (1)$$

#### 1.4 ESTABILIDADE AXIAL

Conforme apresentado, os ímãs permanentes não garantem a estabilidade axial do rotor. Portanto, é necessário ter um controle ativo na direção axial. No caso, é utilizado um controlador *PID* na malha de controle da direção axial.

Os eletroímãs são os atuadores da malha de controle, o sensor indutivo 1 é o elemento de medição da posição axial que realimenta o controlador. O sinal do sensor é coletado por uma placa AD/DA[7] que o envia ao computador. Esse sinal é a entrada de um programa de controle com algoritmo *PID*. Após o processamento, a saída do programa é enviada para a placa de aquisição, a qual envia o sinal para um amplificador de potência. O eletroímã recebe o sinal do amplificador de potência e atua sobre o sistema. A Figura 1 dá idéia dessa malha de controle.

O sensor 2 e 3 apresentado na Figura 1 são somente para medição do deslocamento radial para análise posterior. Não são integrantes da malha de controle.

## 1.5 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO MANCAL

A seguir as características dinâmicas do mancal obtidas por [4]. De acordo com a Figura 4 percebe que a posição axial do rotor tem variação menor que  $1\mu\text{m}$ .

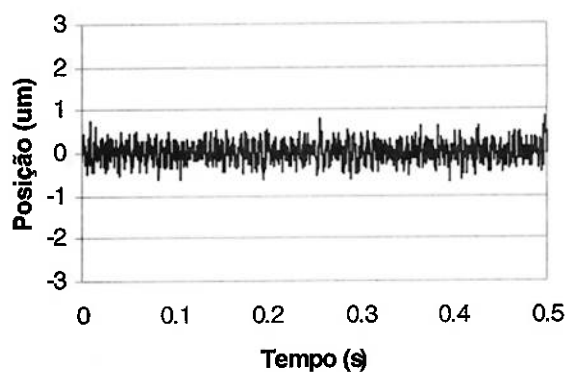


Figura 4: Posição axial do mancal com rotação nula

A Figura 5 apresenta a resposta do mancal a uma entrada em degrau, nota-se que o tempo de acomodação é 15s e o *overshoot* é 40%.

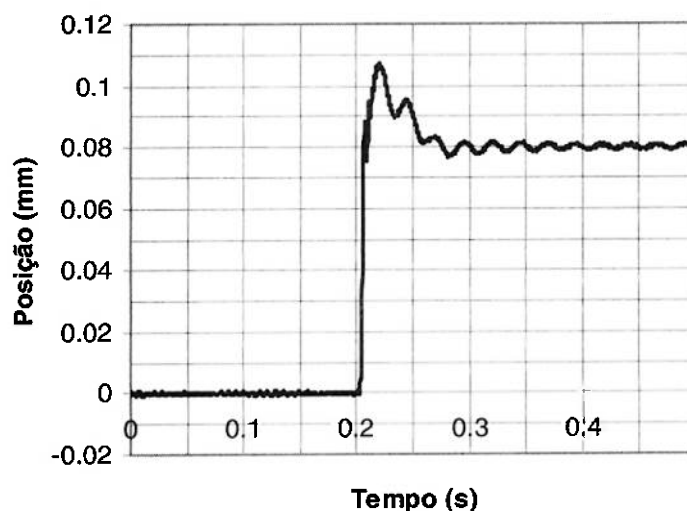


Figura 5: Reposta à entrada em degrau

A Figura 6 apresenta a variação da posição axial do rotor com rotação de 900 rpm. Percebe-se que a variação aumentou para  $4\mu\text{m}$ .



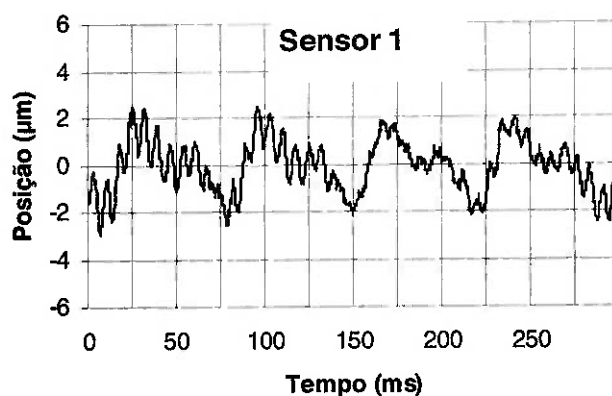


Figura 6: Posição axial do rotor com rotação de 900 rpm

A posição radial do rotor com rotação de 900 rpm está representada nas Figuras 7 e 8. Nota-se que a posição varia de até 0,25mm.

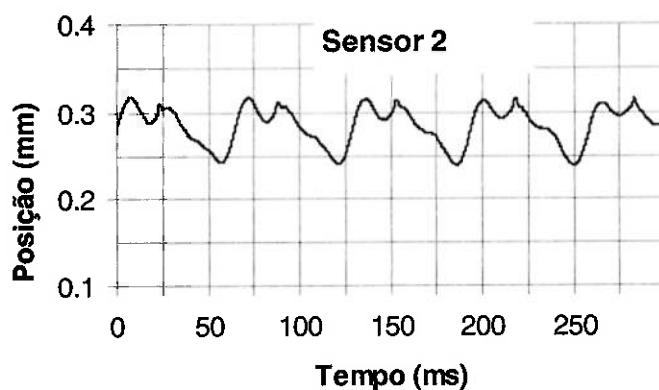


Figura 7: Posição radial do rotor com 900 rpm – medição do sensor 2

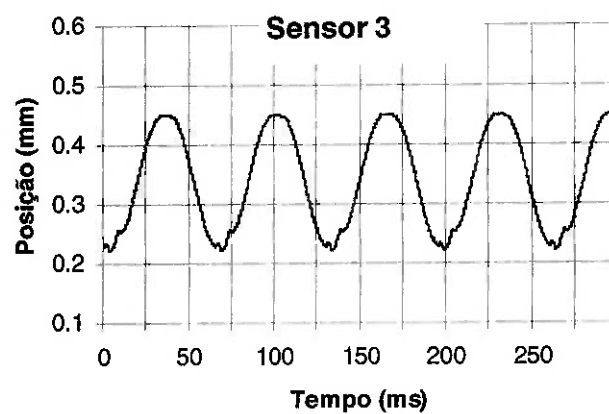


Figura 8: Posição radial do rotor com 900 rpm – medição do sensor 3

Depois de apresentar o mancal inicial com suas características, inicia-se nos próximos tópicos a discussão do tema desse Trabalho de Formatura.

## 2 ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE

Conforme apresentado nas Figuras 7 e 8, nota-se que variação da posição radial do rotor quando o mesmo é posto em rotação é muito alta (0,25mm). Isso é devido à rigidez radial desse mancal que é muito baixa, qualquer pequeno esforço no sentido radial, desloca o mesmo da posição. Quando a rotação ultrapassa 1000 rpm o mancal se torna instável.

Então, observa-se que a variação na posição radial é muito grande. É importante salientar que não há controle ativo na direção radial, ou seja, a força de restauração é simplesmente proporcional à rigidez dos ímãs, que é constante. Logo, se essa força não for suficiente para trazer o rotor para a posição original, haverá o erro na direção radial ou até mesmo causará a instabilidade.

Uma das soluções seria implementar controle ativo na direção radial usando os próprios eletroímãs de controle da posição axial. Para tal, seria necessário uma nova modelagem do sistema. Outra solução seria aumentar a rigidez dos ímãs permanentes, sendo essa a escolhida nesse projeto.

Assim, o aumento da rigidez radial do mancal magnético é a necessidade estabelecida. Como o projeto tem caráter científico, é proposta uma alternativa como solução e são feitos vários experimentos para comprovar a validade dessa solução. Não sendo aplicável o conceito de matriz de decisão para escolher qual a melhor solução, pois, como comentado, o objetivo é tecer a validade da solução proposta de forma experimental.

Antes de apresentar um estudo da solução é abordado alguns conceitos básicos de eletromagnetismo.

### 3 CONCEITOS BÁSICOS DE ELETROMAGNETISMO

A experiência realizada por Oersted, em 1820, demonstrou que um condutor percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético [1]. A Figura 9 representa um condutor percorrido por uma corrente elétrica e o campo magnético por ele gerado.

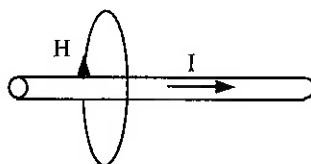


Figura 9: Campo magnético num condutor com corrente elétrica

Pela lei de Àmpere, tem-se:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (2)$$

Sendo que:  $H$ : campo magnético gerado  
 $dl$ : diferencial de comprimento da curva fechada  
 $I$ : corrente que circula no condutor

Essa lei de Àmpere permite calcular a intensidade do campo magnético  $H$  ao redor de uma curva fechada gerado por um condutor com corrente  $I$  constante.

### 3.1 CAMPO MAGNÉTICO NUM SOLENÓIDE

Um solenóide é constituído por um fio condutor enrolado ao modo de uma hélice[1]. Essa configuração possibilita um campo magnético razoavelmente uniforme no interior do solenóide, caso as espiras ensejam suficientemente juntas.

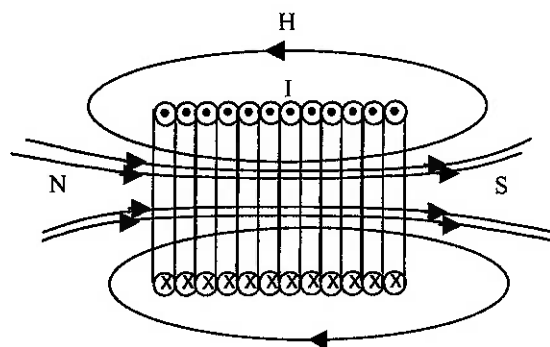


Figura 10 : Campo magnético num solenóide percorrido por corrente elétrica – solenóide em corte

A Figura 10 representa o campo magnético para um solenóide constituído de espiras muito próximas. A análise da distribuição do campo no exterior do solenóide evidencia a semelhança entre esse e o de uma barra imantada. Então, uma ponta do solenóide se comporta como o pólo norte de um imã e a outra como o pólo sul[1].

Nota-se que o fluxo magnético ao redor do solenóide espalha-se por uma região, ou seja, não há uma concentração do mesmo em determinados locais. Muitas vezes é desejável que o campo magnético esteja concentrado numa determinada região de interesse. Para tanto, utiliza-se um material ferromagnético para orientar o fluxo magnético para essa região.

A Figura 11 apresenta uma bobina percorrida por corrente elétrica com fluxo orientado por um material ferromagnético.

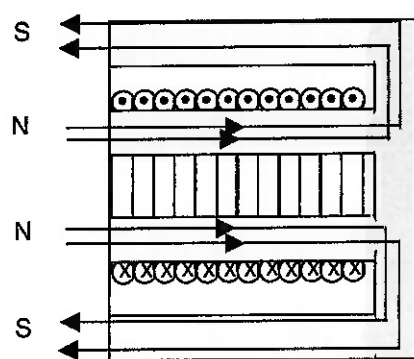


Figura 11: Fluxo magnético orientado por material ferromagnético – Desenho em corte

O fenômeno apresentado na Figura 11 pode ser explicado através da expressão do fluxo magnético [2]:

$$\Phi = \frac{ni}{\mathfrak{R}} \quad (3)$$

Sendo que:

$n$ : número de voltas na bobina

$i$ : corrente que passa pela bobina

$\mathfrak{R}$ : Relutância magnética do meio condutor

$\Phi$ : Fluxo magnético

Mas,

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (4)$$

Sendo que:

$l$ : comprimento do meio condutor

$\mu$ : permeabilidade magnética do meio condutor

$A$ : Área do meio condutor

A relutância pode ser entendida como uma resistência ao fluxo magnético, então quanto menor aquela maior será esse. A permeabilidade de um material ferromagnético é aproximadamente 5000 vezes maior que a do ar [2], então esse

material oferece uma relutância menor, logo o fluxo será maior por ele. Assim, o fluxo magnético passa preferivelmente pelo material ferromagnético, por isso ocorre o processo de orientação do fluxo.

## 4 FECHAMENTO DO CIRCUITO MAGNÉTICO

Conforme discutido anteriormente, ao fechar o campo magnético há um maior aproveitamento do fluxo magnético. Então, é realizado nesse tópico uma proposta de fechamento do campo magnético. Após isso, constrói-se os protótipos para avaliar experimentalmente a diferença de rigidez entre o protótipo com campo aberto e o com campo fechado.

### 4.1 MANCAL COM CIRCUITO MAGNÉTICO ABERTO

A Figura 12 representa os ímãs do lado esquerdo do conjunto, juntamente com o eletroímã.

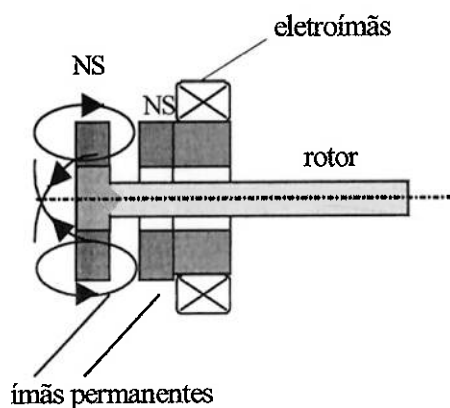


Figura 12: Conjunto esquerdo do mancal prévio

Analisando a Figura 12 verifica-se que os fluxos magnéticos dos ímãs permanentes e do eletroímã estão espalhados ao acaso, não há nenhum meio ferromagnético para orientar o fluxo[3]. Dessa forma, parte do fluxo não está contribuindo para o equilíbrio do mancal. Para aumentar o aproveitamento do fluxo magnético no equilíbrio do mancal é feita a análise descrita no próximo tópico.



## 4.2 MANCAL COM CIRCUITO MAGNÉTICO FECHADO

A proposta para fechar o circuito magnético de forma que o fluxo seja orientado em direção à região de interesse está apresentada na Figura 13.

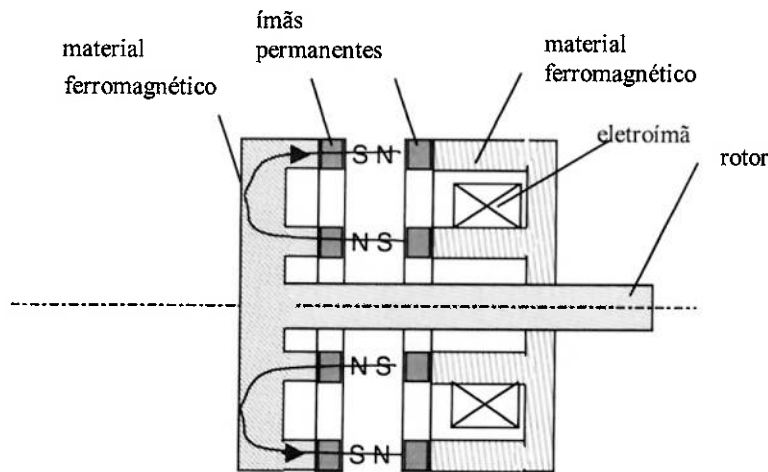


Figura 13: Mancal com circuito magnético fechado

Analisando a Figura 13, nota-se a presença de materiais ferromagnéticos para orientar o fluxo dos ímãs permanentes e do eletroímã, dessa forma o fluxo magnético é utilizado de forma mais eficiente no equilíbrio do mancal. Nota-se que com esse arranjo, tem-se o dobro de pólos magnéticos da construção anterior, vide Figura 12. Qualitativamente, pode-se afirmar que a rigidez será aproximadamente o dobro. Isso será constatado através de experimentos realizados com o mancal.

### 4.3 RIGIDEZ AXIAL E RADIAL

A fim de esclarecer um pouco o conceito de rigidez, aborda-se um caso particular de posição do mancal analisado a seguir.

Ao deslocar o mancal da posição de equilíbrio conforme mostra a Figura 14, surge uma força para restaurar a posição original. Essa força pode ser dividida em duas componentes: força axial ( $f_a$ ) e força radial ( $f_r$ ).

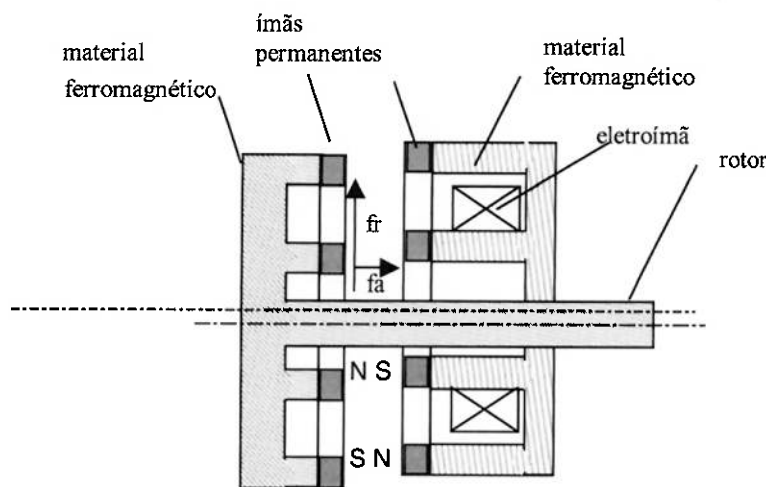


Figura 14: Mancal fora da posição de equilíbrio

A força axial é dependente da rigidez axial  $k_a$  e a força radial é dependente da rigidez radial  $k_r$  [12]. O objetivo é aumentar a rigidez radial que, por conseguinte, aumentará também a axial, pois conforme [5]  $k_a$  é proporcional a  $k_r$ . Dessa forma, aumenta-se a força de restauração. Para tanto, constrói-se um protótipo do mancal a fim de levantar o valor dessas constantes de rigidez.

#### 4.4 PROTÓTIPOS PARA LEVANTAMENTO DA RIGIDEZ

Para comparar a rigidez radial do conjunto com campo magnético aberto com a do campo magnético fechado, construiu-se os protótipos apresentados nas figuras a seguir.

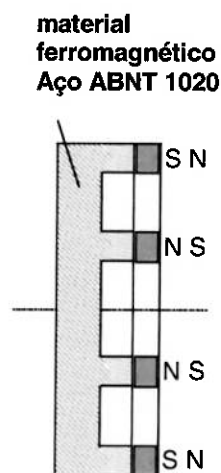


Figura 15: Protótipo do lado direito do mancal com campo magnético fechado por material ferromagnético.

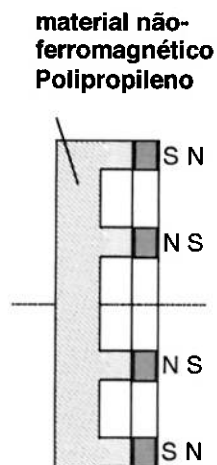


Figura 16: Protótipo do lado direito do mancal com campo magnético fechado por material não-ferromagnético

somente ímã

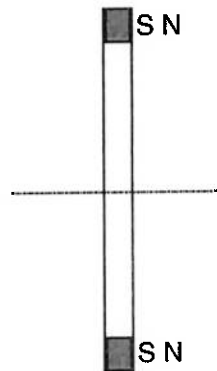


Figura 17: Protótipo do lado direito do mancal com campo magnético aberto

Sabe-se que a rigidez radial e a rigidez axial estão interligadas [5], ou seja, ao aumentar uma a outra também aumenta. Então, foi construído um dispositivo para medir a força de atração entre um par de cada protótipo exibido nas Figuras 15, 16 e 17. O dispositivo consiste em uma viga flexível, na qual um ímã do par é colado, e de um parafuso micrométrico onde o outro par é colado. Devido à força de atração entre os ímãs a viga tende a flexionar, para medir esse deslocamento é instalado um sensor indutivo. O dispositivo é apresentado na Figura 18.

