

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO, SIMULAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UM MANCAL MAGNÉTICO  
UTILIZANDO PID E PWM**

Guilherme Peresi

Orientador: Prof. Dr. Edilson Hiroshi Tamai

São Paulo

2009

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO, SIMULAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UM MANCAL MAGNÉTICO  
UTILIZANDO PID E PWM**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
Obtenção do título de Graduação em Engenharia

Guilherme Peresi

Orientador: Prof. Dr. Edilson Hiroshi Tamai

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

São Paulo

2009

Dedico esse trabalho aos meus pais, que tanto me apoiaram ao longo do desenvolvimento.

## **Agradecimentos**

Agradeço ao professor Tamai, pelo apoio dado a esse projeto e pelas muitas conversas esclarecedoras sobre o tema.

Aos meus colegas de curso, especialmente Cláudio Sakai Koseki, Julio Cesar Nishida, Enio de Almeida Soares, pelos dias de estudo e amizade.

Aos meus pais que tanto me apóiam em todas as situações.

À Natália Bernardi Ghisi, pelo carinho, afeto e companheirismo dado.

## **Resumo**

O presente trabalho mostra o estudo, a simulação e a construção de um mancal magnético radial ativo controlado por PID. O equipamento montado consiste em um mancal magnético para levitação de um anel e controlado por um microcontrolador PIC 16f877A.

Foi modelado um eixo rígido suspenso por um mancal magnético radial ativo, considerando sua dinâmica na direção radial e a atuação de forças externas ao sistema. Um controle PID é projetado a partir da linearização do sistema por expansão em série de Taylor.

Realizam-se simulações sem controle para demonstrar a instabilidade do sistema e a necessidade de controle em sua aplicação. Realizam-se simulações com a atuação do controle PID para gerar respostas do sistema e determinar os parâmetros de controle.

Sistemas eletrônicos analógicos e digitais são projetados para a aplicação do controle e um protótipo é construído para os testes do sistema de controle e da eletrônica projetada.

## **ABSTRACT**

In this work, we present the study, simulation and construction of an active magnetic-bearing .controlled by PID. The equipament consists of a magnetic-bearing for levitation of a steel ring, and it is controlled by a microcontroller PIC 16F877A.

We construct a hard axis suspended by an active radial magnetic-bearing. We consider its dynamics in the radial direction and the external force acting on the system. We designed a PID control using a linearization of the system by expanding the Taylor series.

We use simulation without control to prove the instability of the system and the necessity of the control in its application. We determine the control parameters.

We project analog and digital electronic systems for application in the control of the prototype. We construct a prototype to verify the control system and the electronic.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

|                                                              |                               |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                         | <b>1</b>                      |
| <b>2. OBJETIVOS</b>                                          | <b>6</b>                      |
| <b>3. PROJETO DO MANCAL MAGNÉTICO</b>                        | <b>7</b>                      |
| 3.1 Modelo matemático do eixo e do rotor a serem levitados   | 7                             |
| 3.2 Modelo do eletroímã                                      | 9                             |
| 3.3 Seleção do fio da bobina                                 | 13                            |
| 3.4 Dimensionamento do rotor                                 | 13                            |
| 3.5 Dimensionamento do eletroímã                             | 14                            |
| 3.6 Equacionamento da planta a ser controlada                | 16                            |
| 3.7 Linearização do modelo                                   | 18                            |
| 3.8 Modelo linearizado e obtenção da função de transferência | 19                            |
| <b>4. PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE</b>                     | <b>21</b>                     |
| 4.1 Controlador PID                                          | 21                            |
| 4.2 Controlabilidade e observabilidade do sistema            | 23                            |
| 4.3 Determinação das constantes de controle                  | 23                            |
| 4.4 Simulação do modelo de controle                          | Erro! Indicador não definido. |
| <b>5. SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL</b>                        | <b>24</b>                     |
| 5.1 Microcontrolador PIC                                     | 24                            |
| 5.2 Sensor selecionado                                       | 24                            |
| 5.3 Modelo do PID aplicado                                   | 24                            |
| 5.4 Programação do PIC                                       | 24                            |
| <b>6. SISTEMAS ELETRÔNICOS</b>                               | <b>26</b>                     |
| 6.1 Entradas analógicas                                      | 26                            |
| 6.2 Entradas digitais                                        | 26                            |
| 6.3 Eletrônica de potência                                   | 27                            |
| 6.4 Saídas utilizadas para verificação do programa           | 27                            |

|            |                                                                             |           |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6.5</b> | <b>Alimentação do sistema</b>                                               | <b>27</b> |
| <b>7.</b>  | <b>MODELO EXPERIMENTAL</b>                                                  | <b>28</b> |
| <b>8.</b>  | <b>CONCLUSÃO</b>                                                            | <b>29</b> |
| <b>9.</b>  | <b>BIBLIOGRAFIA</b>                                                         | <b>30</b> |
| <b>10.</b> | <b>ANEXOS</b>                                                               | <b>31</b> |
|            | <b>Anexo A: Tabela AWG de fios de cobre esmaltados.</b>                     | <b>31</b> |
|            | <b>Anexo B: Programa de cálculo das propriedades e simulação do modelo.</b> | <b>32</b> |
|            | <b>ANEXO C: Programa em assembly para controle do mancal magnético</b>      | <b>38</b> |

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de campos magnéticos de um fio (à esquerda) e de um solenóide, à direita.

Figura 2. Exemplo de campo magnético em um mancal magnético.

Figura 3. Exemplos de PWM.

Figura 4. Desenho do mancal com sistema de coordenadas.

Figura 5. Exemplo de eletroímã em U.

Figura 6. Circuito elétrico análogo a um eletroímã em forma de U.

Figura 7. Exemplo de fluxo magnético.

Figura: 8: Anel ferromagnético e cubo construídos.

Figura 9: Mancal magnético construído.

Figura 10. Modelo de um eletroímã.

Figura 11: Circuito de entrada analógica via potenciômetro.

Figura 12: Mancal montado

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões do anel ferromagnético e do eixo.

Tabela 2: Dimensões escolhidas para os eletroímãs

$\theta$  é o ângulo formado entre os eixos OX e Ox, no plano xy

$\psi$  é o ângulo formado entre o eixo OZ e o plano xy, no plano xy

$\dot{\theta}$  é a velocidade de rotação em torno de Z.

$\dot{\psi}$  é a velocidade de rotação em torno de Y.

$\omega$  é a velocidade de rotação em torno do eixo x

$M$  = Massa do anel ferro magnético

$m$  = Massa o eixo de alumínio

$$g = 9,8 m/s^2$$

$x_g$  = Posição do centro de massa

$R$  = relutância magnética

$N$  = número de espiras

$i$  = corrente elétrica

$\phi$  = fluxo magnético

$l$  = comprimento de material magnético

$\mu_m$  = permeabilidade magnética do material

$a$  = área transversal do núcleo

$g$  = espaçamento entre o eletroímã e o material magnético (airgap)

$\mu_0$  = permeabilidade magnética do vácuo ( $1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ Tesla.m/A}$ )

$L$  = indutância magnética

$B$  = densidade do fluxo magnético

$x_g$  = posição do centro de massa do rotor

$M_g$  = massa total do rotor

$x_d$  = posição do centro de massa do disco de alumínio

$V_d$  = volume do disco de alumínio

$\rho_{al} = 2.8 \text{ g/cm}^3$  densidade do alumínio

$M$  = massa do anel ferromagnético

$x_e$  = posição do centro de massa do eixo de alumínio

$V_e$  = volume do eixo de alumínio

$Mom_g$  = momento devido ao peso próprio

$x_{mag} = 2.l + c = 0,22m$ , local onde pode ser alocada a resultante da força

$F_{mag}$  = força magnética



## 1. INTRODUÇÃO

Mancais magnéticos possuem diversas vantagens em relação aos mancais convencionais, de deslizamento e rolamento. Como o eixo não possui contato mecânico com a base fixa, não há perdas e desgastes por atrito mecânico. Esta redução no atrito ocasiona uma menor frequência na manutenção, e aumento da vida útil do mancal.

A operação dos mancais magnéticos é mais complicada em relação aos outros tipos de mancais, pois são intrinsecamente instáveis e é necessário um controle em malha fechada para estabilizar o sistema. Por sua vez, um sistema de controle de malha fechada é vantajoso porque permite que o comportamento dinâmico do mancal seja determinado através dos ganhos de controle e suas estratégias, permitindo assim uma adequação do sistema à sua aplicação.

Existem dois tipos de mancais magnéticos: os ativos, que utilizam eletroímãs, e os passivos, que utilizam ímãs permanentes para gerar a flutuação magnética.