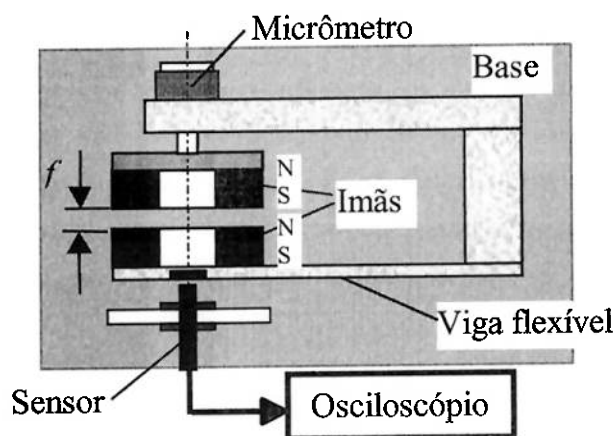


Figura 18: Dispositivo para medir a força de atração entre um par de protótipo

Na verdade, a rigidez é comparada indiretamente, ou seja, sabe-se que a força axial é proporcional à folga  $f$  entre os ímãs e à rigidez. Além disso, sabe-se que o deslocamento na viga é proporcional a essa força. Esse deslocamento será medido em termos de voltagem na saída do sensor. Dessa forma, serão comparados os valores de tensão obtidos para determinadas folgas. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos no experimento.

Folga entre os ímãs (mm)	SAÍDA DO SENSOR PARA CADA PROTÓTIPO		
	Campo fechado com Aço ABNT 1020 (V)	Campo fechado com Polipropileno (V)	Campo aberto (V)
1,0	1,05	0,78	0,62
1,5	0,92	0,70	0,56
2,0	0,87	0,63	0,53
2,5	0,82	0,60	0,50
3,0	0,77	0,53	0,45
3,5	0,72	0,50	0,42
4,0	0,68	0,48	0,40

Tabela 1: Valores de Tensão obtido na saída do sensor

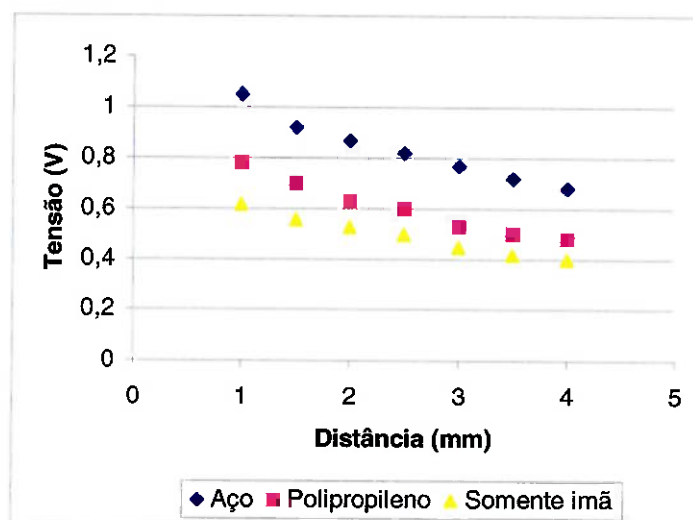


Figura 19: Levantamento da curva de deslocamento da viga versus a distância entre os ímãs

Observando os valores da Tabela 1 e o gráfico da Figura 19, nota-se que para uma mesma folga entre os ímãs, o deslocamento da viga é maior para o protótipo que possui campo magnético fechado, sendo o maior deles para o que possui o campo fechado por material ferromagnético. Qualitativamente, percebe-se que o deslocamento quase dobra em relação ao protótipo com campo magnético aberto. Dessa forma, constata-se que a rigidez axial e, por conseguinte a rigidez radial, aumentou ao fechar o campo magnético, como era esperado anteriormente. Ainda da Figura 19, percebe-se que a força de atração pode ser considerada linear com a variação de distância.

## 5 PROJETO DO MANCAL

O projeto do novo mancal foi dirigido pela dimensão dos ímãs encontrados no mercado. Assim, o projeto das peças do mancal ficou delimitado pelo tamanho dos ímãs. O comprimento do rotor foi projetado de forma a obedecer a Equação 1, apresentada no tópico 1.3. O eletroímã foi projetado de forma que a força eletromagnética fosse suficiente para estabilizar o mancal, conforme será explicado a seguir.

Ao projetar o mancal, procurou-se conceber peças fáceis de construir, pois as mesmas seriam usinadas nas máquinas disponíveis na oficina do Departamento de Mecatrônica, as quais não possuem muitos recursos.

Os desenhos técnicos de fabricação estão no Anexo.

### 5.1 USINAGEM

A usinagem das peças do mancal foi realizada pelo próprio aluno nas máquinas disponíveis no laboratório.

### 5.2 ÍMÃS PERMANENTES

O projeto dos ímãs permanentes (ponta do rotor) foi decorrente do estudo apresentado no tópico 4, sendo escolhido o protótipo com campo magnético fechado por apresentar maior rigidez magnética.

Para levantar a rigidez magnética  $k_m$ , construiu-se uma viga de alumínio com uma ponta do rotor parafusada em uma de suas extremidades. Então, antes de levantar a rigidez magnética, deve-se encontrar a rigidez da viga.

A fim de encontrar a rigidez da viga ( $k$ ), engastou-se a mesma na morsa da fresadora e mediu-se a rigidez da viga através da flexão da mesma provocada por pesos de valor conhecido. A flexão foi medida por um relógio comparador. A Figura 20 representa montagem descrita.

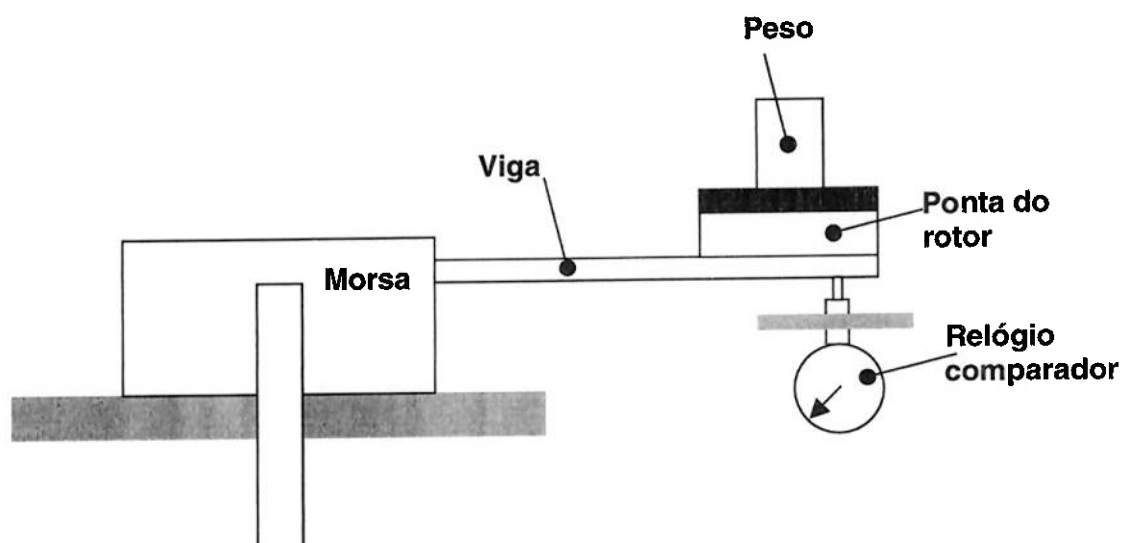


Figura 20: Configuração para medir a rigidez da viga

A Tabela 2 representa a deflexão da viga *versus* força.

Peso (N)	Flexão (mm)
4,554	0,36
9,408	0,70
13,962	1,06
17,490	1,31

Tabela 2: Peso versus flexão da viga

Através dos dados da Tabela 2 construiu-se o gráfico apresentado na Figura 21. Foi traçada uma linha de tendência linear que se ajustou muito bem aos pontos ( $R^2=0,9994$ ), cujo coeficiente angular é a rigidez da viga, pois  $F=kx$ .

Na qual:

F: peso (N)

k: rigidez da viga (N/mm)

x: flexão da viga (mm)

. Portanto, a viga engastada tem rigidez  $k=13,5 \text{ N/mm}$ .



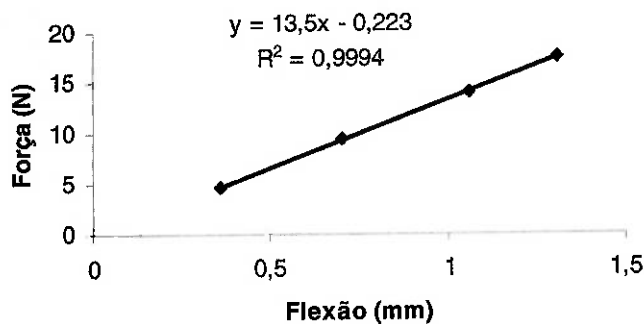


Figura 21: Curva de rigidez da viga

A rigidez magnética foi levantada através do seguinte experimento:

- com a viga na mesma configuração da Figura 20, prendeu-se a outra ponta do rotor no eixo árvore da fresadora. Utiliza-se a fresadora aqui para aproveitar o deslocamento vertical facilmente medido através de um anel micrométrico próprio da máquina.
- através da configuração apresentada na Figura 22 mediu-se a flexão da viga variando o entreferro  $f$  entre os ímãs.

A Tabela 3 apresenta os valores da flexão da viga *versus* a folga  $f$  entre os ímãs. Utilizando a rigidez  $k$  da viga, obtém-se a força correspondente à flexão.

Folga $f$ (mm)	Flexão (mm)	Força (N) $k \times flexão$
1,0	2,50	33,75
1,5	2,15	29,03
2,0	1,86	25,11
2,5	1,64	22,14
3,0	1,46	19,71
3,5	1,31	17,69
4,0	1,19	16,07

Tabela 3: Flexão da viga *versus* folga entre os ímãs

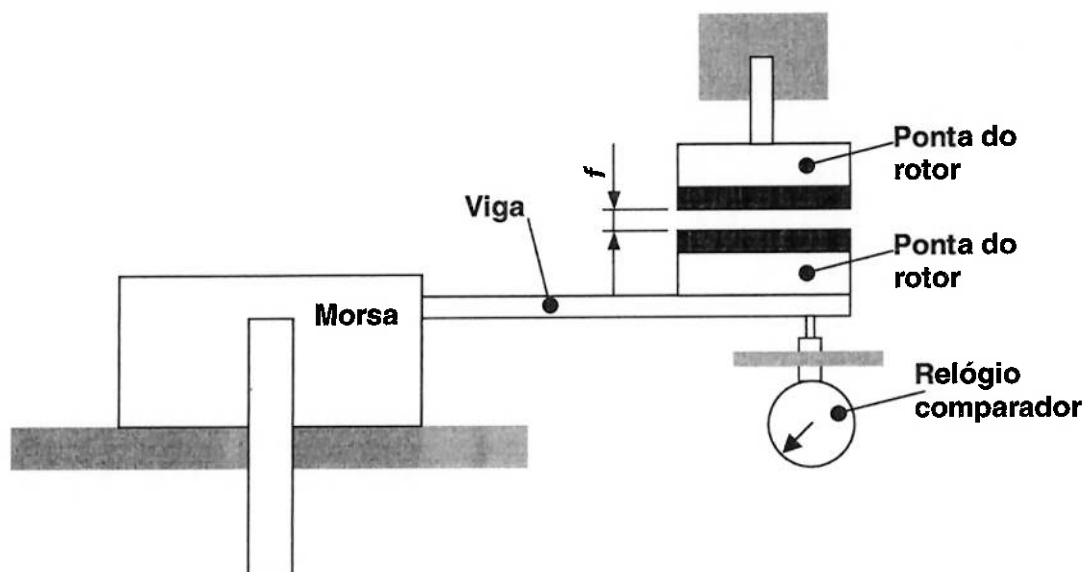


Figura 22: Configuração para levantar a rigidez magnética  $k_{mag}$

Através dos valores da Tabela 3 construiu-se o gráfico Força *versus* Folga apresentado na Figura 23. Adicionou-se uma linha de tendência linear com um ajuste muito bom ( $R^2=0,9661$ ). A rigidez magnética é o coeficiente angular da reta, pois  $F = k_{mag}f$ . Na qual:

F: força (N)

$k_{mag}$ : rigidez magnética (N/mm)

f: folga entre os ímãs (mm)

Portanto, a rigidez magnética é  $k_{mag}=5,79 \text{ N/mm}$ .

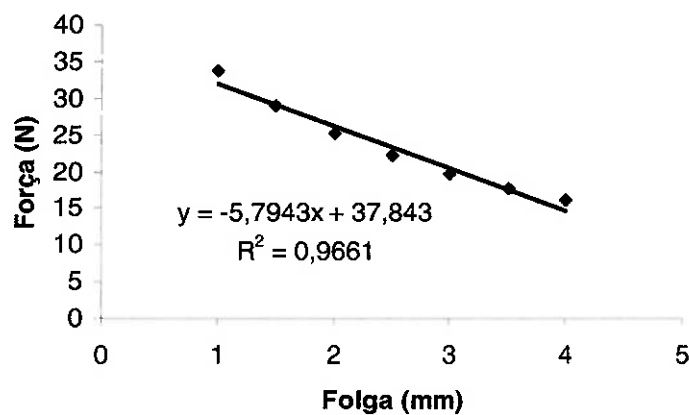


Figura 23: Curva da folga *versus* força para o ímã permanente

Entretanto, para a configuração do mancal temos dois pares de ímãs permanentes, logo a rigidez magnética do conjunto será diferente de  $k_{mag}$ . Para encontrar a rigidez magnética do mancal, considera-se a configuração exposta na Figura 24. Quando  $\Delta x = 0$  o mancal possui um entreferro de 0,8mm de cada lado.

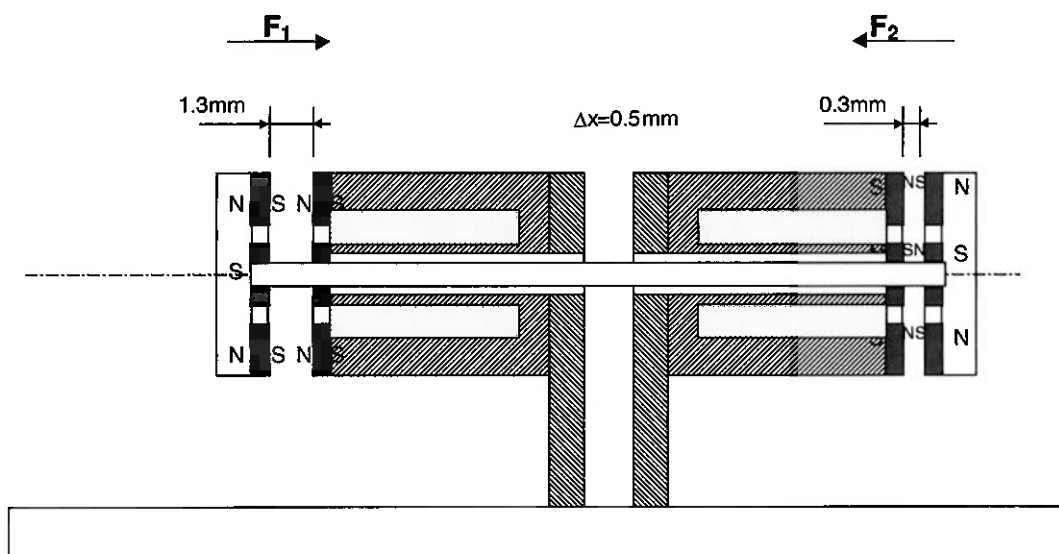


Figura 24: Configuração com rotor deslocado de  $\Delta x = 0.5\text{mm}$  para a esquerda

Para a configuração da Figura 24 tem-se:

- força magnética do lado esquerdo do mancal:

$$F_1 = -5,7943x + 37,843 \rightarrow F_1 = -5,7943 \cdot 1,3 + 37,843 \rightarrow F_1 = 30,3 \text{ N} \quad (5)$$

- força magnética do lado direito do mancal:

$$F_2 = -5,7943 \cdot 0,3 + 37,843 \rightarrow F_2 = 36,1 \text{ N} \quad (6)$$

Dessa forma, a força resultante magnética é:

$$F = F_2 - F_1 = 5,8 \text{ N} \quad (7)$$

Como a força magnética é assumida linear, tem-se:

$$F = k_m \Delta x \rightarrow k_m = F / \Delta x \rightarrow k_m = 5,8 / 0,5 = 11,6 \text{ N/mm} \quad (8)$$

### 5.3 ELETROÍMÃ

O eletroímã projetado para o mancal está representado na Figura 25. A força eletromagnética  $f_{em}$  deve ser maior que a força resultante dos ímãs permanentes na posição de máximo deslocamento axial considerado para esse projeto ( $\Delta x = 0,5 \text{ mm}$ ) conforme apresentado na Equação 7  $F = 5,8 \text{ N}$ . Assim, deve-se ter  $f_{em} > 5,8 \text{ N}$  para ser possível estabilizar o mancal com esse deslocamento axial considerado. O projeto da bobina do eletroímã foi empírico, sendo que suas dimensões foram delimitadas pelo tamanho dos ímãs.

A seguir, levanta-se a curva força *versus* corrente no eletroímã para encontrar a rigidez eletromagnética. Uma vez encontrada a rigidez, calcula-se a força eletromagnética para verificar se satisfaz o requisito anteriormente comentado.

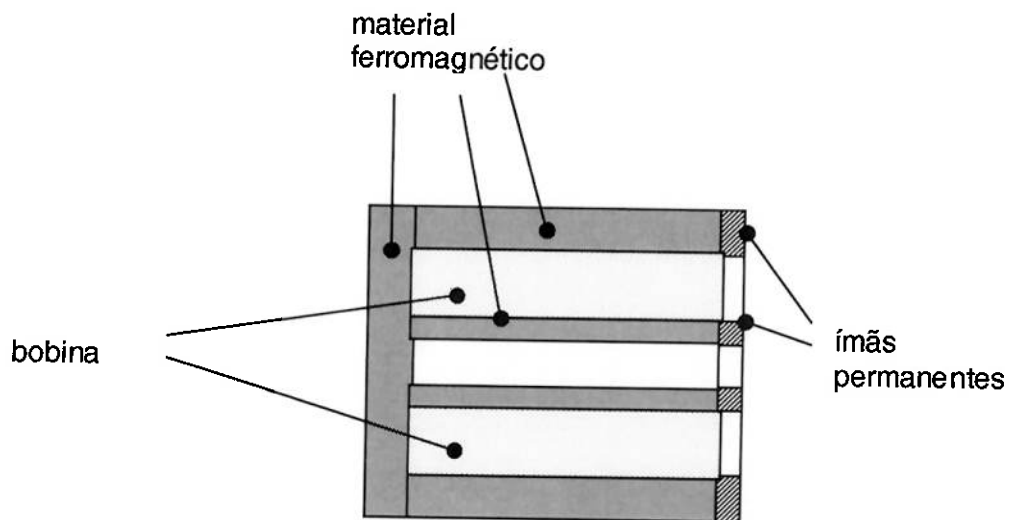


Figura 25: Eletroímã projetado

Para levantar a rigidez eletromagnética desse eletroímã, realizou-se o seguinte experimento:

- fixou-se o eletroímã conforme apresentado na Figura 26 e alimentou-se o mesmo com uma fonte de corrente contínua;

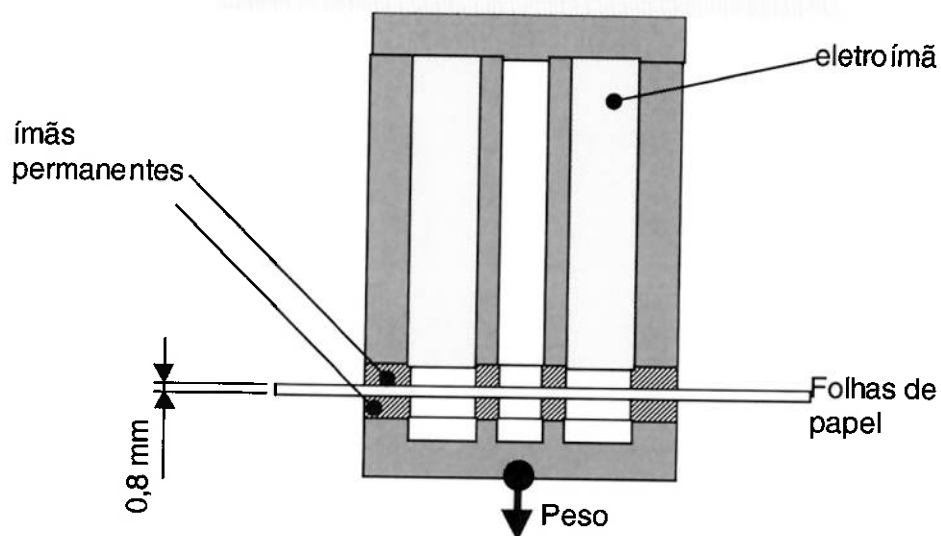
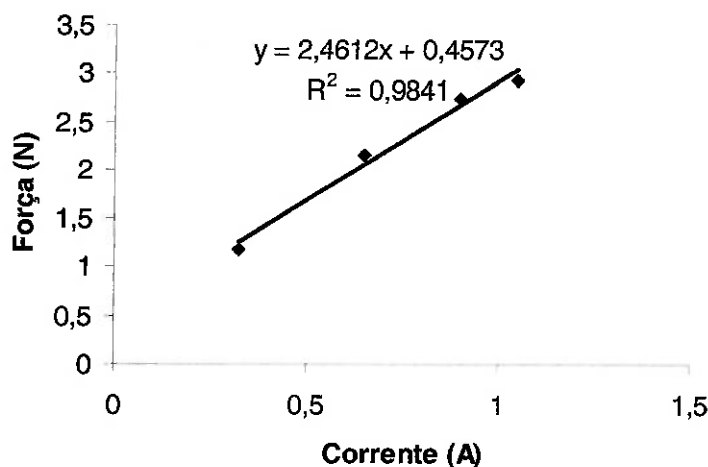


Figura 26: Configuração para levantar a curva força *versus* corrente do eletroímã

- a constante eletromagnética é levantada para o ponto de operação do mancal, ou seja, entreferro de 0,8mm.
- aplica-se corrente na bobina para manter um peso de valor conhecido suspenso, em seguida a corrente é diminuída até que o peso caia, nesse instante lê-se o valor de corrente;
- constrói-se o gráfico da Figura 27, no qual o coeficiente angular da reta é a rigidez eletromagnética do eletroímã.