Os mancais magnéticos passivos são sistemas de malha aberta e não permitem a aplicação de um controle. Portanto, esses tipos de dispositivos não serão estudados no presente trabalho.

Os mancais magnéticos ativos funcionam a partir da atração do material ferromagnético por um eletroímã. Tal força equilibra forças externas aplicadas ao eixo e permite o controle de sua posição e das respostas dinâmicas do sistema, controlando a força magnética através da variação da corrente e da voltagem na bobina.

Um eletroímã é composto por uma bobina e um núcleo de material ferromagnético.

A bobina é, em geral, composta por um fio de cobre esmaltado enrolado em volta do núcleo ferromagnético. Quando uma tensão é aplicada no fio, uma corrente elétrica passa pelo fio gerando um campo magnético.

O núcleo ferromagnético é, na maioria dos casos, composto por sobreposição de placas ferromagnéticas e um material não magnético entre elas, para que o campo magnético gerado pela bobina seja o mais linear, paralelo e próximo do teórico possível. O formato do núcleo determina como serão as correntes do campo magnético dentro e fora do eletroímã. Como exemplo, alguns campos magnéticos são mostrados nas fig. (1) e fig. (2).

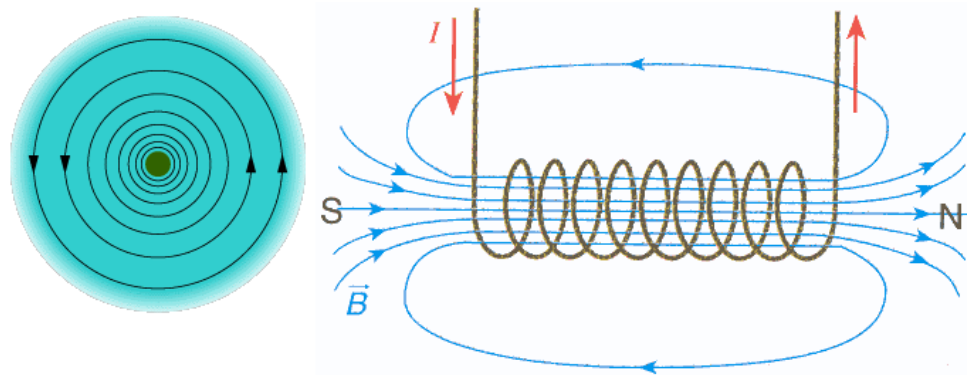


Figura 1: Exemplos de campos magnéticos de um fio (à esquerda) e de um solenóide, à direita.

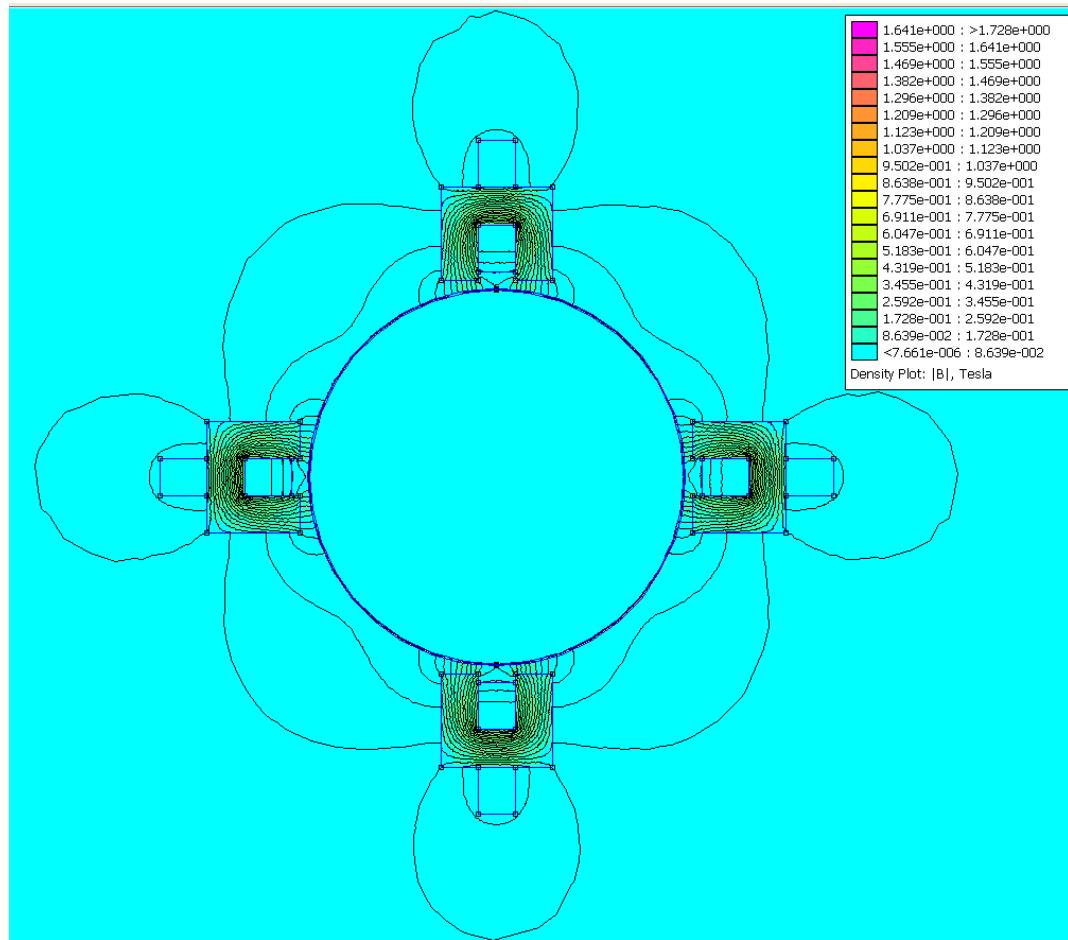


Figura 2: Exemplo de campo magnético em um mancal magnético radial.

A maneira tradicional de se controlar a potência de uma carga é dissipando a energia do circuito através de resistências ou reostatos. Porém, com esse método, não se consegue um controle linear da potência e há uma grande quantidade de calor gerado. A solução é utilizar um complexo circuito analógico ou um circuito digital de controle.

Para que um circuito digital controle um circuito analógico de potência, há basicamente duas técnicas: a conversão digital/analógica ou a modulação por largura de pulso (PWM).

O PWM consiste em gerar pulsos quadrados que, em média, geram uma porcentagem da potência total, relacionando o tempo em que o pulso fica aberto e o tempo que fica fechado como mostrado na figura 3. A grande vantagem do PWM é que utiliza apenas um bit para o controle da potência.

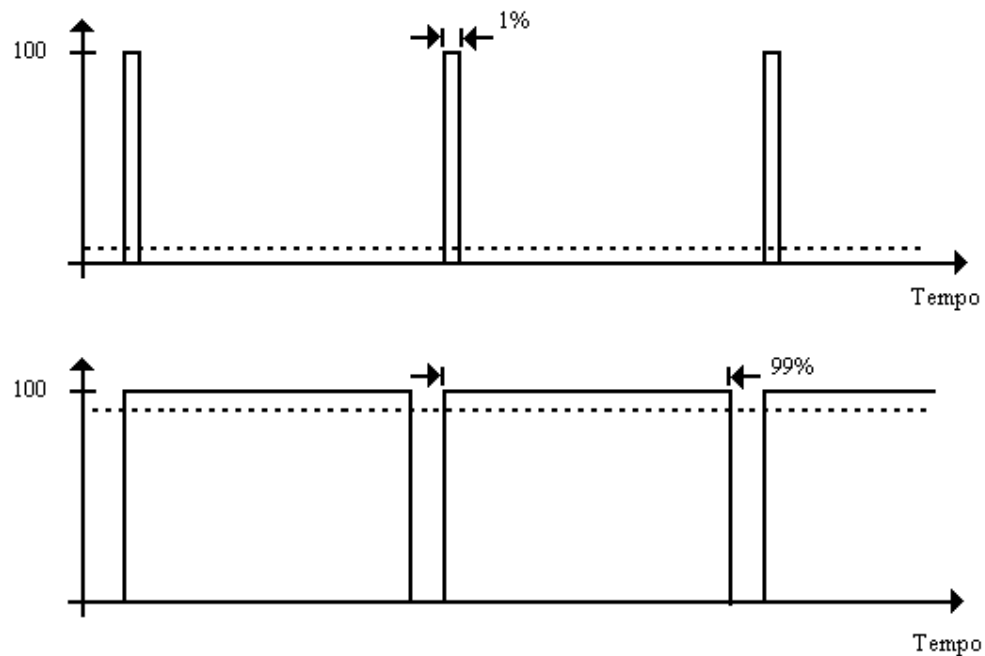


Figura 3: Exemplos de PWM.