Corrente (A)	Peso (N)
0,32	0,12
0,65	0,22
0,90	0,28
1,05	0,30

Tabela 4: Peso *versus* corrente para o eletroímãFigura 27: Gráfico da força *versus* corrente para o eletroímã

Da Figura 27 pode-se concluir que a rigidez eletromagnética é  $k_{em}=2,46 \text{ N/A}$ . Nota-se que para corrente nula, há ainda um peso suspenso de 0,45 N, o que na realidade mostra que parte do peso considerado já estava suspenso pela ação dos ímãs permanentes. Isso não altera os resultados obtidos, pois o que interessa é o

valor do coeficiente angular da reta, o qual não é alterado ao diminuir igualmente o valor dos pesos.

O procedimento realizado para encontrar a rigidez do eletroímã é de certa forma impreciso, porém era o disponível no laboratório. A imprecisão decorre que ao diminuir a corrente há ainda um campo remanente. Portanto, ao se fazer a leitura da corrente na caída do peso, a mesma pode não corresponder à realidade. Conseqüentemente, a rigidez eletromagnética pode não ser a real. Entretanto, o valor correto dessa rigidez será encontrado quando se aplicar o controle ao sistema. Pois, ao comparar a resposta a uma entrada em degrau do sistema real com a obtida por simulação, pode-se ajustar o valor dessa constante no programa de simulação até que as respostas sejam semelhantes.

Para a modelagem da bobina que é realizada no próximo tópico, é necessário conhecer a resistência ôhmica da bobina bem como sua indutância. Para tal, utilizou-se um multímetro para obtenção dessas grandezas. Como na configuração do mancal as bobinas estão em série (abordado no próximo tópico), mediu-se o valor de  $R$  e  $L$  das bobinas nessa situação, obtendo-se:

$$\begin{aligned} R &= 19\Omega \\ L &= 217,6mH \end{aligned} \quad (9)$$

A Tabela 5 apresenta todos os dados do mancal magnético.

Descrição	Símbolo	Valor
constante magnética dos ímãs permanentes	$k_m$	11600 N/m
constante eletromagnética do eletroímã	$k_{em}$	2,45 N/A
constante de amplificação do sensor indutivo	$k_s$	5000 V/m
constante de amplificação do amplificador de potência	$k_a$	10
Massa do rotor	$M$	0,84 kg
Resistência elétrica da bobina	$R$	19 $\Omega$
Indutância elétrica da bobina	$L$	0,2176 H

Tabela 5: Dados do mancal magnético

## 6 MODELAGEM DO MANCAL

Nesse tópico é apresentado o novo mancal proposto, bem como a modelagem matemática dos elementos que o compõem. Essa modelagem tem como objetivo obter a Função de Transferência[8] do sistema, a fim de ser possível projetar um controlador para a malha de controle da posição axial.

### 6.1 FUNCIONAMENTO DO MANCAL

O novo mancal está apresentado na Figura 28. O mancal tem basicamente a seguinte configuração:

- um conjunto de ímãs permanentes é fixado em cada extremidade do rotor;
- na face de cada eletroímã há um outro conjunto de ímãs permanentes;
- os conjuntos de ímãs estão dispostos na forma de atração;
- um sensor indutivo de proximidade mede o deslocamento axial do rotor;
- os eletroímãs são os atuadores do movimento na direção axial.

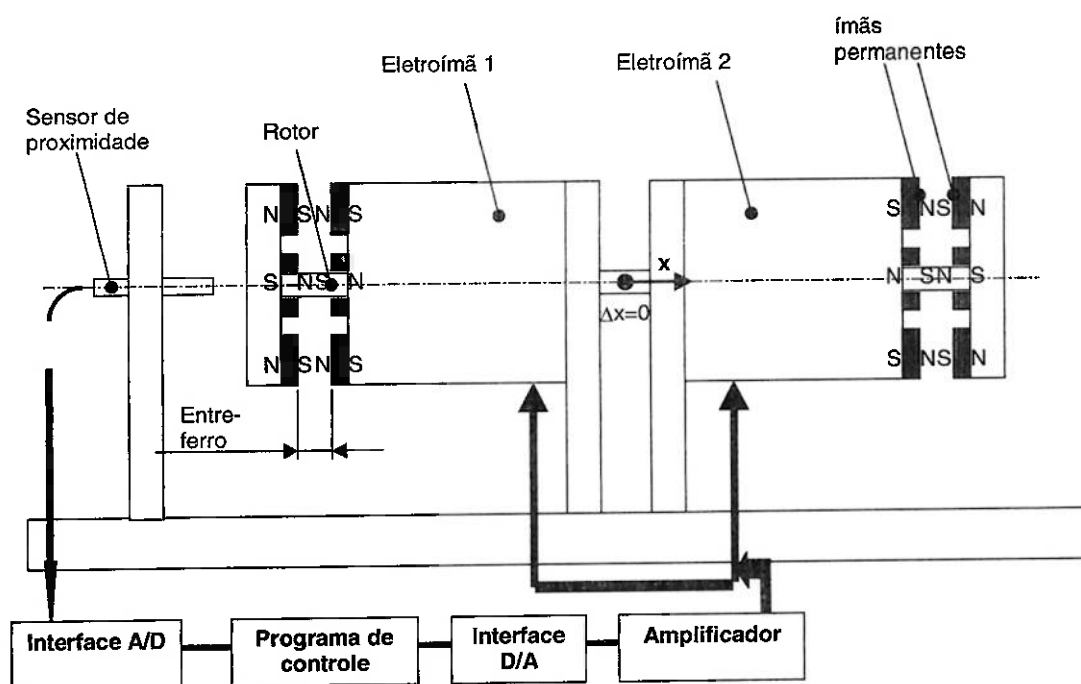


Figura 28: Configuração do novo mancal magnético



O funcionamento do sistema está descrito a seguir:

- a suspensão e a estabilidade angular e radial é devida somente as forças de atração magnéticas radiais entre os pares de ímãs;
- na direção axial o sistema é instável, então um sistema de controle é necessário para controlar a posição axial.

Obs.: A instabilidade na direção axial é provada na Equação 14.

- o controle na direção axial funciona da seguinte forma: o sensor de posição fornece uma tensão contínua proporcional ao deslocamento axial do rotor; essa tensão é comparada com uma tensão de referência que gera um sinal de erro, o qual após ser tratado pelo controlador é aplicado no amplificador, que fornecerá a tensão a ser aplicada nas bobinas.

Na posição desenhada na Figura 28, os entreferros são iguais e não há deslocamento na posição axial ( $\Delta x=0$ ), pois as forças magnéticas axiais se equilibram e, por conseguinte a voltagem aplicada nas bobinas é nula. Ao se provocar um deslocamento axial para a esquerda, surge uma voltagem nas bobinas vide Figura 29.

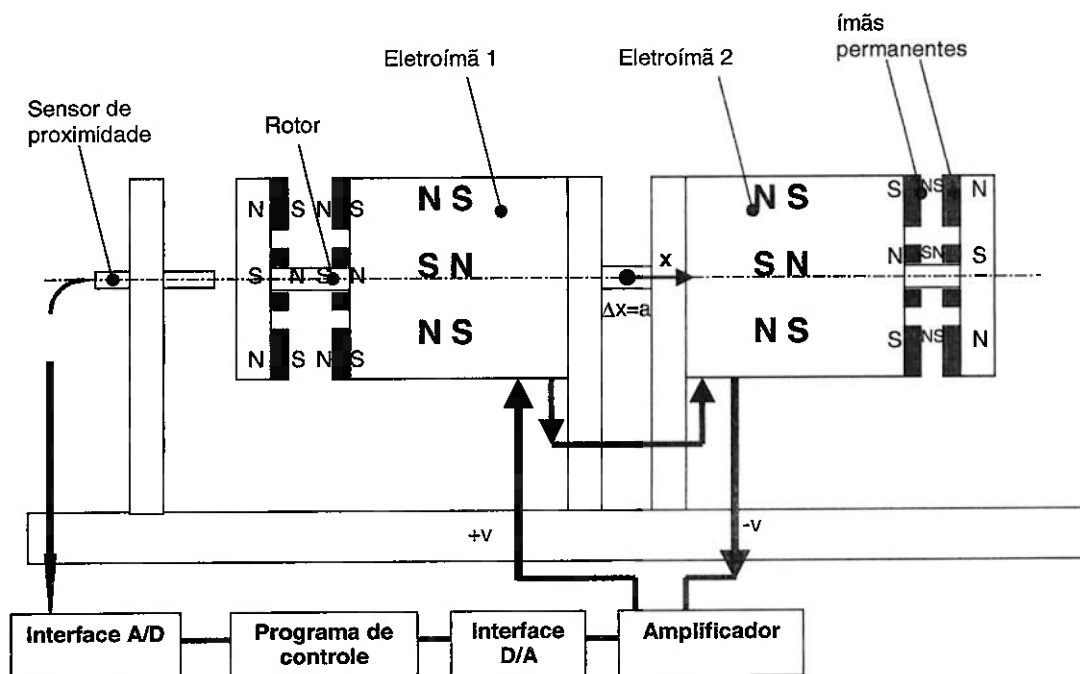


Figura 29: Rotor deslocado axialmente para a esquerda

A tensão que surge nas bobinas devido ao deslocamento  $\Delta x = a$  resulta numa força magnética que tende a retornar o rotor à sua posição original de equilíbrio ( $\Delta x = 0$ ). Para tanto, os eletroímãs devem estar configurados em série, pois assim cada eletroímã tem pólos diferentes na face. Portanto, surge uma força de atração axial no lado esquerdo do mancal, enquanto no direito surge uma força de repulsão, o que tende a retornar o rotor à sua posição de equilíbrio. Nota-se que a força eletromagnética deve vencer a força magnética resultante dos ímãs permanentes para retornar o mancal à posição de equilíbrio.

## 6.2 MODELO DINÂMICO

### 6.2.1 MODELAGEM DO MANCAL

Para determinar o modelo matemático do mancal magnético, admite-se que as forças eletromagnética e magnética podem ser consideradas lineares para pequenos deslocamentos em torno da posição de equilíbrio. Dessa forma, tem-se:

$$f_m(t) = k_m \cdot x(t) \quad (10)$$

$$f_{em}(t) = k_{em} \cdot i(t) \quad (11)$$

Sendo:

$f_m$ : força magnética nos ímãs permanentes

$k_m$ : constante magnética

$x$ : posição axial do rotor

$f_{em}$ : força eletromagnética nas bobinas

$k_{em}$ : constante eletromagnética

$i$ : corrente nas bobinas

Utilizando as Equações 10 e 11, e a Segunda Lei de Newton, obtém-se a equação diferencial para o movimento do mancal na direção  $x$ . Vide Figura 30.

$$M \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + k_m x(t) = 2k_{em} i(t) \quad (12)$$

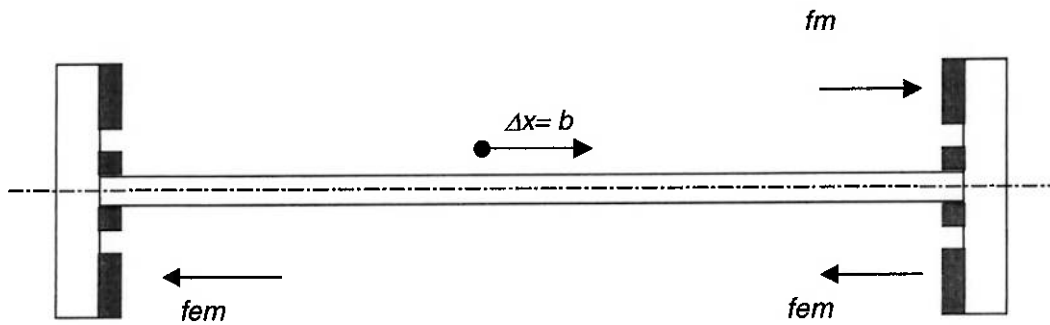


Figura 30: Rotor deslocado de  $b$  para a direita – Configuração para obter a Equação 12

Aplicando a Transformada de Laplace na Equação 12 e admitindo as condições iniciais:  $x(0)=0$ ,  $dx(0)/dt=0$ ,  $dx^2(0)/dt^2=0$  e  $i(0)=0$ , obtém-se a Função de Transferência  $G(s)$  que relaciona a saída  $X(s)$  com a entrada  $I(s)$ :

$$G(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{2 \frac{k_{em}}{M}}{s^2 + \frac{k_m}{M}} \quad (13)$$

Sendo:

$M$  : massa do rotor

A Função de Transferência possui dois pólos no eixo imaginário:

$$s = \pm j \sqrt{\frac{k_m}{M}} \quad (14)$$

Esses pólos caracterizam um sistema instável. Portanto, é necessário um controle ativo para estabilizar o sistema.

### 6.2.2 MODELAGEM DA BOBINA

Para uma bobina com indutância  $L$  e resistência ôhmica  $R$  submetida a uma tensão elétrica  $v(t)$  (Figura 31), obtém-se a Equação 15 ao se aplicar a Lei das Malhas.

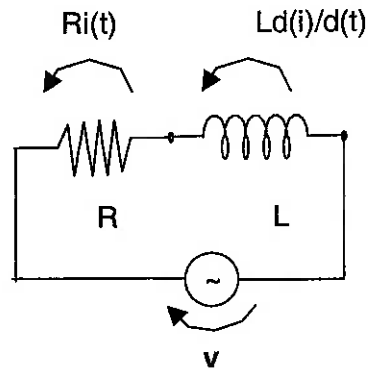


Figura 31: Representação elétrica de um circuito RL

$$L \frac{di}{dt} + Ri(t) = v(t) \quad (15)$$

Aplicando-se a Transformada de Laplace para condições iniciais:  $i(0)=0$ ,  $di(0)/dt=0$  e  $v(0)=0$ , tem-se:

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{\frac{1}{L}}{s + \frac{R}{L}} \quad (16)$$

Assim, a frequência natural da bobina é dada por  $R/L$ , quanto maior essa frequência, mais rápida é a resposta dinâmica da bobina.

### 6.3 O CONTROLADOR

O sistema tem dois pólos complexos conjugados no eixo imaginário, logo o sistema é instável. Assim, há a necessidade de se projetar um controlador que estabilize o sistema. Há diversos controladores que poderiam ser adicionados ao

sistema, porém escolhe-se o *PID* (proporcional-integral-derivativo), porque foi utilizado no controle do mancal inicial.

A Figura 32 representa o sistema a ser controlado juntamente com o controlador *PID*. O objetivo é encontrar a Função de Transferência do sistema em malha fechada, a fim de verificar quais elementos do controlador *PID* serão necessários para estabilizar o sistema.

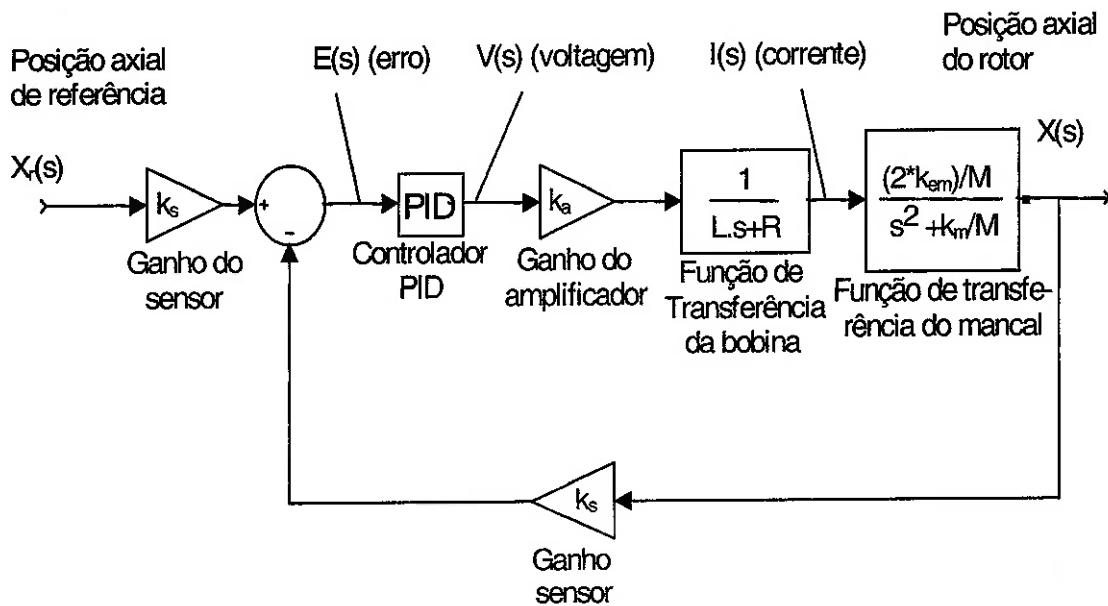


Figura 32: Representação em diagrama de blocos do sistema com controlador *PID*

### 6.3.1 CONTROLADOR *PID*

O controlador *PID* possui a Função de Transferência entre a saída  $V(s)$  e entrada  $E(s)$  dada pela Equação 17.

$$G_c(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = K \left( 1 + T_d \cdot s + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad (17)$$

Sendo:

$G_c(s)$ : Ganho do controlador *PID*

$K$ : Valor do termo proporcional

$T_d$ : Tempo de derivação

$T_i$ : Tempo de integração

### 6.3.2 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A Função de Transferência em malha fechada  $G(s)$  que relaciona a saída  $X(s)$  com a entrada  $X_r(s)$  é dada pela Equação 18.

$$G(s) = \frac{k_s \cdot G_c(s) \cdot \frac{k_a}{L \cdot s + R} \cdot \frac{\frac{2 \cdot k_{em}}{M}}{s^2 + \frac{k_m}{M}}}{1 + k_s \cdot G_c(s) \cdot \frac{k_a}{L \cdot s + R} \cdot \frac{\frac{2 \cdot k_{em}}{M}}{s^2 + \frac{k_m}{M}}} \quad (18)$$

### 6.3.3 ANÁLISE MATEMÁTICA DO CONTROLADOR

O controlador pode ser do tipo *PI* (proporcional-integral), *PD* (proporcional-derivativo), *P* (proporcional) ou *PID*. O controlador que estabilizar o sistema e resultar em erro nulo em regime, satisfaz os requisitos do sistema.

Os pólos do sistema são os zeros do denominador da Função de Transferência. Para o sistema ser estável os pólos devem estar localizados no semiplano esquerdo do plano  $s$ [8].

#### Proporcional (P)

Para um controlador do tipo proporcional  $G_c(s)$  é dado por:

$$G_c(s) = K \quad (19)$$

Os pólos do sistema com controlador *P* são dados pela Equação 20.

$$MLs^3 + RM_s^2 + k_m Ls + Rk_m + 2k_s k_a k_{em} K = 0 \quad (20)$$

Substituindo os valores listados na Tabela 5:

$$0,18278s^3 + 15,96s^2 + 2524,16s + 220400 + 246000K = 0 \quad (21)$$

Utilizando o *Cr terio de Estabilidade de Routh*[8] para analisar a estabilidade relativa do sistema, constrói-se a Tabela 6.

$s^3$	0,18278	2524,16
$s^2$	15,96	220400+246000K
$s^1$	$\frac{-1105,5264 - 46198,8K}{0,18278}$	
$s^0$	220400+246000K	

Tabela 6: Tabela de *Routh* para o sistema com controlador P

Segundo o *Cr terio de Estabilidade de Routh*, o sistema será estável se não houver troca de sinal na primeira coluna da tabela. Então, deve-se ter:

$$-1105,5264 - 46198,8K > 0 \quad \text{e} \quad 220400 + 246000K > 0 \quad (22)$$

Logo,  $-0,896 < K < -0,024$ . Com esses valores o sistema   estável.

Para verificar se o sistema possui erro em regime   entrada em degrau unitário, utiliza-se o Teorema do Valor Final[8] dado pela Equação 23.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s.E(s) \quad (23)$$

O erro  $E(s)$    dada pela Equação 24.

$$E(s) = \frac{k_s}{1 + k_s \cdot G_c(s) \cdot \frac{k_a}{L \cdot s + R} \cdot \frac{\frac{2 \cdot k_{em}}{M}}{s^2 + \frac{k_m}{M}}} \quad (24)$$

Para obter erro nulo em regime deve-se satisfazer a Equação 25.

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) = 0 \quad (25)$$

O erro  $E(s)$  é dado por:

$$E(s) = \frac{k_s}{1 + k_s \cdot K \cdot \frac{k_a}{L \cdot s + R} \cdot \frac{\frac{2 \cdot k_{em}}{M}}{s^2 + \frac{k_m}{M}}} \quad (26)$$

Aplicando uma entrada em degrau unitário no sistema, o erro em regime será dado por:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s} E(s) = \frac{k_s}{1 + k_s \cdot K \cdot \frac{k_a}{L \cdot s + R} \cdot \frac{\frac{2 \cdot k_{em}}{M}}{s^2 + \frac{k_m}{M}}} \quad (27)$$

Nota-se que o erro em regime será nulo somente quando  $K \rightarrow \infty$ , que não é possível de ser realizado na prática e não satisfaz os valores de  $K$  que estabilizam o sistema. Logo, um controlador proporcional não satisfaz os critérios de estabilidade do sistema.



Proporcional-Derivativo (PD)

Um controlador do tipo proporcional-derivativo tem a seguinte Função de Transferência:

$$G_c(s) = K(1 + T_d \cdot s) \quad (28)$$

Os pólos do sistema com controlador *PD* são dados pela Equação 29.

$$0,18278s^3 + 15,96s^2 + (2524,16 + 246000KT_d)s + 220400 + 246000K = 0 \quad (29)$$

Utilizando o *Critério de Estabilidade de Routh*, tem-se:

$s^3$	0,18278	$2524,16 + 246000KT_d$
$s^2$	15,96	$220400 + 246000K$
$s^1$	$\frac{-1105,5264 - 46198,8K + 3926160KT_d}{0,18278}$	
$s^0$	$220400 + 246000K$	

Tabela 7: Tabela de *Routh* para sistema com controlador PD

Segundo o *Critério de Estabilidade de Routh*, o sistema será estável se não houver troca de sinal na primeira coluna da tabela. Então, deve-se ter:

$$-1105,5264 - 46198,8K + 3926160KT_d > 0 \quad \text{e} \quad 220400 + 246000K > 0 \quad (30)$$

Assim, para o sistema ser estável deve-se ter:

$$K > -0,896$$

$$T_d > \frac{1105,5264 + 46198,8K}{3926160K} \quad (31)$$

Para verificar se o sistema possui erro em regime à entrada em degrau unitário, utiliza-se o Teorema do Valor Final.

O erro  $E(s)$  é dado por:

$$E(s) = \frac{k_s}{1 + k_s \cdot K \cdot (1 + T_d \cdot s) \cdot \frac{k_a}{L \cdot s + R} \cdot \frac{\frac{2 \cdot k_{em}}{M}}{s^2 + \frac{k_m}{M}}} \quad (32)$$

Aplicando uma entrada em degrau unitário no sistema, o erro em regime será dado por:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s} E(s) = \frac{k_s}{1 + k_s \cdot K \cdot (1 + T_d \cdot s) \cdot \frac{k_a}{L \cdot s + R} \cdot \frac{\frac{2 \cdot k_{em}}{M}}{s^2 + \frac{k_m}{M}}} \quad (33)$$

Da mesma forma que para o controlador  $P$ , o erro em regime será nulo somente quando  $K \rightarrow \infty$ , que não é possível de ser realizado na prática. Logo, um controlador proporcional-derivativo não satisfaz os critérios de estabilidade do sistema.

### Proporcional-Integral (PI)

Para um controlador do tipo proporcional-integral tem-se a seguinte Função de Transferência:

$$G_c(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad (34)$$

Os pólos do sistema com controlador  $PI$  são dados pela Equação 35.

$$0,18278T_i s^4 + 15,96T_i s^3 + 2524,16T_i s^2 + (220400T_i + 246000KT_i)s + 1 = 0 \quad (35)$$

Utilizando o *Critério de Estabilidade de Routh*, tem-se:

S <sub>4</sub>	0,18278	2524,16T <sub>i</sub>	1
S <sub>3</sub>	15,96T <sub>i</sub>	220400T <sub>i</sub> +246000KT <sub>i</sub>	
S <sub>2</sub>	(0,888 – 44963,28K)T <sub>i</sub>	1	
S <sub>1</sub>	$\frac{195715,2T_i - 9909688464KT_i - 11060966880K^2T_i}{0,888 - 44963K}$		
S <sub>0</sub>	1		

Tabela 8: Tabela de *Routh* para o sistema com controlador PI

Segundo o *Critério de Estabilidade de Routh*, o sistema será estável se não houver troca de sinal na primeira coluna da tabela. Então, deve-se ter:

$$T_i > 0 \quad (36)$$

$$0,888 - 44963,28K > 0 \quad (37)$$

$$195715,2 - 9909688464K - 11060966880K^2 > 0 \quad (38)$$

Assim, para o sistema ser estável deve-se ter:

$$-0,89 < K < 1,975 \cdot 10^{-5} \quad (39)$$

Para verificar se o sistema possui erro em regime à entrada em degrau unitário, utiliza-se o Teorema do Valor Final.

O erro  $E(s)$  é dado por:

$$E(s) = \frac{k_s}{1 + k_s \cdot K \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \cdot \frac{k_a}{L \cdot s + R} \cdot \frac{M}{s^2 + \frac{k_m}{M}}} \quad (40)$$

Aplicando uma entrada em degrau unitário no sistema, o erro em regime será dado por:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s} E(s) = \frac{k_s}{1 + k_s \cdot K \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \cdot \frac{k_a}{L \cdot s + R} \cdot \frac{M}{s^2 + \frac{k_m}{M}}} \quad (41)$$

Nota-se que o erro em regime é nulo. Dessa forma, o controlador  $PI$  estabiliza o sistema e proporciona erro nulo em regime.

## 7 ESCOLHA DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR

O objetivo desse tópico é demonstrar que o controlador que atende todos os requisitos dinâmicos do sistema (menor tempo de acomodação e menor *overshoot*) é o *PID*. Ainda, é realizada a escolha dos parâmetros desse controlador. Para tanto, utiliza-se a simulação da resposta do sistema a uma entrada em degrau. O programa utilizado para isso foi o SIMULINK, que faz parte do MATLAB[11].

Para que o sistema seja imune a ruídos de alta frequência, utiliza-se um filtro passa baixa no elemento derivativo do controlador *PID*. Então, a Função de Transferência do controlador passa a ser a representada pela Equação 42.

$$G(s) = P + \frac{I}{s} + \frac{Ds}{\tau s + 1} \quad (42)$$

Sendo:

*P*: constante do proporcional

*I*: constante da integral

*D*: constante do derivativo

$\tau$ : constante de tempo do filtro

## 7.1 ESCOLHA DO PARÂMETRO PROPORCIONAL

O diagrama de blocos do sistema está representado na Figura 33. Esse diagrama foi utilizado no programa SIMULINK, para obter a resposta do sistema a uma entrada em degrau.

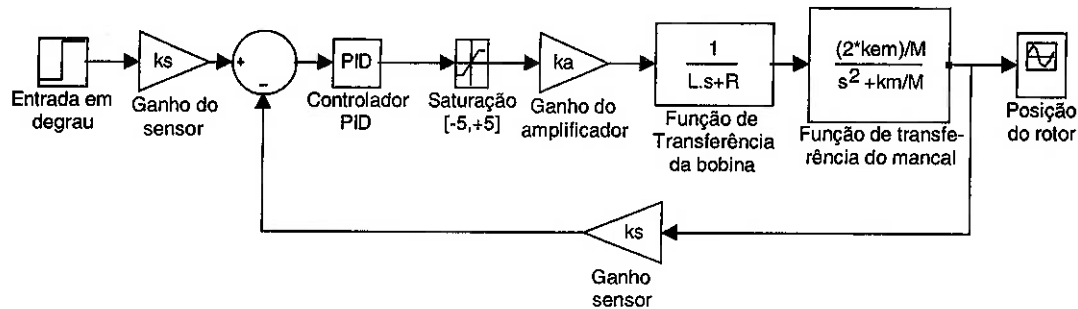


Figura 33: Diagrama de blocos do sistema

Como demonstrado no tópico 6.3.3, o sistema somente será estável com um controlador proporcional puro, se o valor da constante proporcional estiver dentro do seguinte intervalo:  $]-0,896; -0,024[$ . Entretanto, esse controlador não satisfaz o requisito de erro nulo em regime. A Figura 34 representa a resposta do sistema para uma entrada em degrau de 0,2mm, com constante  $K=-0,5$ .

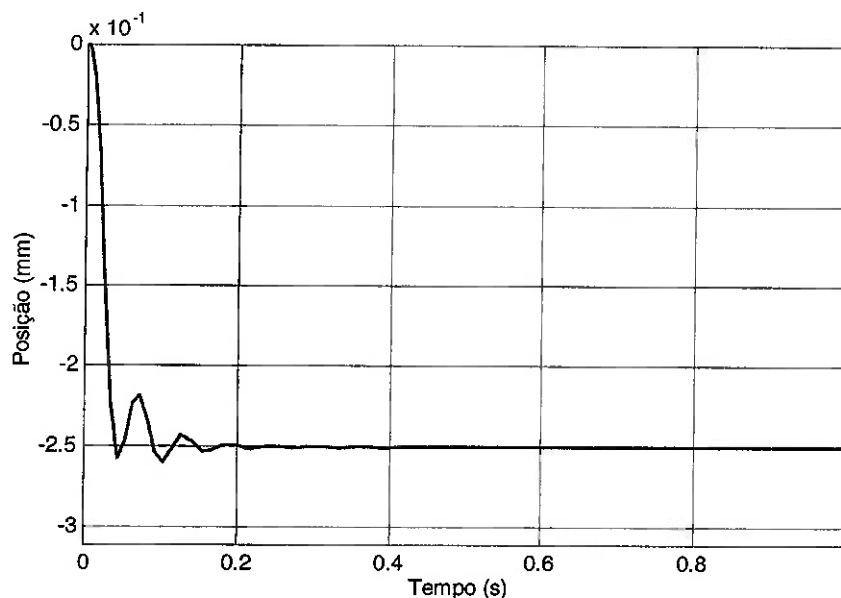


Figura 34: Resposta do sistema a uma entrada em degrau de 0,2mm – controlador puramente proporcional com  $K=-0,5$

Observando a Figura 34, nota-se que o sistema estabiliza com um valor oposto ao da entrada em degrau.

Para escolher o parâmetro proporcional, escolhe-se valores quaisquer de  $D$  (constante da derivada) e  $I$  (constante da integral) que estabilizem o sistema. Mantém-se  $D$  e  $I$  fixos, varia-se o valor de  $P$  (constante do proporcional) e obtém-se a resposta do sistema para cada valor de  $P$  escolhido, que está representada na Figura 35.

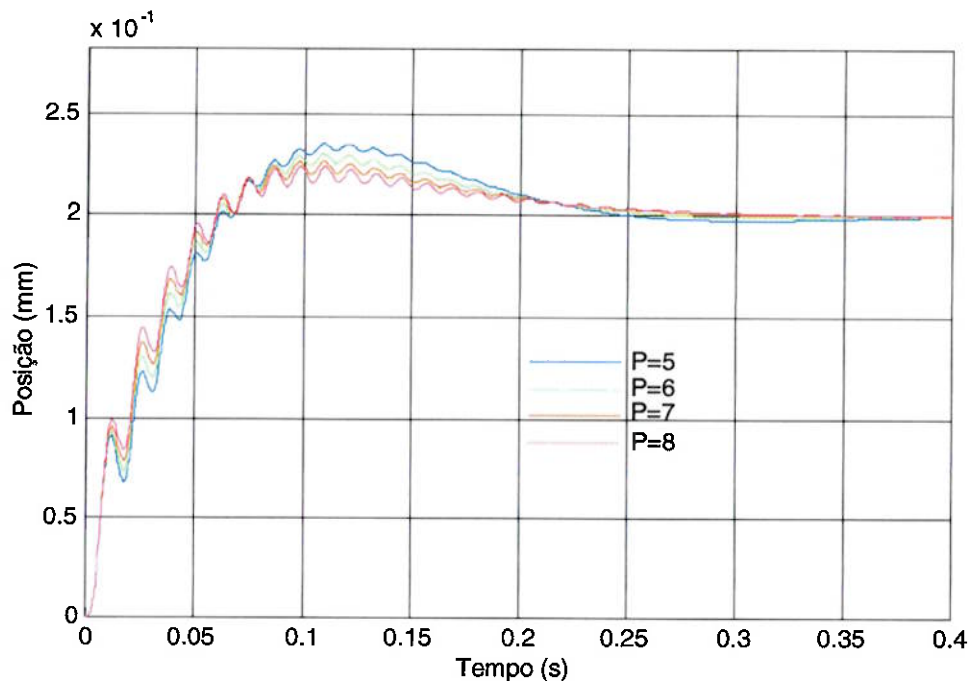


Figura 35: Resposta do sistema a uma entrada em degrau de 0,2mm – sistema com controlador  $PID$ , com os valores de  $P$  apresentados na figura

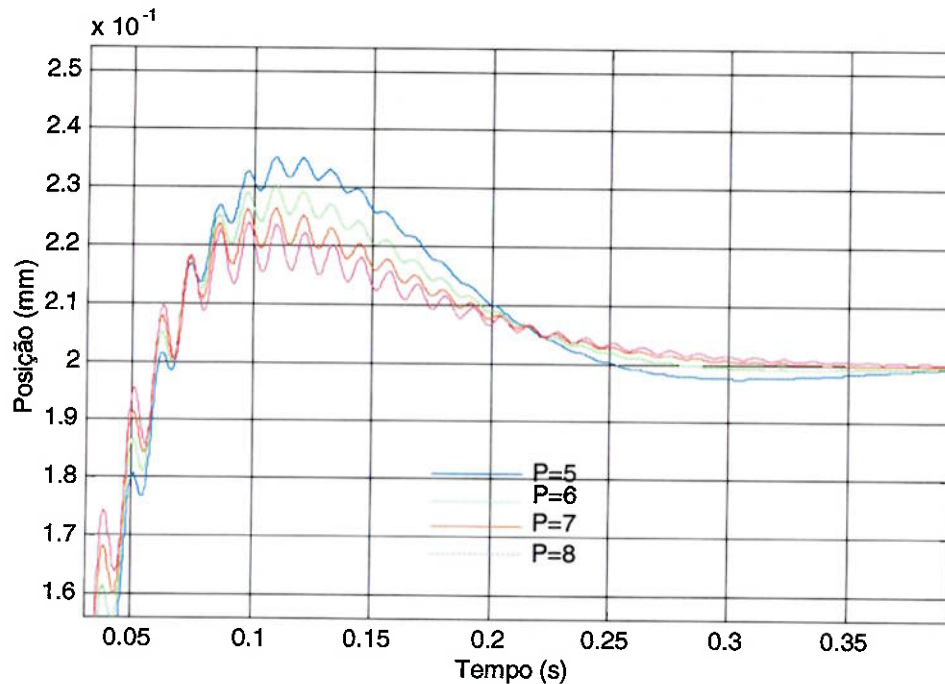


Figura 36: Ampliação da Figura 33

Observando a Figura 36, nota-se que o sistema com melhor resposta, ou seja, com menor tempo de acomodação e menor *overshoot*, é o sistema com  $P=6$ . Portanto, esse será o valor de  $P$  escolhido.

## 7.2 ESCOLHA DO PARÂMETRO DERIVATIVO

Demonstrou-se no tópico 6.3.3 que o controlador  $PD$  estabiliza o sistema, porém a resposta do sistema apresenta erro em regime. Para tanto, os valores  $P$  e  $D$  devem obedecer a Equação 31, sendo  $D=K.T_d$ . A resposta do sistema com controlador  $PD$  a entrada em degrau, com  $P=5$  e  $D=0,25$ , está representada na Figura 37. Nota-se que o sistema é estável, porém apresenta erro em regime, conforme previsto matematicamente (Equação 33).



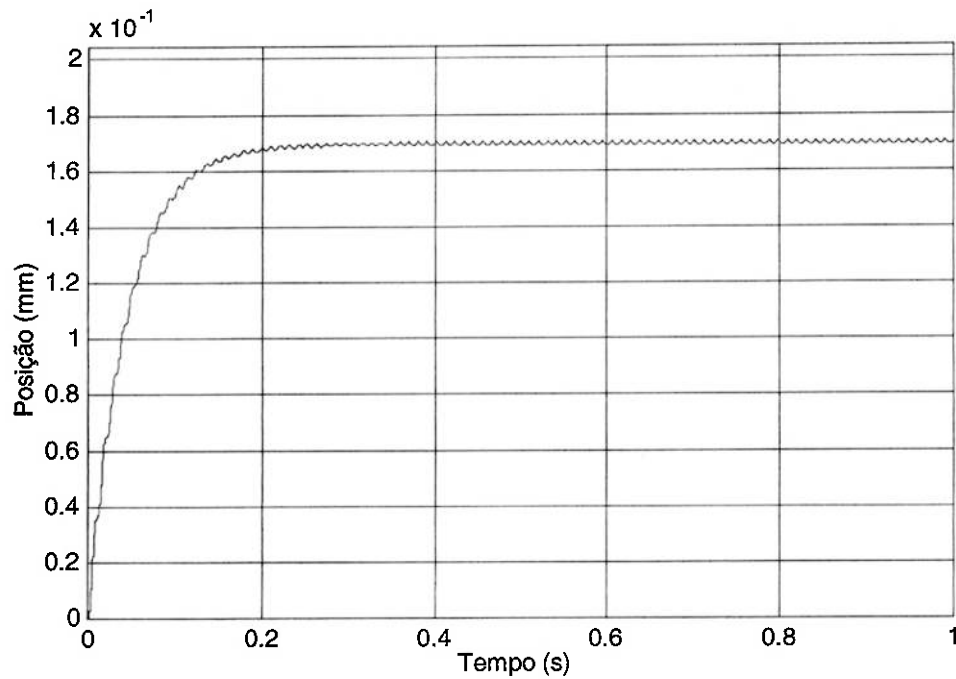


Figura 37: Resposta do sistema com controlador PD a entrada em degrau de 0,2mm

Para escolher o valor de  $D$ , utiliza-se um controlador  $PID$  com valores quaisquer de  $P$  e  $I$  que estabilizem o sistema. Mantém-se fixo  $P$  e  $I$ , varia-se o valor de  $D$  e obtém-se a resposta do sistema para cada valor de  $D$  escolhido, que está representada na Figura 38.