O primeiro gráfico da fig. (3) representa um pulso que gera uma potência média de 1% da potência total disponível. Já o segundo gráfico representa um pulso que gera uma potência média de 99% da potência total disponível.

O PWM é largamente utilizado para transmitir dados em telecomunicações e para controle de velocidade de motores elétricos, entre outros. No caso estudado, o PWM irá controlar a potência média dos eletroímãs, utilizando um transistor de potência para o chaveamento do sinal e a amplificação do mesmo.

Utilizando o PWM, a quantidade de calor gerada é pequena, muito menor que nos casos tradicionais. Isso ocorre porque na condição em aberto, nenhuma corrente circula pelo transistor de potência, sendo a dissipação de calor nula. Já na condição fechado, idealmente ele apresenta uma queda de tensão nula, o que causa dissipação nula. Naturalmente, em um sistema real há dissipação de calor, porém ela é pequena, tornando assim o PWM ainda mais interessante.

As principais áreas de conhecimento envolvidas na elaboração desse trabalho são:

- Modelagem de Sistemas Mecânicos
- Controle

- Eletrônica de Potência
- Programação de Micro-Controlador
- Eletromagnetismo

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver um protótipo de um mancal magnético radial ativo, constituído por quatro eletroímãs que irão suportar um eixo preso por uma junta em uma de suas extremidades e um disco de material ferromagnético que será levitado na outra. O controle é implementado utilizando-se um microcontrolador da família PIC, que permita a variação das constantes de controle para estudo do sistema de controle PID.

Com esse trabalho pretende-se estudar o funcionamento de mancal magnético e compreender a atuação de um sistema de controle PID sobre o mesmo.

### 3. PROJETO DO MANCAL MAGNÉTICO

#### 3.1 Modelo matemático do eixo e do rotor a serem levitados

O modelo matemático é construído a partir da aplicação do teorema do momento angular (TMA) no sistema descrito abaixo utilizando o sistema de eixos  $xyz$  com pólo no ponto  $O$ , ponto de origem dos sistemas de coordenadas. O pólo  $O$  foi escolhido a fim de simplificar as equações, uma vez que ele é uma referência imóvel.

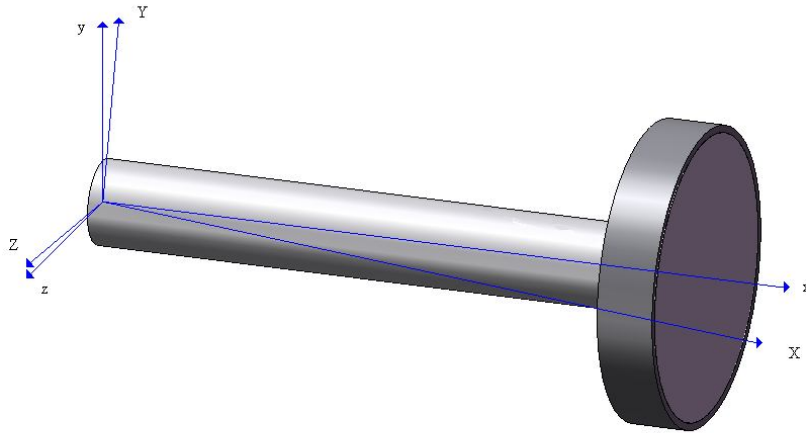


Figura 4: Desenho do mancal com sistema de coordenadas.

O sistema de eixos  $OXYZ$  é um sistema fixo e será utilizado como referência, como mostrado na fig. (4).

O eixo  $Ox$  está fixado no centro do rotor e move-se com ele. Os eixos  $Ou$  e  $Oz$  são paralelos entre si e ao eixo  $Ox$ .

$\theta$  é o ângulo formado entre os eixos  $OX$  e  $Ox$ , no plano  $xy$

$\psi$  é o ângulo formado entre o eixo  $OZ$  e o plano  $xy$ , no plano  $xy$

$\dot{\theta}$  é a velocidade de rotação em torno de  $Z$ .

$\dot{\psi}$  é a velocidade de rotação em torno de Y.