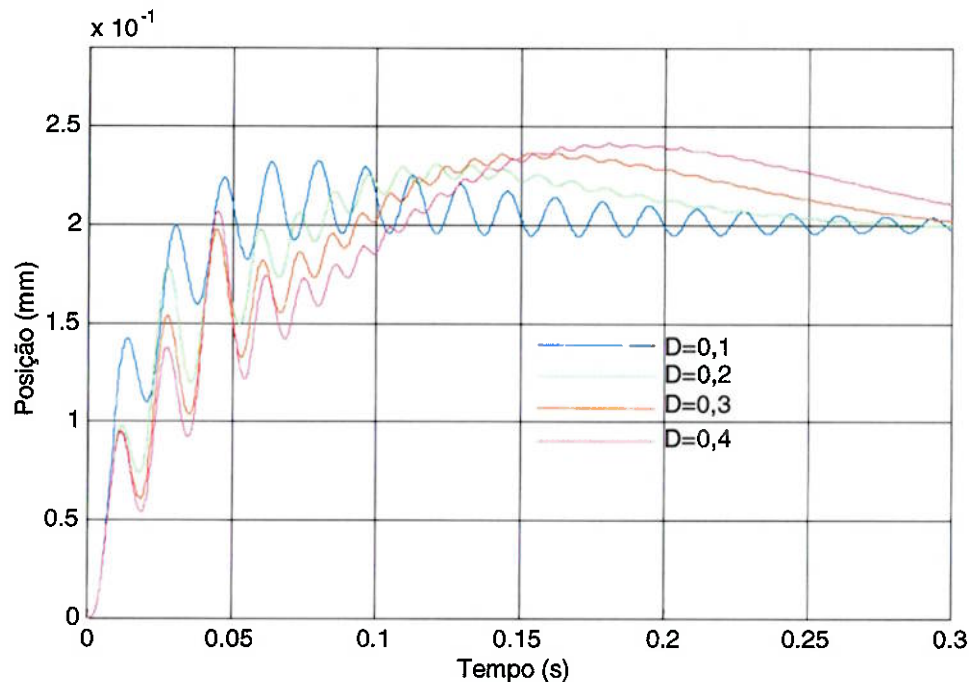


Figura 38: Resposta do sistema a uma entrada em degrau de 0,2mm – sistema com controlador *PID*, com os valores de *D* apresentados na figura

Analisando a Figura 38, observa-se que o melhor par (menor tempo de acomodação e menor *overshoot*) é obtido para  $D=0,2$ . Portanto, esse é o valor de *D* escolhido.

### 7.3 ESCOLHA DO PARÂMETRO INTEGRAL

Como demonstrado no tópico 6.3.3, o sistema é estabilizado com um controlador *PI*, com valores de *P* e *I* obedecendo a Equação 39, sendo  $P=K$  e  $I=K.T_i$ . A Figura 39 representa a resposta do sistema com controlador *PI* a entrada em degrau. Nota-se que o tempo de acomodação é muito alto (4s) e que não há erro em regime, conforme previsto pela Equação 41.

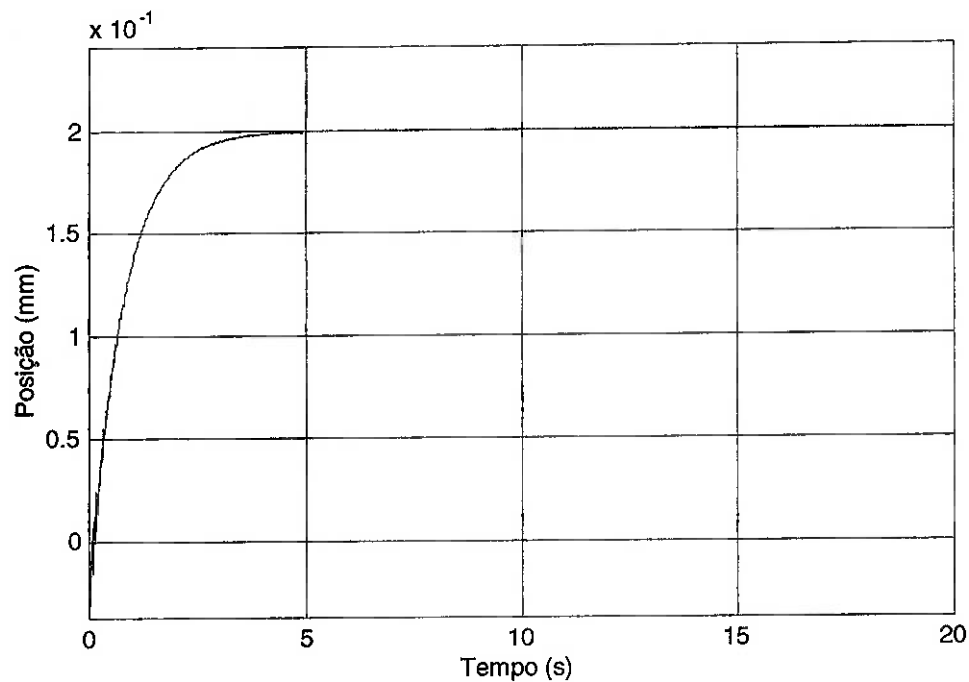


Figura 39: Resposta do sistema com controlador *PI* a entrada em degrau de 0,2mm

Os valores de *I* do controlador *PID* são os escolhidos da mesma forma que se escolheu os valores de *P* e *D* anteriormente. A resposta do sistema para cada valor de *I* escolhido está representada na Figura 40.

Observando a Figura 40, nota-se que o sistema que apresenta menor tempo de acomodação e menor *overshoot*, é o sistema com  $I=100$ . Logo, esse é o valor de *I* escolhido.

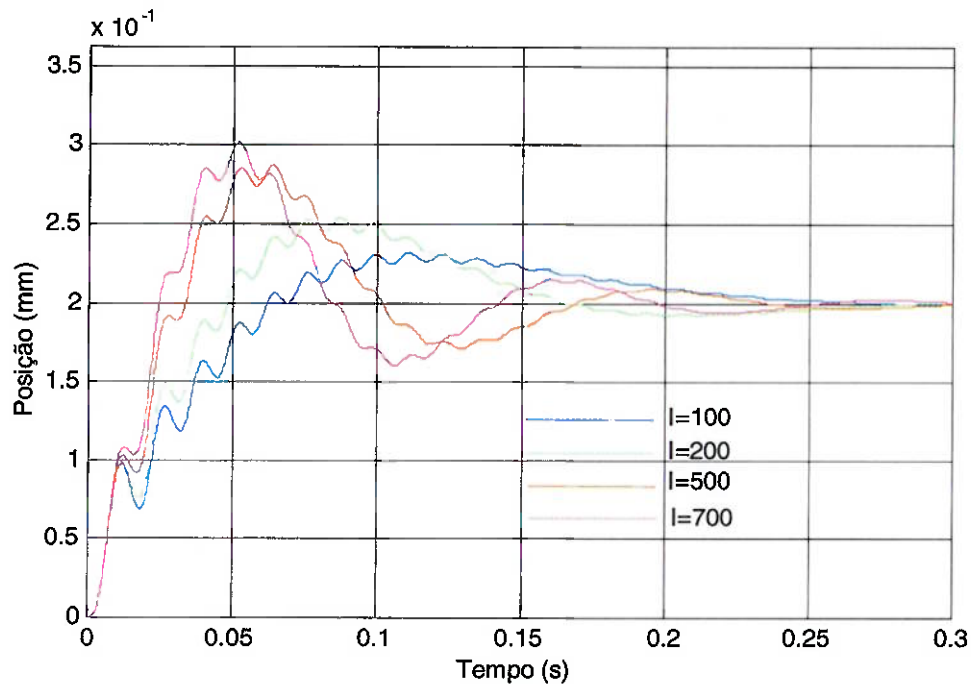


Figura 40: Resposta do sistema a uma entrada em degrau de 0,2mm – sistema com controlador *PID*, com os valores de  $I$  apresentados na figura

#### 7.4 ESCOLHA DO PARÂMETRO DO FILTRO DO CONTROLADOR

Para escolher a constante de tempo do filtro derivativo, realiza-se o mesmo procedimento feito para os parâmetros anteriores. A Figura 41 apresenta a resposta do sistema para cada valor de  $\tau$  do filtro ( $\tau=1/N$ ). Escolhe-se  $\tau=1/16000$  como constante do filtro derivativo.

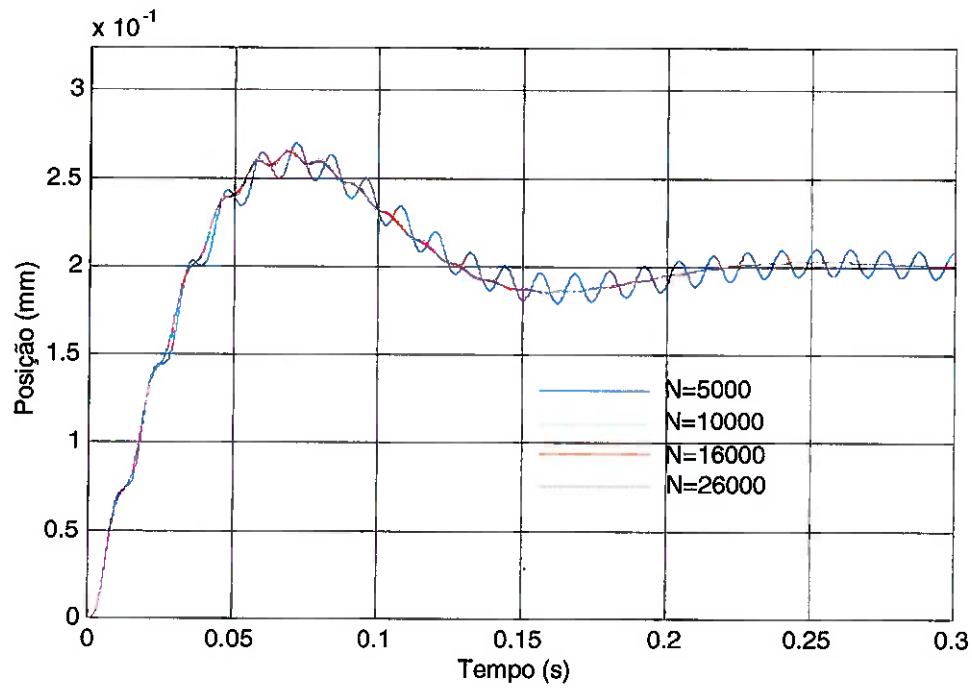


Figura 41: Resposta do sistema a uma entrada em degrau de 0,2mm – sistema com controlador *PID*, com os valores de  $\tau=1/N$  apresentados na figura

## 8 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE NO MANCAL

O controle do mancal magnético é realizado através do computador, ou seja, de forma digital. Para isso, é necessário uma placa de conversão A/D (analógico/digital) e D/A (digital/analógico) para coletar os dados do sensor para serem tratados digitalmente. Além disso, é necessário obter o controlador no domínio discreto, ou seja, a Função de Transferência do mesmo no domínio  $z$ [10]. Então, esses são os assuntos tratados nesse tópico.

### 8.1 CONTROLADOR NO DOMÍNIO $s$

Após a escolha dos parâmetros do controlador por meio de tentativas, obteve-se o controlador  $PID$  com filtro derivativo apresentado na Equação 43.

$$G(s) = P + \frac{I}{s} + \frac{Ds}{\tau s + 1} = 6 + \frac{100}{s} + \frac{0,2.s}{(1/16).10^{-3}.s + 1} \quad (43)$$

### 8.2 CONTROLADOR NO DOMÍNIO DA VARIÁVEL $z$

O controle do mancal será realizado digitalmente, via computador, portanto é necessário obter o controlador na sua forma discreta. Existem diversos métodos de discretização, dentre esses estão o *método de transformação bilinear* e o *segurador de ordem zero*[9]. Então, utilizando-se o MATLAB, discretizou-se por esses dois métodos o controlador dado pela Equação 43. A escolha do método a ser utilizado será baseado na resposta do sistema a uma entrada em degrau unitário. Na Figura 43 representa-se essa resposta para os controladores obtidos por esses dois métodos.

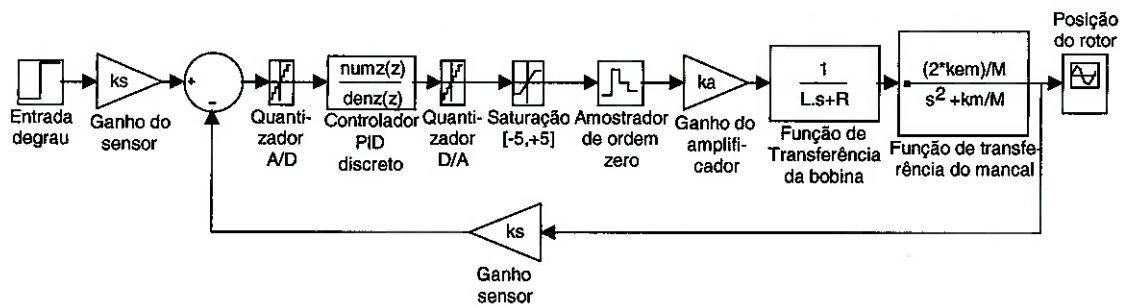
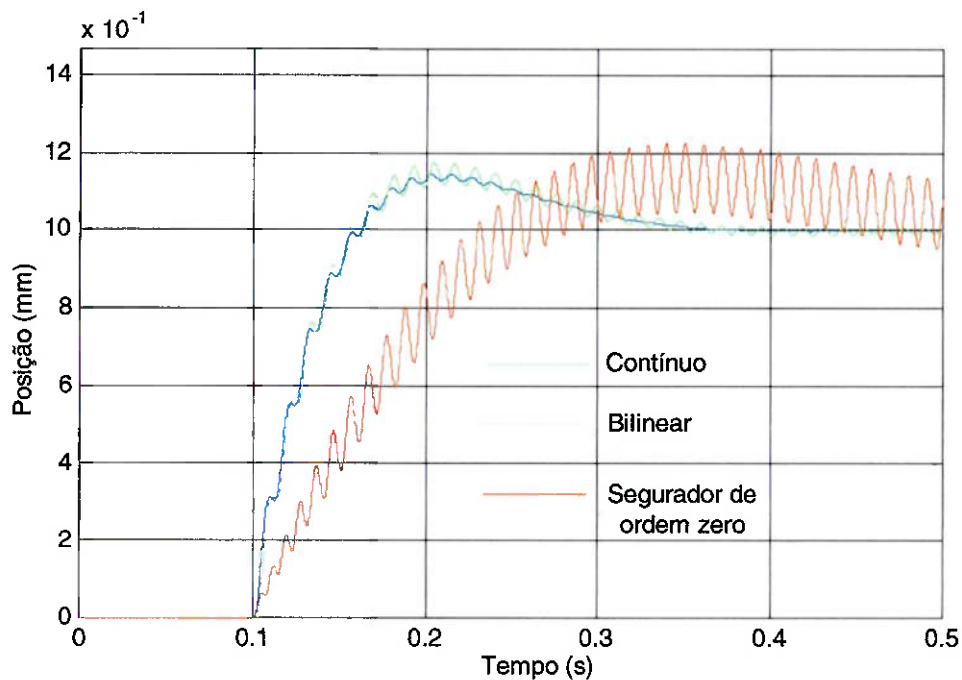


Figura 42: Diagrama de blocos para o sistema com controlador discreto


 Figura 43: Resposta a uma entrada em degrau de 0,1mm para o sistema com controlador *PID* contínuo e discreto

Verifica-se através da Figura 43 que o controlador *PID* discreto a ser utilizado, é o obtido pelo método de *Transformação Bilinear*, pois corresponde melhor ao controlador projetado no domínio *s*, quanto à resposta do sistema à entrada em degrau. A Equação 44 representa esse controlador no domínio *z*.

$$G(z) = \frac{1236,8z^2 - 2466,1z + 1229,4}{z^2 - 0,769z - 0,231} \quad (44)$$

### 8.3 EQUAÇÃO DE DIFERENÇAS DO CONTROLADOR

Para implementar o controlador digital num programa de controle é necessário obter a equação de diferenças do controlador[10].

A Função de Transferência do controlador dada pela Equação 44 é representada a seguir.

$$\frac{u(k)}{e(k)} = \frac{1236,8 - 2466,1z^{-1} + 1229,4z^{-2}}{1 - 0,769z^{-1} - 0,231z^{-2}} \quad (45)$$

$u(k)$  : saída do controlador no instante  $k$

$e(k)$  : erro como entrada do controlador no instante  $k$

Manipulando a Equação 45 tem-se:

$$u(k) - u(k).0,769z^{-1} - u(k).0,231z^{-2} = e(k).1236,8 - e(k).2466,1z^{-1} + e(k).1229,4z^{-2} \quad (46)$$

Ao se multiplicar por  $z^{-1}$  uma variável, introduz-se um atraso de  $T$ (tempo de amostragem), ou seja,  $u(k).z^{-1}$  é o mesmo que  $u(k-1)$ [10]. Então, a Equação de diferenças do controlador torna-se:

$$u(k) = u(k-1).0,769 + u(k-2).0,231 + e(k).1236,8 - e(k-1).2466,1 + e(k-2).1229,4 \quad (47)$$

Essa foi a equação de diferenças implementada no programa de controle apresentado no anexo.



## 8.4 A PLACA DE CONVERSÃO A/D E D/A

A placa de conversão A/D e D/A é o elemento responsável pela coleta e transferência de dados relativos ao sinal do sensor para o computador (conversão analógico – digital, A/D), assim como pela transformação de valores numéricos gerados pelos programas de controle em sinais elétricos analógicos (conversão digital – analógico, D/A), que uma vez amplificados alimentarão os eletroímãs do mancal.

Apresenta-se a seguir algumas características da placa de conversão analógico-digital e digital-analógico utilizada.

### 8.4.1 FUNÇÕES PRÉ-DEFINIDAS

A placa ICP A-826PG é acompanhada de um disquete que possui alguns programas, os quais são funções pré-definidas que visam facilitar a sua utilização.

### 8.4.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA PLACA [7]

- Número de canais para conversão A/D: 16 no modo simples ou 8 no modo diferencial;
  - Taxa máxima de conversões: 100KHz;
  - Modos para disparar a conversão: software (interno), pacer (interno), externo e por evento. Disparador interno ou externo;
  - Ganho: 1, 2, 4 ou 8 (ganho 1: sinais de entrada entre -10 a 10V);
  - Canais de entrada e saída digital;
  - Resolução A/D: 16 bits;
  - Número de canais de saída D/A: 2;
  - Faixa de valores na saída D/A: 0-5V ou 0-10V (no caso de uso de referência interna para a voltagem).
- Obs.:** Para obter valores negativos para a saída deve-se usar referência externa e nela aplicar valores de tensão.
- Resolução D/A: 12 bits.

### 8.4.3 ENDEREÇO DA PLACA

O endereço físico da placa pode ser escolhido através dos botões específicos existentes na placa [7]. O endereço utilizado é o recomendado pelo fabricante  $(220)_h$ .

### 8.4.4 CONTADORES

Existem três contadores de 16 bits. Os contadores '1' e '2' cascadeados são usados como sinal de disparo interno da conversão A/D (pacer trigger), assim tem-se um contador de 32 bits. O contador '0' é usado pela função "A826\_Delay" ou, quando selecionado, pelo disparador via evento; nunca os dois devem ser usados ao mesmo tempo. Os contadores podem ser programados através da escrita da palavra de programação no controlador (Base+3) e da escrita no endereço do contador que se deseja usar.

O contador '0' tem a saída acessível no terminal (placa externa), portanto pode-se conectar essa saída no pino do trigger externo que também se encontra nesse terminal.

**Obs.:** A palavra de controle é quem definirá como será interpretado o número que será escrito no contador. A palavra de programação é encontrada no manual do contador da Intel.

### 8.4.5 MODO DE INTERRUPÇÃO E DMA

Para usar o método Interrupção deve-se verificar qual nível está 'jampeado' na placa [7]. Da mesma forma para DMA (CH1 ou CH3) [7]. Para usar os contadores (DMA e INTERRUPÇÃO usam os contadores) deve-se verificar se foi 'jampeado' clock interno ou externo [7].

O modo DMA realiza o total de conversões que se explicitou no programa de uma única vez, isso é, pára a execução do programa até que todas as conversões estejam realizadas. Esses dados são guardados na memória. É útil quando se deseja construir um gráfico dos sinais de entrada em função do tempo, já que o intervalo entre as conversões é constante e conhecido.

O modo **INTERRUPÇÃO** só pára a execução do programa no instante de cada leitura, portanto deixa o intervalo entre as leituras livre para que se faça a execução do restante do programa.

#### 8.4.6 PROGRAMA DE CONTROLE

O programa de controle além de controlar a posição axial do rotor, monitorará em tempo real alguns graus de liberdade do rotor (excetuando-se a rotação em torno do próprio eixo). Para tanto, esse programa utiliza-se de três canais da placa de conversão, sendo que cada um será conectado a um sensor do tipo indutivo. O disparo para a conversão é feito seqüencialmente, um canal após o outro. Após o processamento das entradas (a entrada é o sinal do sensor) o sinal digital resultante (um número) será convertido para sinais elétricos através de um canal D/A da placa. Depois de amplificado, esse sinal alimentará os eletroímãs, que modificarão a posição do rotor. Uma nova leitura do sensor será feita e o processo se repete.

A seguir apresenta-se o diagrama NS do programa de controle utilizado. É usual em programas de grande porte a divisão do programa em blocos, ou ainda, em subarquivos que contém as sub-rotinas utilizadas pelo programa principal, isso facilita a compilação desse. Então, optou-se por fazer o programa dessa forma. A seguir os diagramas relativos a cada subarquivo Os programas seguem em anexo.

PROGRAMA QUE ARMAZENA EM ARQUIVO OS DADOS COLETADOS	
Recebe do programa principal o número do sensor e os dados relativos a ele	
Declaração de ponteiros para arquivos que armazenarão dados do sensor 1,2 e 3	
Se o número do sensor for:	
	1: abre arquivo relativo ao sensor 1 e grava os dados relativos a esse sensor
	2: abre arquivo relativo ao sensor 2 e grava os dados relativos a esse sensor
	3: abre arquivo relativo ao sensor 3 e grava os dados relativos a esse sensor
Fecha os arquivos abertos	

Diagrama 1: Diagrama NS do programa arquivo.c

PROGRAMA QUE LÊ OS SENSORES
Não recebe nada do programa principal
Declara variáveis para armazenar o valor lido
Espera tempo de amostragem
Espera terminar conversão
Lê o valor do sensor
Retorna valor lido para o programa principal

Diagrama 2 : Diagrama NS do programa lesensor.c

PROGRAMA QUE INICIALIZA A PLACA DE AQUISIÇÃO
Não recebe nada do programa principal
Chama rotina que inicializa a placa para usar as subrotinas que acompanham a mesma
Seleciona disparo por trigger interno
Seleciona ganho 1
Programa contador 1 e 2 de acordo com a taxa de amostragem

Diagrama 3 : Diagrama NS do programa inicia.c

PROGRAMA QUE CONVERTE OS DADOS LIDOS
Recebe do programa principal o dado lido
Declara variável para armazenar a resolução da placa
Inicializa a variável acima com o valor da resolução
Converte dado
Retorna o dado convertido para o programa principal

Diagrama 4 : Diagrama NS do programa converte.c

PROGRAMA QUE APRESENTA A TELA INICIAL DO PROGRAMA
Não recebe nada do programa principal
Declara variável para detectar e armazenar o modo gráfico
Inicializa modo gráfico
Define cor de fundo e estilo de texto
Define cor do texto principal
Escreve na tela texto principal (apresentação do programa)
Define cor do texto que pede os valores de entrada para o usuário
Pede para o usuário o período de amostragem e as constantes do <i>PID</i>
Espera usuário apertar uma tecla para inicializar o controle

Diagrama 5 : Diagrama NS do programa tela.c

PROGRAMA PRINCIPAL
Declara variáveis globais a serem usadas pelo programa principal e sub-rotinas
Inclusão de bibliotecas para utilizar as funções pré-definidas
Inclusão dos arquivos que contém as sub-rotinas utilizadas pelo programa principal
Declara função que contém a estratégia de controle (essa função recebe os dados do sensor 1)
Declara variáveis para armazenar os valores lidos pelo sensor 1, 2 e 3
Inicializa variáveis
limpa tela
chama rotina que mostra a tela de apresentação
chama rotina de inicialização da placa
Escolhe o canal a ser lido (correspondente ao sensor 2)
Faça:
chama rotina de leitura de sensor (sensor 2)
chama rotina de conversão de dados
escolhe o canal a ser lido (correspondente ao sensor 3)
chama rotina de leitura de sensor (sensor 3)
chama rotina de conversão de dados
escolhe o canal a ser lido (correspondente ao sensor 1)
chama rotina de leitura de sensor (sensor 1)
chama rotina de conversão de dados
chama rotina que realiza o controle
escolhe o canal a ser lido (correspondente ao sensor 2)
Enquanto não se apertar alguma tecla
Chama rotina que armazena os dados em arquivos – para o sensor 1
Chama rotina que armazena os dados em arquivos – para o sensor 2
Chama rotina que armazena os dados em arquivos – para o sensor 3

Diagrama 6 : Diagrama NS do programa principal

## 8.5 COMPORTAMENTO REAL DO SISTEMA

A equação de diferenças obtida anteriormente foi implementada no programa de controle da planta. Entretanto, o controlador projetado não estabilizava o rotor na direção axial. Isso é uma consequência da modelagem realizada para o mancal, mais especificamente para a bobina, pois, como comentado, o experimento utilizado para levantar a rigidez eletromagnética era impreciso.

Então, ajustou-se os parâmetros do controlador na prática, ou seja, variou-se esses parâmetros no próprio programa de controle de forma a obter a estabilidade do mancal. Atingido esse objetivo, aplicou-se uma entrada em degrau no sistema e construiu-se um gráfico da resposta do sistema. Utilizando-se do mesmo procedimento descrito no tópico 7, escolheu-se os parâmetros do *PID* que resultaram numa resposta a entrada em degrau com menor *overshoot* e menor tempo de acomodação. A Figura 44 apresenta a resposta obtida.

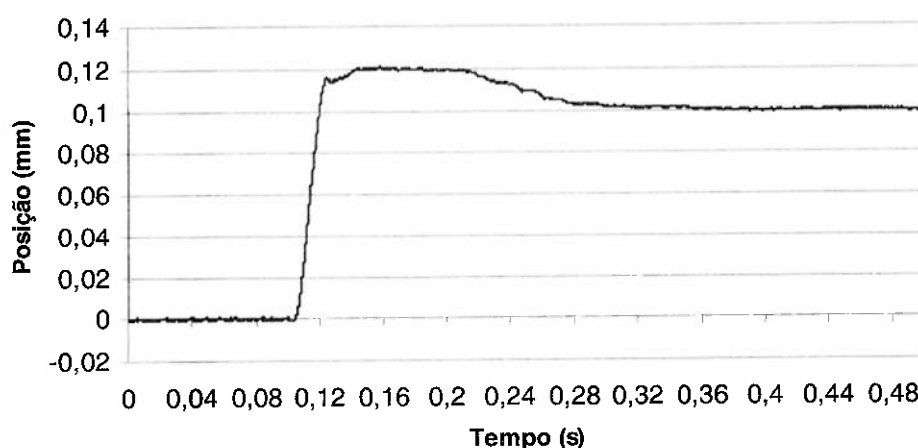


Figura 44: Resposta real do sistema à entrada em degrau de 0,1mm – sistema com controlador *PID*

Analisando a Figura 44, nota-se que o tempo de acomodação é 0,2 s e o *overshoot* é 20%, considera-se essa resposta muito adequada para um mancal magnético. Para o mancal inicial o *overshoot* foi de 40% e o tempo de acomodação de 0,15s (Figura 5), logo houve um melhora satisfatória no *overshoot* sem prejudicar consideravelmente o tempo de acomodação para o novo mancal.

Para verificar a precisão de posicionamento axial do mancal, apresenta-se primeiro a saída do sensor apontado para um alvo parado, conforme Figura 45. Nota-se que a saída do sensor varia de  $0,5 \mu\text{m}$ .

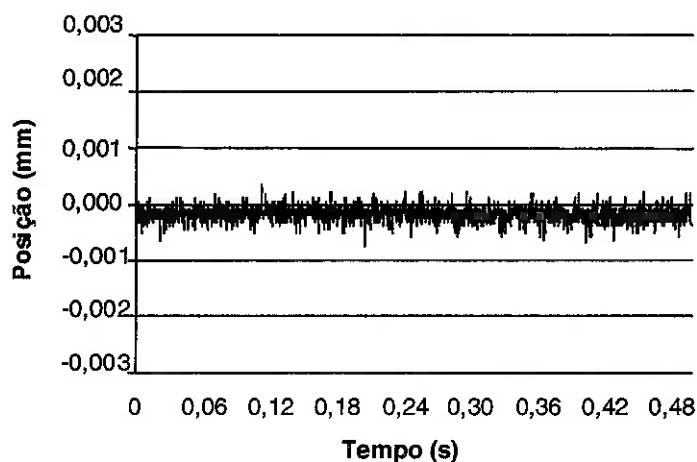


Figura 45: Sinal de saída do sensor apontado para um alvo parado

A Figura 46 apresenta a variação do posicionamento axial do rotor do mancal, observa-se que é de aproximadamente  $1 \mu\text{m}$ , o que é considerado um ótimo resultado para o mancal magnético projetado.

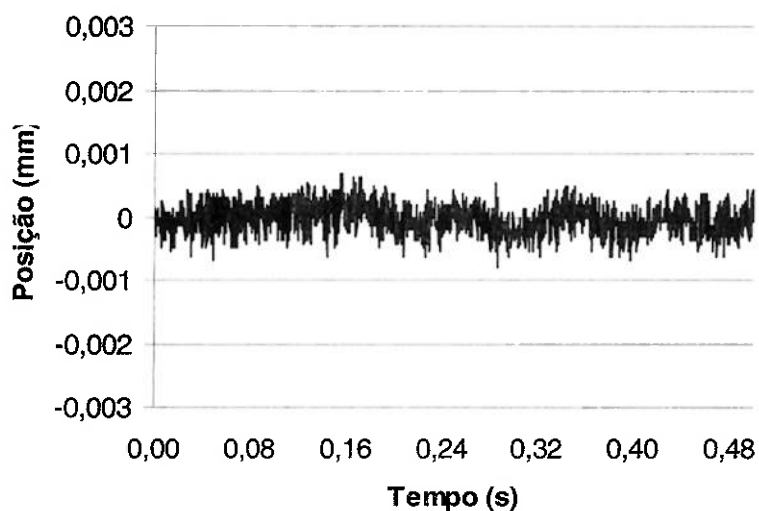


Figura 46: Posicionamento axial do rotor do mancal magnético

A Figura 47 apresenta uma foto do mancal projetado com o rotor levitando.

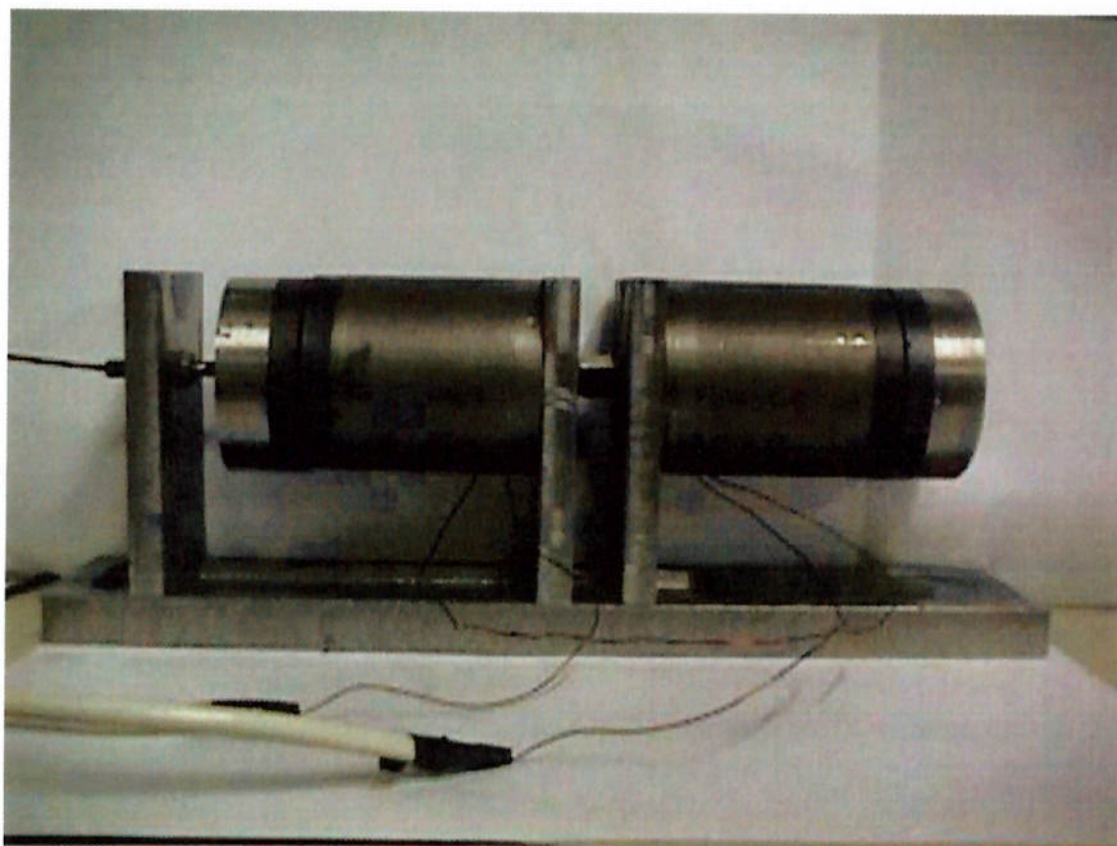


Figura 47: Mancal magnético projetado com rotor levitando



### 8.5.1 NOVA DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ELETROMAGNÉTICA

Conforme esperado, a constante eletromagnética não seria a real, pois o método utilizado no tópico 5, não oferecia razoável precisão. Então, a constante eletromagnética é determinada neste momento a partir da resposta à entrada em degrau do sistema, conforme o seguinte procedimento:

- colocou-se os valores encontrados na prática para o *PID* na malha de simulação;
- variou-se a constante do eletroímã até que a resposta da simulação fosse semelhante à real obtida. Esse valor foi o adotado com real para a constante eletromagnética  $k_{em}$ .

A Figura 48 apresenta a resposta obtida na simulação com  $k_{em}=4,0\text{N/A}$ , observa-se que é semelhante a apresentada na Figura 44, pois apresenta *overshoot* de aproximadamente 20% e tempo de acomodação por volta de 0,2s. Portanto, essa é a nova constante eletromagnética.

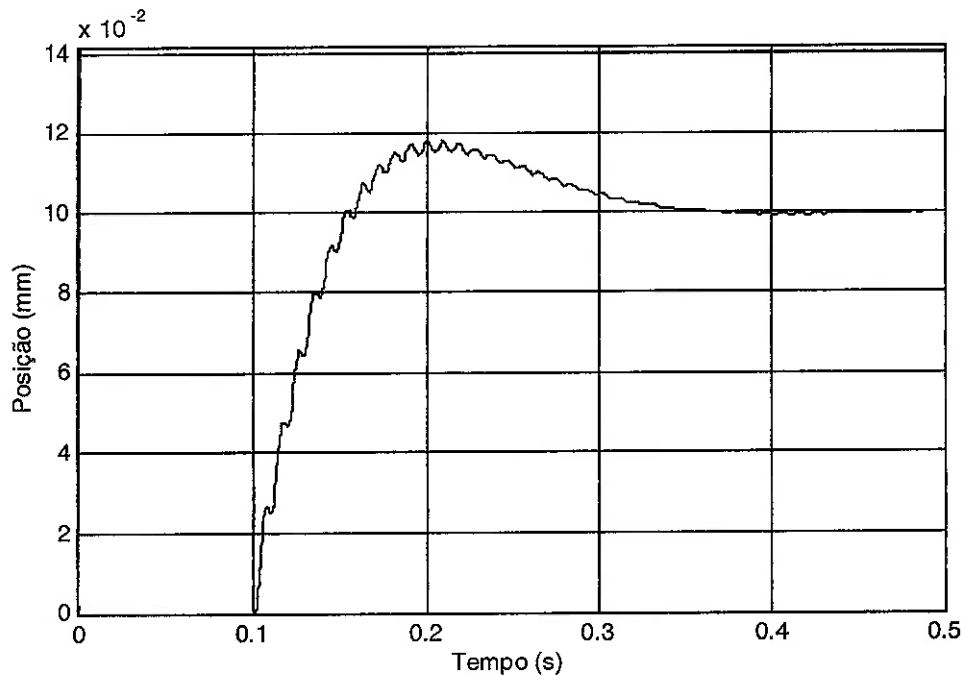


Figura 48: Resposta à entrada em degrau de 0,1mm obtida por simulação para os novos valores dos parâmetros *PID* e para  $k_{em}=4\text{ N/A}$

### 8.5.2 RIGIDEZ AXIAL E RADIAL

Conforme provado experimentalmente no início deste trabalho, a rigidez axial aumenta ao se fechar o campo magnético. Para uma configuração de ímãs permanentes apresentado na Figura 49, a rigidez radial é proporcional a axial, logo se uma aumenta a outra também.

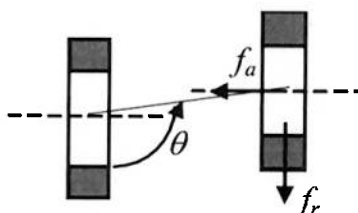


Figura 49: Ímãs em campo aberto

Neste trabalho assumiu-se como hipótese que isso também seria verdade para a configuração apresentada na Figura 50. Entretanto, ao montar o mancal magnético e colocá-lo em levitação, notou-se que surgiu uma “zona morta” na região central, que impossibilitava a sustentação completa do mancal na direção radial. Dessa forma, não foi confirmada a hipótese assumida, embora se tenha obtido ótimos valores para a direção axial.

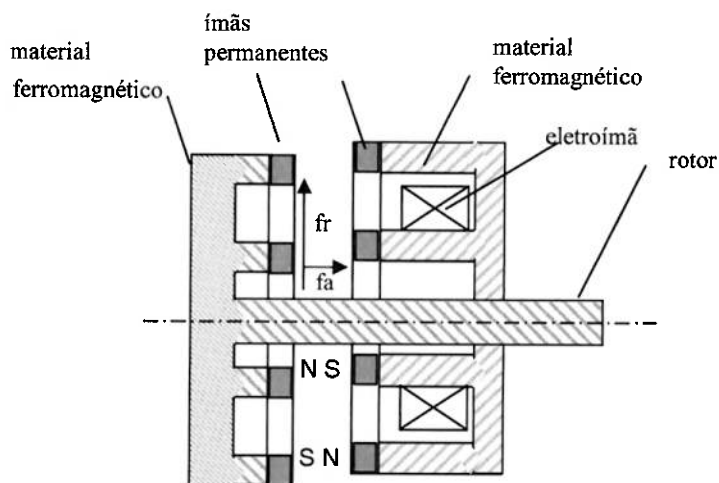


Figura 50: Ímãs em campo fechado

## CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo a construção de um novo protótipo de mancal magnético. Esse projeto tinha como necessidade estabelecida o aumento de rigidez radial. Então, após os estudos realizados no tópico 3 e dos experimentos descritos no tópico 4, projetou-se o mancal magnético com campo magnético fechado descrito no tópico 5.

Para tal projeto foram utilizados os conceitos de Eletromagnetismo e Projeto Mecânico. Após projetado o mancal, construiu-se o mesmo utilizando as máquinas disponíveis no laboratório de PMR. Em seguida, levantou-se as características elétricas, de rigidez e físicas do protótipo.

Depois de conhecidas essas características, partiu-se para a modelagem matemática do sistema. Esse é um dos assuntos de maior importância na área de Engenharia, pois para se trabalhar com qualquer sistema físico, é necessário primeiro entender seu funcionamento e realizar uma modelagem que permita uma análise utilizando ferramentas matemáticas. No caso da Teoria de Controle, as principais ferramentas são a Transformada de Fourier e a Transformada de Laplace que permitem analisar o sistema no Domínio da Frequência.