$\omega$  é a velocidade de rotação em torno do eixo x

Podemos perceber pela figura 4 que o corpo exibe axi-simetria de distribuição de massa em torno de seu eixo próprio Ox, sendo este um eixo principal de inércia. Dessa forma, a matriz de inércia é invariante com respeito ao sistema Oxyz, os produtos de inércia são nulos e os momentos de inércia  $J_y$  e  $J_z$  são iguais.

$$J_y = J_z = J \quad (1)$$

O momento angular do sistema da figura 4 pode ser expresso como:

$$\vec{H}_o = [\vec{i} \quad \vec{j} \quad \vec{k}] \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega + \dot{\psi} \cdot \sin \theta + \dot{\theta} \cdot \sin \psi \\ \dot{\psi} \cdot \cos \theta \\ \dot{\theta} \cdot \cos \psi \end{Bmatrix} \quad (2)$$

O momento da força externa que age no sistema é causado pelo peso próprio do eixo e pelas forças dos atuadores magnéticos. A princípio, as forças dos atuadores magnéticos não serão consideradas, pois será estudado nesta etapa apenas o sistema sem controle.

Derivando  $\vec{H}_o$  e aplicando o TMA ao sistema,  $\dot{\vec{H}}_o = \vec{M}_o$ , temos:

Na direção  $\vec{i}$  :

$$\ddot{\psi} \cdot \theta + \ddot{\theta} \cdot \psi + \dot{\psi} \cdot \dot{\theta} = 0 \quad (3)$$

Na direção  $\vec{j}$  :

$$\ddot{\psi} \cdot J - \dot{\psi} \cdot \dot{\theta} \cdot J + \omega \cdot J_x \cdot \dot{\theta} + [\dot{\psi} \cdot \dot{\theta} + \dot{\theta}^2 \cdot \psi] (J_x - J) = 0 \quad (4)$$

Na direção  $\vec{k}$  :

$$\ddot{\theta} \cdot J - \dot{\theta} \cdot \dot{\psi} \cdot J - \omega \cdot \dot{\psi} \cdot J_x + [\dot{\psi}^2 \cdot \theta + \dot{\theta} \cdot \dot{\psi} \cdot \psi] (J - J_x) = -(M + m) \cdot g \cdot \theta \cdot x_g \quad (5)$$

Onde:

$M$  = Massa do anel ferro magnético

$m$  = Massa o eixo de alumínio

$$g = 9,8 m/s^2$$

$x_g$  = Posição do centro de massa

Para facilitar a simulação, uma mudança de variáveis foi executada.

$$\dot{\psi} = X_1$$

$$\psi = X_2$$

$$\dot{\theta} = X_3$$

$$\theta = X_4$$

Efetuada a mudança nas equações acima, chegamos a:

$$\dot{X}_1 = X_1 \cdot X_3 X_4 - \omega \cdot X_3 \cdot \frac{J_x}{J} - X_3^2 \cdot X_2 \left( \frac{J_x - J}{J} \right) - X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot \left( \frac{J_x - J}{J} \right) \quad (6)$$

$$\dot{X}_3 = X_3 \cdot X_1 X_2 + \omega \cdot X_1 \cdot \frac{J_x}{J} - X_1^2 \cdot X_4 \left( \frac{J - J_x}{J} \right) - X_3 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \left( \frac{J - J_x}{J} \right) - (M + m) \cdot g \cdot X_4 \cdot X_g \quad (7)$$

### 3.2 Modelo do eletroímã

O eletroímã escolhido é do tipo em U mostrado na fig. (5), devido ao formato simples dessa configuração.

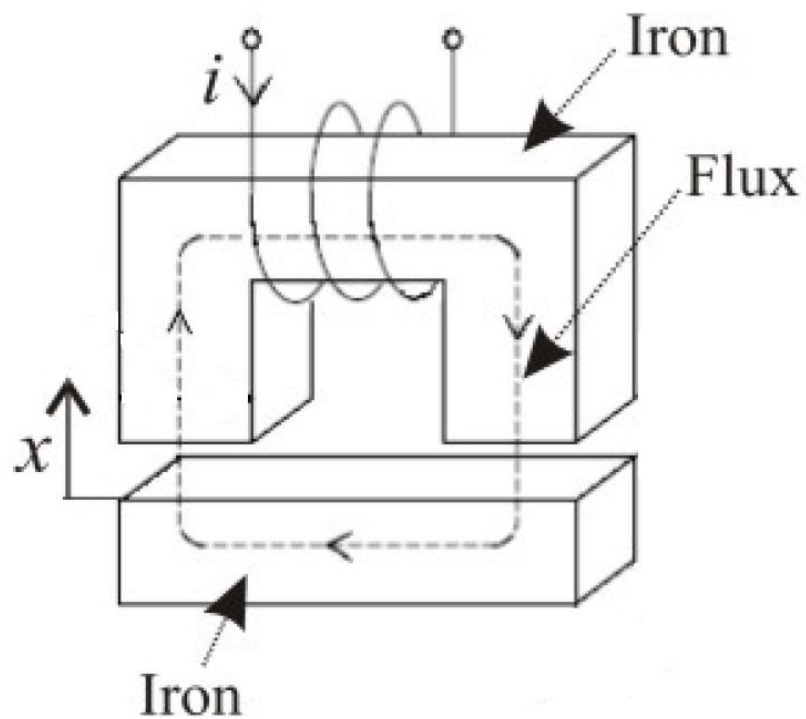


Figura 5: Exemplo de eletroímã em U.

Esse tipo de eletroímã pode ser equacionado como o circuito elétrico análogo mostrado na fig. (6).

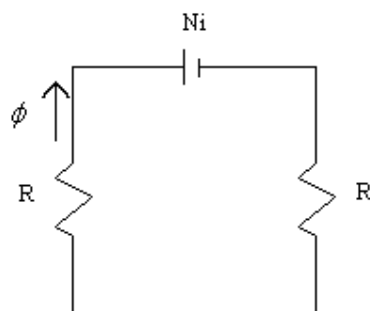


Figura 6: Circuito elétrico análogo a um eletroímã em forma de U.

Onde:

$R$  = relutância magnética

$N$  = número de espiras

$i$  = corrente elétrica

$\phi$  = fluxo magnético

A relutância magnética pode ser escrita da seguinte forma:

$$R = \frac{l}{\mu_m \cdot a} + \frac{2 \cdot g}{\mu_0 \cdot a} \quad (8)$$

Onde:

$l$  = comprimento de material magnético

$\mu_m$  = permeabilidade magnética do material

$a$  = área transversal do núcleo

$g$  = espaçamento entre o eletroímã e o material magnético (airgap)

$\mu_0$  = permeabilidade magnética do vácuo ( $1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ Tesla.m/A}$ )

Não será considerada a relutância magnética do material no dimensionamento do eletroímã porque seu valor é baixo para alterar significativamente a estimativa e, para os aços pesquisados, seu valor não é linear.

Usando a equação do circuito elétrico análogo:

$$\phi = \frac{N \cdot i}{R} \quad (9)$$

Sabendo-se que a força sobre um elemento diferencial de corrente é:

$$d\vec{F} = i \cdot \vec{L} \wedge \vec{B} \quad (10)$$

Onde:

$L$  = indutância magnética

$B$  = densidade do fluxo magnético

Para um meio linear e isotrópico, a equação constitutiva fica:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (11)$$

Portanto, a força pode ser calculada da seguinte forma:

$$F = \frac{N^2 \cdot i^2}{\mu_0 \cdot R^2 \cdot a} \quad (12)$$

Sendo que na configuração utilizada existem 2 airgaps, temos:

$$F = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot \mu_0 \cdot a}{g^2} \quad (13)$$