Tendo obtido a Função de Transferência do sistema, iniciou-se o projeto do controlador. Para tanto, utilizou-se uma forma consagrada em Teoria de Controle que é o projeto baseado na resposta do sistema à entrada em degrau. Assim, projetou-se um controlador que resultasse no menor *overshoot* e menor tempo de acomodação.

Obtido o controlador no domínio contínuo, necessitou-se de obter o correspondente no domínio discreto para utilizar num algoritmo de programa. Para tanto, lançou-se mão dos métodos de discretização abordados em Teoria de Controle Digital.

Após definido o controlador na forma digital, implementou-se um programa em linguagem C para realizar o controle do mancal na direção axial. Sendo a entrada do programa proveniente de uma placa de aquisição de dados e a saída do programa também enviada para esta placa conforme descrito no corpo de trabalho.

Aplicando o controle ao sistema, foram levantadas as características dinâmicas do sistema, dentre elas a variação de posição axial do mancal e a resposta do sistema à entrada em degrau, as quais satisfizeram de forma ímpar os resultados

esperados. Entretanto, não confirmou-se o aumento de rigidez radial, embora a rigidez axial aumentou consideravelmente.

## TRABALHOS FUTUROS

São propostos aqui alguns procedimentos para aumentar ou até mesmo para avaliar a rigidez radial do mancal.

Primeiramente, pode-se diminuir o entreferro, pois assim a força radial aumenta e o rotor pode ser sustentado completado nesta direção. Isso tornaria possível colocar o rotor em rotação e avaliar a variação de posição na direção radial.

Outra proposta é aumentar o furo por onde passa o rotor, pois no mancal projetado ao colocar o rotor em rotação, o mesmo encostava-se à parede do furo, dessa forma impossibilitava medir a variação da posição radial.

Finalizando, recomenda-se projetar os ímãs e os eletroímãs através de um programa de Elementos Finitos, por exemplo, ANSYS. Pois, dessa forma seria possível obter uma configuração que proporcionasse um aumento da rigidez radial. A grande vantagem é o poder de simulação que essa ferramenta possibilita.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Serway, Raymond A. ; Física para cientistas e engenheiros – Volume 3, 3ª edição – LTC; Rio de Janeiro , Br – 1996
- [2] Cogdell, J. R. ; Foundations of Electric Power – Prentice Hall; New Jersey, USA – 1999
- [3] Roters, Herbert C. ; Electromagnetic devices – John Wiley & Sons, Inc.; New York, USA – 1941
- [4] Pereira, William de A. e Horikawa, O. – Mancal Magnético com Controle Somente em um eixo – Projeto de iniciação científica – FAPESP, USP; São Paulo, Brasil - 2000
- [5] Silva, I. da e Horikawa, O – Mancal Magnético do tipo atração com controle uniaxial – Dissertação de Mestrado – USP; São Paulo, Brasil – 2000
- [6] R. Araraki; Fundamentos de programação C, segunda edição – LTC; Rio de Janeiro, 1990.
- [7] A826 – Multi-Function Card Manual – ICP\_DAS –TAIWAN
- [8] K. Ogata; Engenharia de Controle Moderno, Editora Prentice Hall; Rio de Janeiro, 1982.
- [9] K. Ogata; Discrete-time control systems, segunda edição – Prentice Hall; Rio de Janeiro, 1995
- [10] G F. Franklin; Digital control of dynamic systems – second edition –Addison-Wesley Publishing Company, USA – 1992.

- [11] MATLAB – The student edition of SIMULINK; dynamic system simulation for technical students – user's guide – Englewood Cliffs – Prentice Hall – 1996
  
- [12] Yonnet, J.P. – Permanent magnet bearing and coupling. IEEE Trans. on Mag. – Vol.17 – 1981
  
- [13] Slocum, A.H. – Precision machine design – MIT – Prentice Hall – 1992
  
- [14] Zampese, B. – Mancais de rolamento – Monografia EPUSP – Segunda Edição – 1980

## ANEXO

Este anexo apresenta os desenhos mecânicos de fabricação do mancal magnético bem como as listagens dos programas utilizados na simulação e controle do mesmo.

A seguir o programa de controle em linguagem C.

```
//PROGRAMA DE CONTROLE DO MANCAL MAGNÉTICO
//PROJETO DE FORMATURA
//BOLSISTA: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA
//ORIENTADOR: PROF.DR.OSWALDO HORIKAWA

//ARQUIVO QUE CONTÉM A SUBROTINA QUE ARMAZENA OS DADOS COLETADOS EM
//ARQUIVOS DE TEXTO

//NOME DO PROGRAMA: ARQUIVO.C

void armazena_em_arquivo (float dados[],int sensor)
{
    int k;
    FILE *sensor1,*sensor2,*sensor3;

    switch (sensor)
    {
        case 1: sensor1=fopen ("c:/matlab/bin/sensor1.out","w");
                for (k=0;k<MAX;k++)
                    fprintf (sensor1,"\n%f",dados[k]);
                break;

        case 2: sensor2=fopen ("c:/matlab/bin/sensor2.out","w");
                for (k=0;k<MAX;k++)
                    fprintf (sensor2,"\n%f",dados[k]);
                break;

        case 3: sensor3=fopen ("c:/matlab/bin/sensor3.out","w");
                for (k=0;k<MAX;k++)
                    fprintf (sensor3,"\n%f",dados[k]);
                break;
    }
}
```



```
        exit (1);

    }

    fclose (sensor1);
    fclose (sensor2);
    fclose (sensor3);
}

*****

//PROGRAMA DE CONTROLE DO MANCAL MAGNÉTICO
//PROJETO DE FORMATURA
//BOLSISTA: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA
//ORIENTADOR: PROF.DR.OSWALDO HORIKAWA

//ARQUIVO QUE CONTÉM A SUBROTINA QUE CONVERTE OS DADOS COLETADOS EM //VALOR
DE TENSÃO CORRESPONDENTE

//NOME DO PROGRAMA: CONVERTE.C

float converte_AD (float dado)
{
    float taxa_de_conversao=10.0/32767.0;

    if (dado>=0x8000 && dado<=0xffff)
        dado=dado-65535;
    dado=dado*taxa_de_conversao;

    return (dado);
}

*****

//PROGRAMA DE CONTROLE DO MANCAL MAGNÉTICO
//PROJETO DE FORMATURA
//BOLSISTA: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA
//ORIENTADOR: PROF.DR.OSWALDO HORIKAWA
```

```
//ARQUIVO QUE CONTÉM A SUBROTINA QUE INICIALIZA A PLACA DE ACORDO COM A
//TAXA DE AMOSTRAGEM DESEJADA

//NOME DO PROGRAMA: INICIA.C

#define base 0x220

void inicializa_placa ()
{
    //Inicializando a placa para usar as bibliotecas disponíveis do
    //software que acompanha a mesma

    A826_Initialize (0,base,-1,-1);

    //selecionando tipo de disparo - trigger interno - polling

    outportb (base+11,6);

    //selecionando ganho 1 (faixa de leitura de -10 a 10 V)

    outportb (base+9,0);

    //programando o pacer trigger, ou seja, o contador 1 e 2,
    //cascadeados

    //selecionando modo de controle do temporizador - escolhendo modo 3
    //(no modo 3 a saída do temporizador , uma onda quadrada com
    //frequência do clock dividida pelo número escrito no contador), contador
    //1, 16 bits e escreve primeiro o byte menos significativo e depois o
    //mais significativo

    outportb (base+3,0x76);

    //escrevendo o valor no contador 0 que dividirá a frequência do clock
    //por ele

    outportb (base+1,10); //byte menos significativo
```

```
    outportb (base+1,0); //byte mais significativo

    //selecionando modo de controle do temporizador - escolhendo modo 3,
    //contador 2, 16 bits e escreve primeiro o byte menos significativo e
    //depois o mais significativo

    outportb (base+3,0xb6);

    //escrevendo o valor no contador 0 que dividir a frequ^ncia do clock
    //por ele

    outportb (base+2,13); //byte menos significativo

    outportb (base+2,0); //byte mais significativo
}

*****

//PROGRAMA DE CONTROLE DO MANCAL MAGNÉTICO
//PROJETO DE FORMATURA
//BOLSISTA: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA
//ORIENTADOR: PROF.DR.OSWALDO HORIKAWA

//ARQUIVO QUE CONTÉM A SUBROTINA QUE REALIZA A LEITURA DO SENSOR DE
//ACORDO COM A TAXA DE AMOSTRAGEM ESCOLHIDA

//NOME DO PROGRAMA: LESENSOR.C

#define base 0x220

float ler_sensor ()
{
    long int leitura;
    float valor;

    while (((inportb (base+8)) & 0x10)); //espera tempo de amostragem
    while (((inportb (base+8)) & 0x10)); //espera terminar a conversao
```

```
leitura=(inportb (base+5))*256+inportb (base+4);

valor=(float)leitura;

return (valor);
}

*****

//PROGRAMA DE CONTROLE DO MANCAL MAGNÉTICO
//PROJETO DE FORMATURA
//BOLSISTA: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA
//ORIENTADOR: PROF.DR.OSWALDO HORIKAWA

//ARQUIVO QUE CONTÉM A SUBROTINA QUE APRESENTA NA TELA UMA INTERFACE
//PARA O USUÁRIO DEFINIR OS PARÂMETROS DE CONTROLE

//NOME DO PROGRAMA: TELA.C

void tela ()
{
int gdriver = DETECT, gmode, errorcode;
float central;

initgraph (&gdriver,&gmode,"");
errorcode=graphresult ();
if (errorcode!=grOk)
{
printf ("Erro grafico: %s\n",grapherrormsg(errorcode)) ;
printf ("Pressione qualquer tecla para sair");
getch();
exit (1);
}
central= (getmaxx()-250)/2;

setbkcolor (14);

settextstyle (10,0,2);
setcolor (1);
```

```

outtextxy (central-13,10, "CONTROLE DIGITAL DO MANCAL MAGNÉTICO");
outtextxy (central,30,"PROJETO DE INICIACAO CIENTIFICA");
outtextxy (central-14,50,"BOLSISTA: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA");
outtextxy (central-20,70,"ORIENTADOR: PROF. DR. OSWALDO HORIKAWA");

setcolor (3);

outtextxy (30,210,"DIGITE: ");
outtextxy (30,260,"PERIODO DE AMOSTRAGEM:  ");
gotoxy (32,17);
scanf ("%f",&periodo_de_amostragem);
outtextxy (30,292,"CONSTANTE DO PROPORCIONAL:  ");
gotoxy (32,19);
scanf ("%f",&constante_proporcional);
outtextxy (30,325,"CONSTANTE DO DERIVATIVO:  ");
gotoxy (32,21);
scanf ("%f",&constante_derivada);
outtextxy (30,355,"CONSTANTE DO INTEGRADOR:  ");
gotoxy (32,23);
scanf ("%f",&constante_integrador);

setcolor (5);

outtextxy (30,450,"PRESSIONE QUALQUER TECLA PARA INICIAR O
CONTROLE.....");
}

*****
//PROGRAMA DE CONTROLE DO MANCAL MAGNÉTICO
//PROJETO DE FORMATURA
//BOLSISTA: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA
//ORIENTADOR: PROF.DR.OSWALDO HORIKAWA

//ARQUIVO QUE CONTÉM O PROGRAMA PRINCIPAL PARA LEITURA DE UM CANAL

/*PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS VIA POLLING USANDO PACER TRIGGER
- PLACA A826PG.O JP 5 DEVE ESTAR CONECTADO COMO TRIGGER INTERNO

```

```
/*ESSE PROGRAMA SE ENCONTRA NO pronovo.PRJ*/

#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include <conio.h>

#define base 0x220
#define MAX 2500

#include "lesensor.c"
#include "converte.c"
#include "inicia.c"
#include "arquivo.c"
#include "saida_p.c"

#include "A826.h"

void main ()
{

    int i;
    long int k,conta,1,limite;
    float sensor1[MAX], periodo_de_amostragem,rate1=4095.0/10.0;
    float c1,c2,c3,c4,c5,c6,saida_ant_2;
    float sk,sk_1,sk_2,errok,errok_1,errok_2,referencia,saida_DA;
    float a,b,c,C1,C2,C3,C4,C5;
    float P,D,I,T,TAU,A,B;
    clrscr ();

    for (k=0;k<MAX;k++)
    {
        sensor1[k]=0.0;
    }
}
```

```
conta=0;
k=0;
l=0;
errok_1=0;
errok_2=0;
sk_1=0;
sk_2=0;

periodo_de_amostragem=1.0/5000.0;

referencia=0.0;

a=257.5;
b=522.8;
c=265.385;

P=10.0;
D=0.035;
I=600.0;
T=1.0/5000.0;
TAU=1.0/(30000.0);

printf ("\n P = ");
scanf ("%f",&P);
printf ("\n D = ");
scanf ("%f",&D);
printf ("\n I = ");
scanf ("%f",&I);
printf ("\n TAU = ");
scanf ("%f",&TAU);

A=P*TAU+D;
B=P+I*TAU;

c1=4*A+2*B*T+I*T*T;
c2=2*I*T*T-8*A ;
c3=4*A-2*B*T+I*T*T;
c4=4*TAU+2*T;
```

```
c5=-8*TAU;
c6=4*TAU-2*T;

C1=c1/c4;
printf ("\n %f",C1);
C2=c2/c4;
printf ("\n %f",C2);
C3=c3/c4;
printf ("\n %f",C3);
C4=c5/c4;
printf ("\n %f",C4);
C5=c6/c4;
printf ("\n %f",C5);

getch ();

//constante1=0.2029/(2*periodo_de_amostragem);
//printf ("\n A= %f",constante1);
//constante2=0.4120/(2*periodo_de_amostragem);
//printf ("\n B= %f",constante2);
//constante3=0.2091/(2*periodo_de_amostragem);
//printf ("\n C= %f",constante3);
//constante4=1.0;

inicializa_placa ();

//leitura do canal 0

for (k=0;k<2;k++)
{
    outportb (base+10,0);
    sensor1[k]=ler_sensor();
}

k=0;
outportb (base+10,0);

do {
```



```
k++;
l++;
conta++;

sensor1[k]=ler_sensor();
sensor1[k]=converte_AD (sensor1[k]);

//////////CONTROLE//////////

errok=(referencia-sensor1[k]);

sk=C1*errok+C2*errok_1+C3*errok_2-C4*sk_1-C5*sk_2;

errok_2=errok_1;
errok_1=errok;
sk_2=sk_1;
sk_1=sk;

saida_DA=sk;

saida_DA=saida_conv (saida_DA);

A826_DA (0,saida_DA*rate1);
referencia=0.0;
if(l>400000)
    referencia=0.4;
//if (l>102000)
    // l=98000;

if (k==(MAX-1))
    k=-1;
if (conta==399000)
    k=-1;
limite=399000+MAX;
}
while (!kbhit() && (conta<limite));
```

```
armazena_em_arquivo (sensor1,1);  
}
```

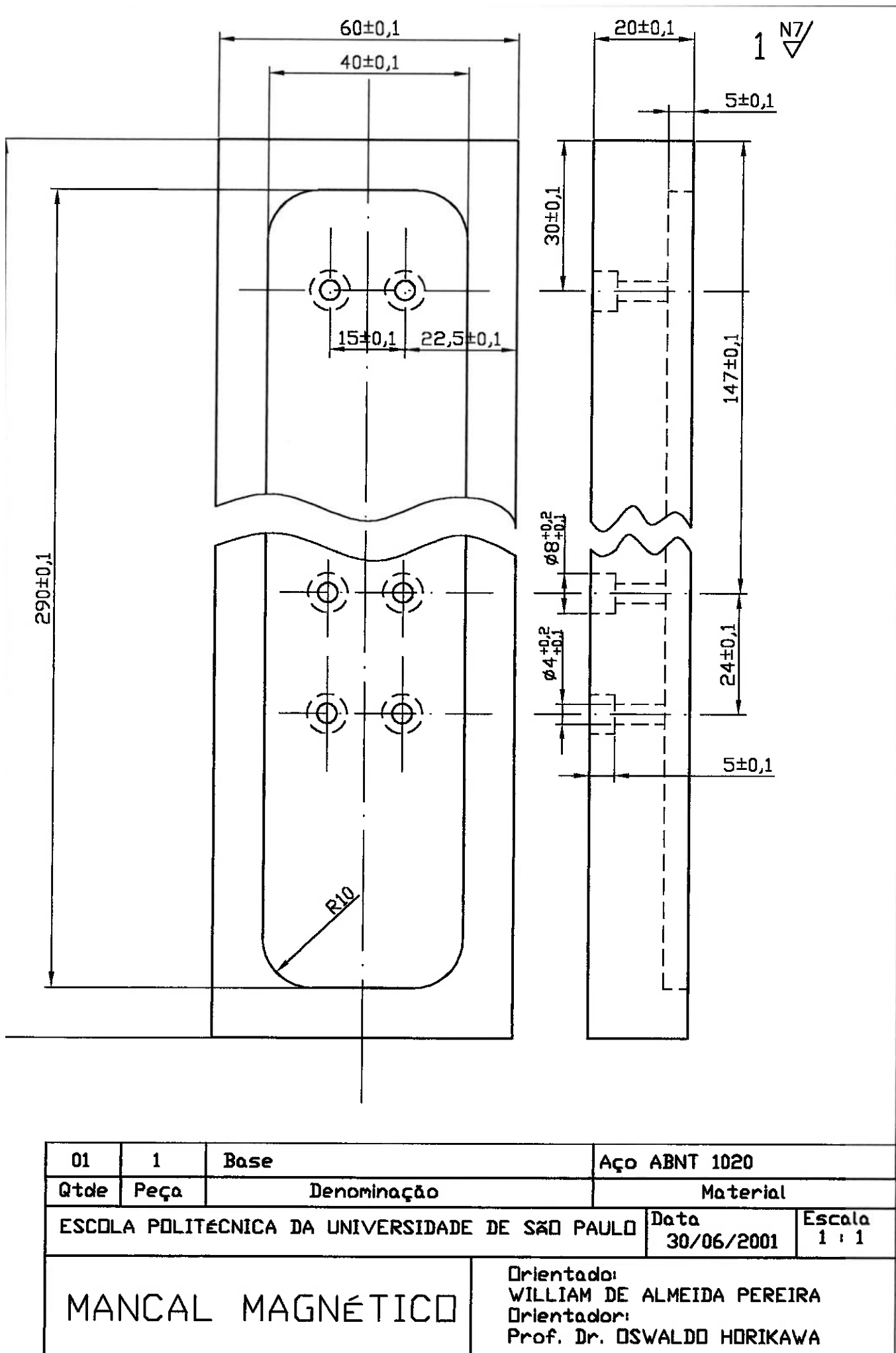
O programa utilizado no MATLAB para obter o controlador digital está apresentado a seguir.

```
ka=10;  
ks=5e3;  
L=0.2176;  
R=19;  
kem=2.45;  
km=11.6*1000;  
M=0.84;
```

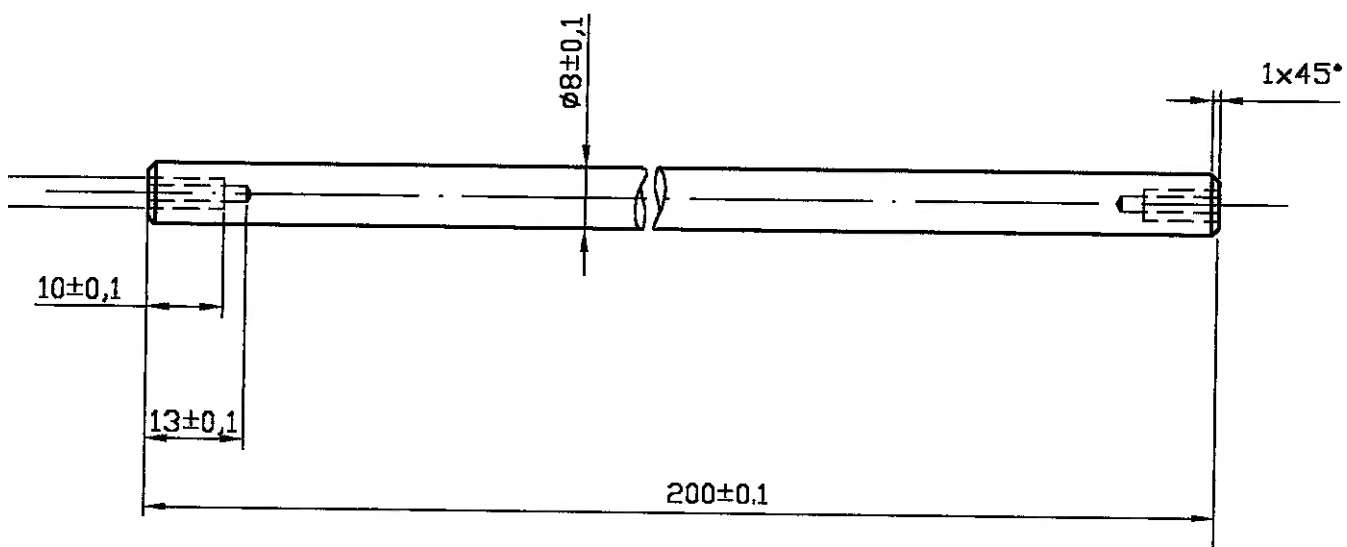
```
P=6;  
I=100;  
D=0.2;  
TAU=1/16000;  
T=1/5000;
```

```
NUM=[ P*TAU+D P+I*TAU I];  
DEN=[TAU 1 0];
```

```
[numz,denz]=c2dm(NUM,DEN,T,'zoh');  
[numaz,denaz]=c2dm(NUM,DEN,T,'tustin');
```

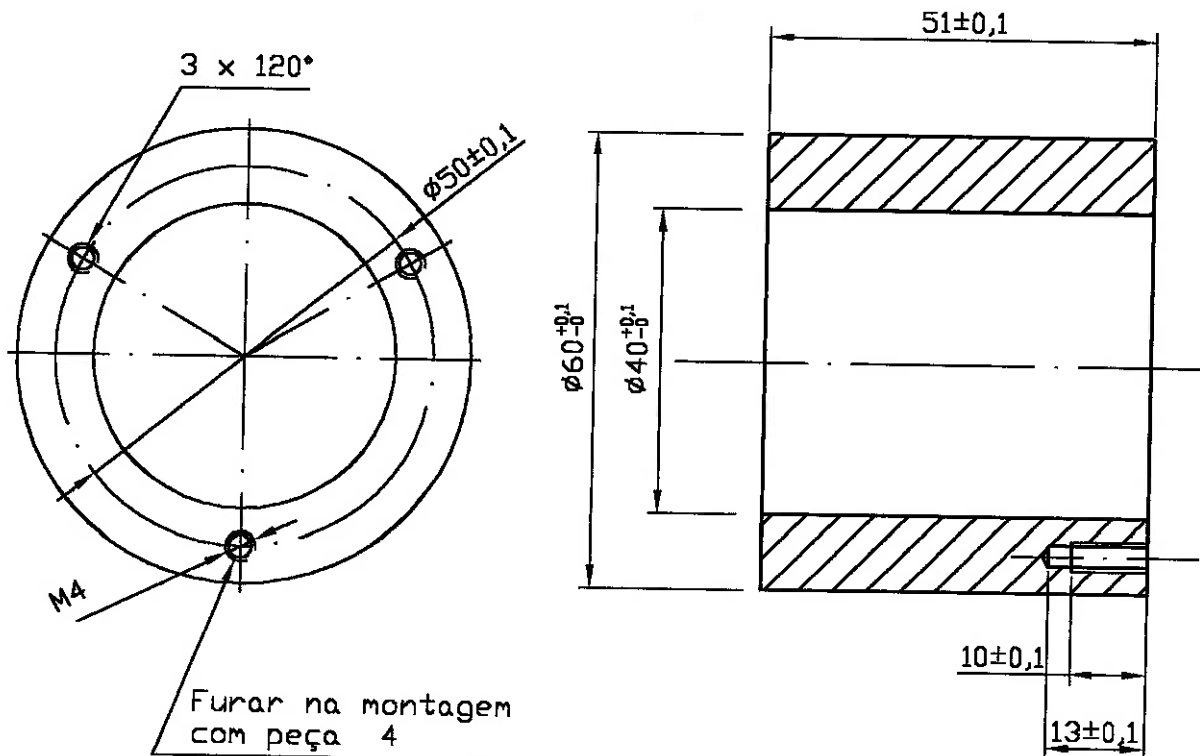


2<sup>N7</sup>✓



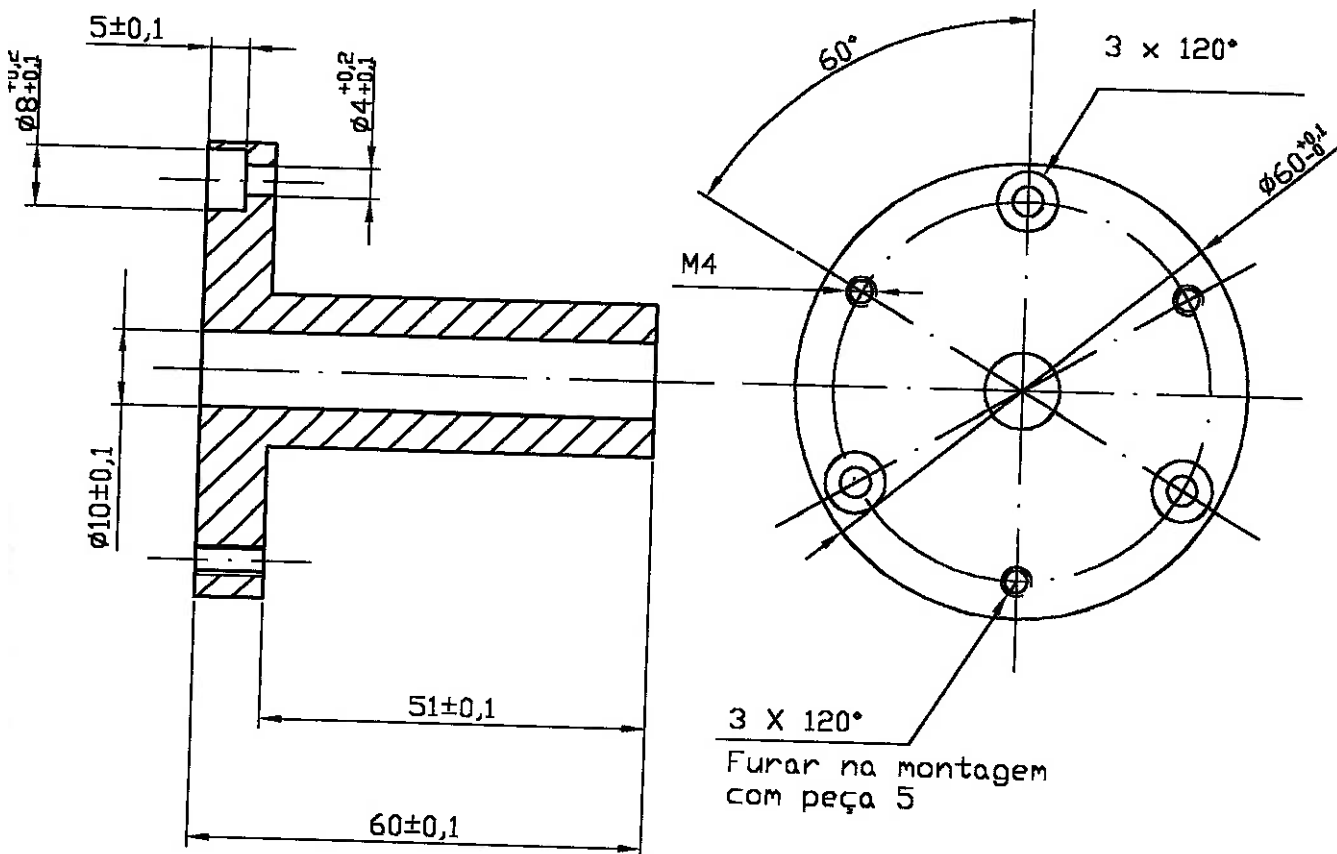
01	2	Rotor	Alumínio
Qtde	Peça	Denominação	Material
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO			Data 30/06/2001
			Escala 1 : 1
MANCAL MAGNÉTICO		Orientado: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA Orientador: Prof. Dr. OSWALDO HORIKAWA	

3<sup>N7</sup>/



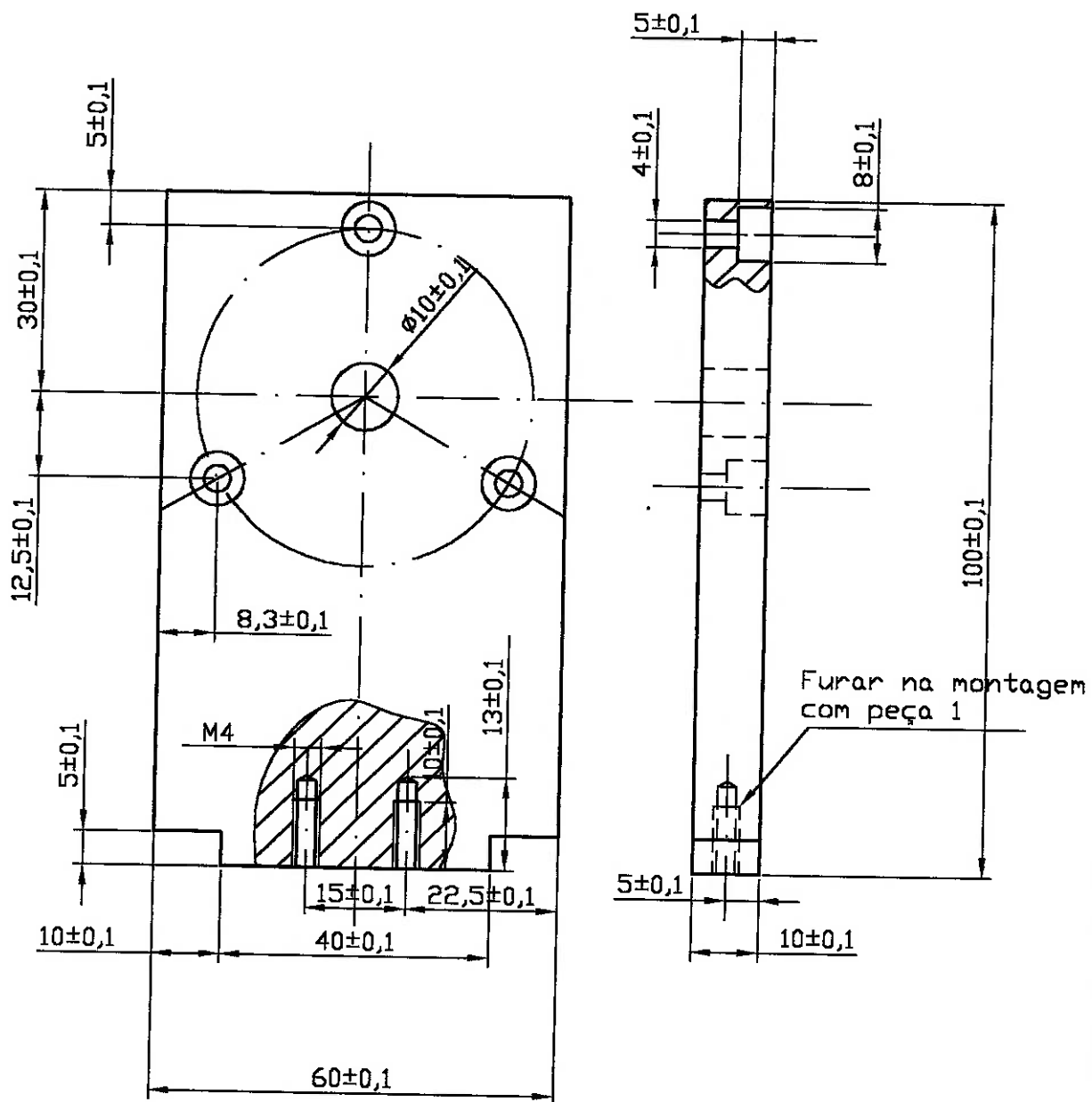
02	3	Capa do eletroímã	Aço ABNT 1020
Qtde	Peça	Denominação	Material
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO			Data
			30/06/2001
			Escala
			1 : 1
MANCAL MAGNÉTICO		Orientador: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA Orientador: Prof. Dr. OSWALDO HORIKAWA	

4  $\nabla$  N7/



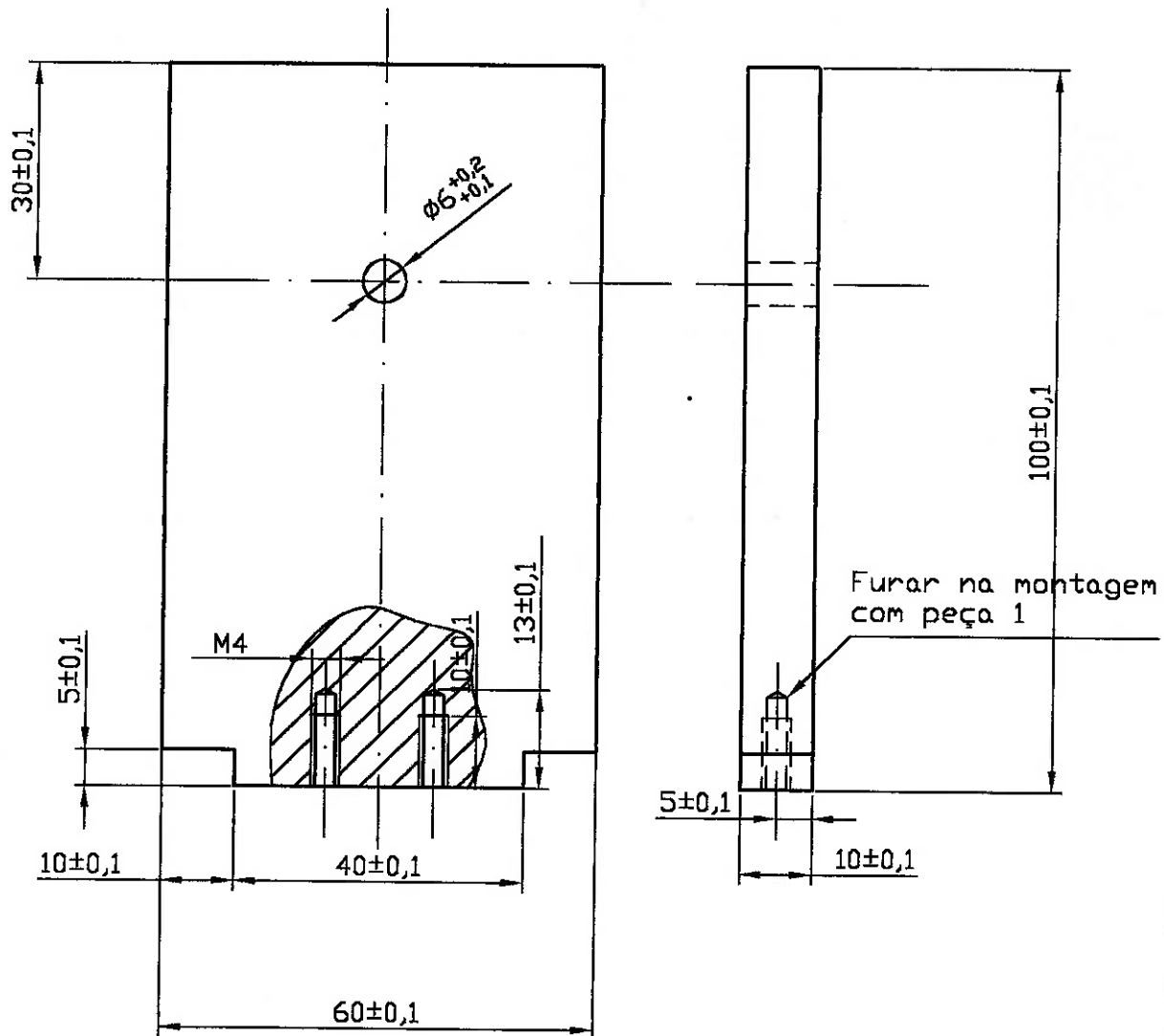
02	4	Interno do eletroímã	Aço ABNT 1020
Qtde	Peça	Denominação	Material
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO			Data
			30/06/2001
			Escala
			1 : 1
MANCAL MAGNÉTICO		Orientado: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA Orientador: Prof. Dr. OSWALDO HORIKAWA	

5<sup>N7</sup>✓



02	5	Suporte do eletroímã	Aço ABNT 1020
Qtde	Peça	Denominação	Material
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO			Data
			30/06/2001
			Escala
			1 : 1
MANCAL MAGNÉTICO		Orientado: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA Orientador: Prof. Dr. OSWALDO HORIKAWA	

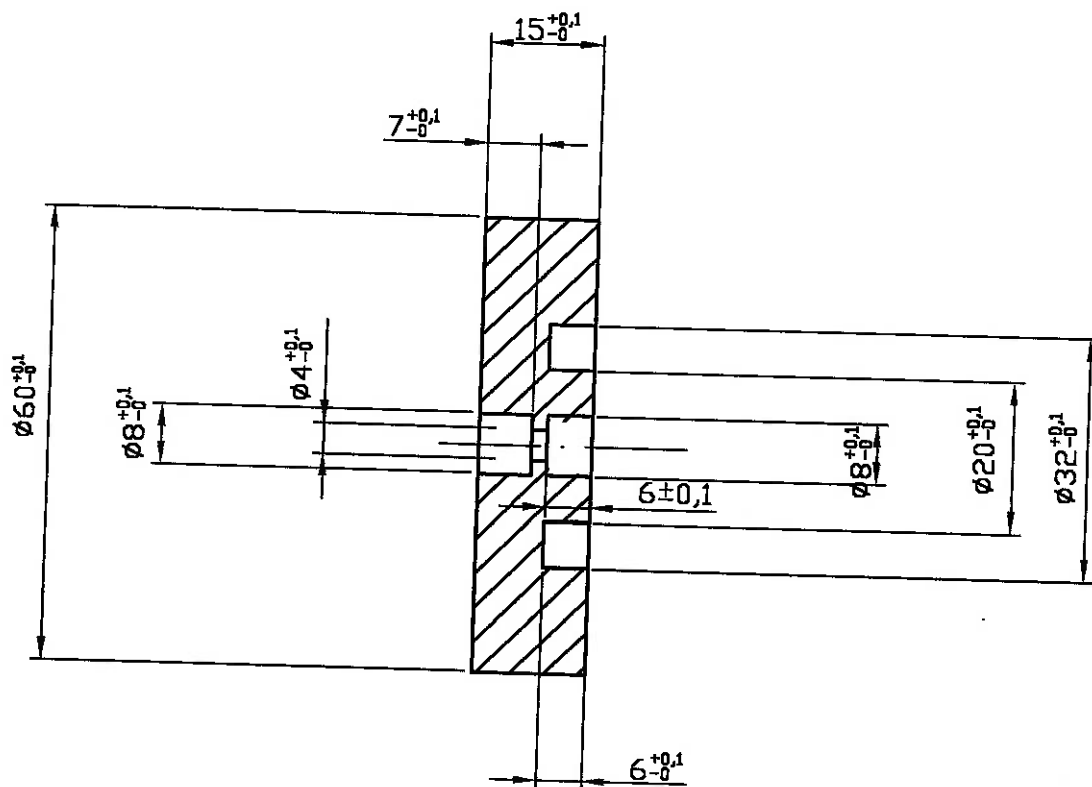
6<sup>N7</sup>✓



01	6	Suporte do sensor	Aço ABNT 1020
Qtde	Peça	Denominação	Material
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO			Data 30/06/2001
			Escala 1 : 1
MANCAL MAGNÉTICO		Orientado: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA Orientador: Prof. Dr. OSWALDO HORIKAWA	



7  $\nabla$



02	7	Ponta do rotor	Aço ABNT 1020
Qtde	Peça	Denominação	Material
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO			Data
			30/06/2001
			Escala
			1 : 1
MANCAL MAGNÉTICO		Orientador: WILLIAM DE ALMEIDA PEREIRA Orientador: Prof. Dr. OSWALDO HORIKAWA	