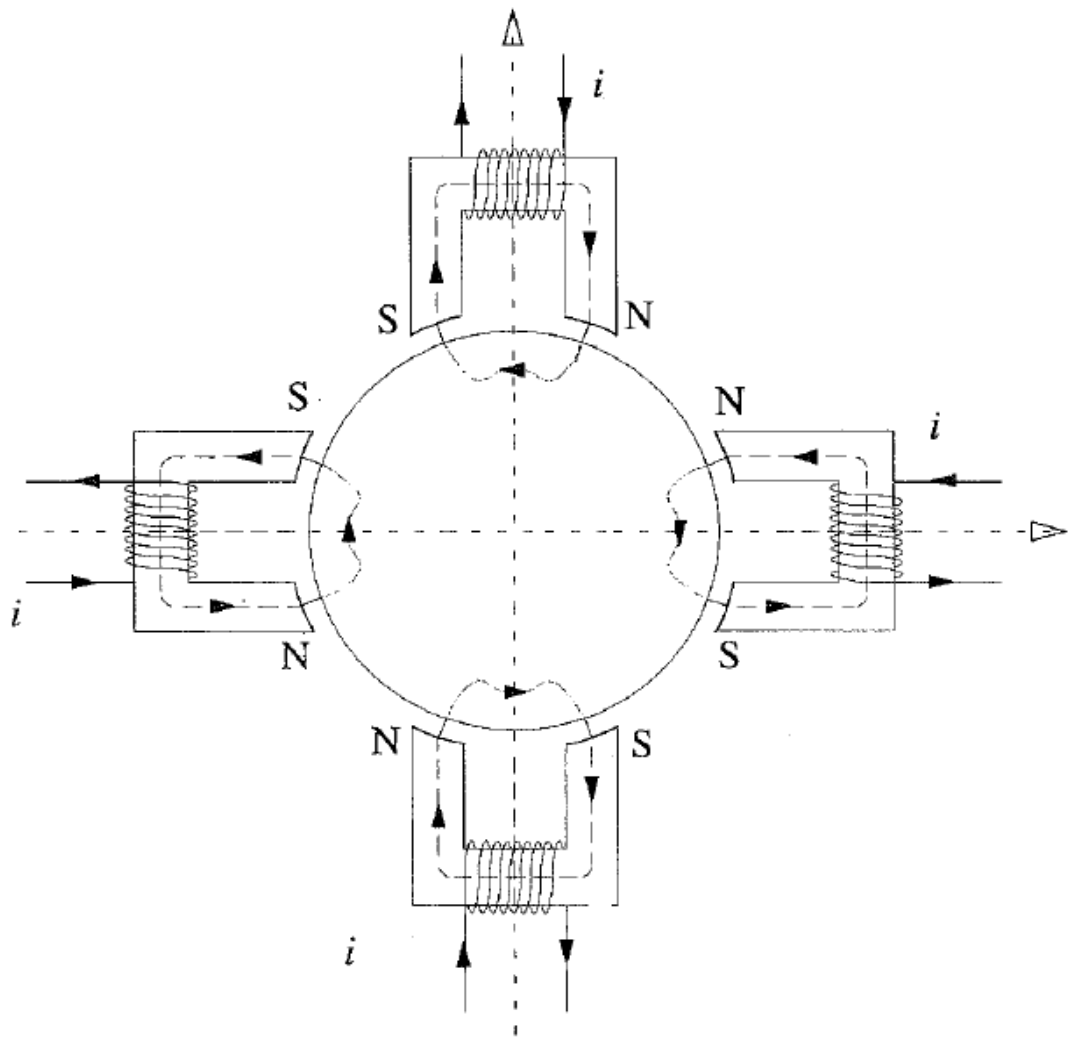


Figura 7: Exemplo de fluxo magnético.

### 3.3 Seleção do fio da bobina

No projeto preliminar do circuito de potência, foi decidido que as potências envolvidas no projeto não poderiam ser muito altas, pois para correntes muito altas o circuito de potência deverá ser mais robusto e, conseqüentemente, mais caro. Como será utilizado uma bateria selada de chumbo 12V 7,2A para a alimentação do projeto, uma amperagem máxima de 2.8A para os eletroímãs foi escolhida. Optou-se pela bateria, porque a sua resposta ao pedido de uma carga é mais rápida que uma fonte comum. Para utilizar uma fonte, é necessário projetar um circuito elétrico que solucionasse esse problema, o que foge do escopo desse trabalho.

Consultando a tabela de fios de cobre esmaltados AWG (anexo 1), foi selecionada a configuração AWG18, que possui como características:

Corrente máxima=2,80A.

Diâmetro do fio esmaltado=1,07mm.

Espiras por centímetro quadrado sem isolamento entre os fios=84,7.

### 3.4 Dimensionamento do rotor

O rotor foi dimensionado para que o sistema possa ficar em uma bancada e o peso do rotor possa ser suportado por um eletroímã de dimensões não muito grandes. Após vários testes de dimensões utilizando o programa do anexo B e a disponibilidade de compra de material, chegou-se às dimensões descritas na tabela 2.

Tabela 1. Dimensões do anel ferromagnético e do eixo.

|                                         |        |
|-----------------------------------------|--------|
| Diâmetro externo do anel ferromagnético | 110 mm |
| Diâmetro interno do anel ferromagnético | 108 mm |
| Diâmetro externo do eixo                | 19 mm  |
| Diâmetro interno do eixo                | 15mm   |

Onde o anel ferromagnético é de aço 1020 e o eixo é de alumínio 6061. Para a junção das duas peças é utilizado um cubo de alumínio 6061 encaixado com ajuste forçado tanto no anel ferromagnético quanto no eixo. O cubo será aliviado para que não haja sobrepeso nos eletroímãs. O peso total do rotor é de 550 gramas.

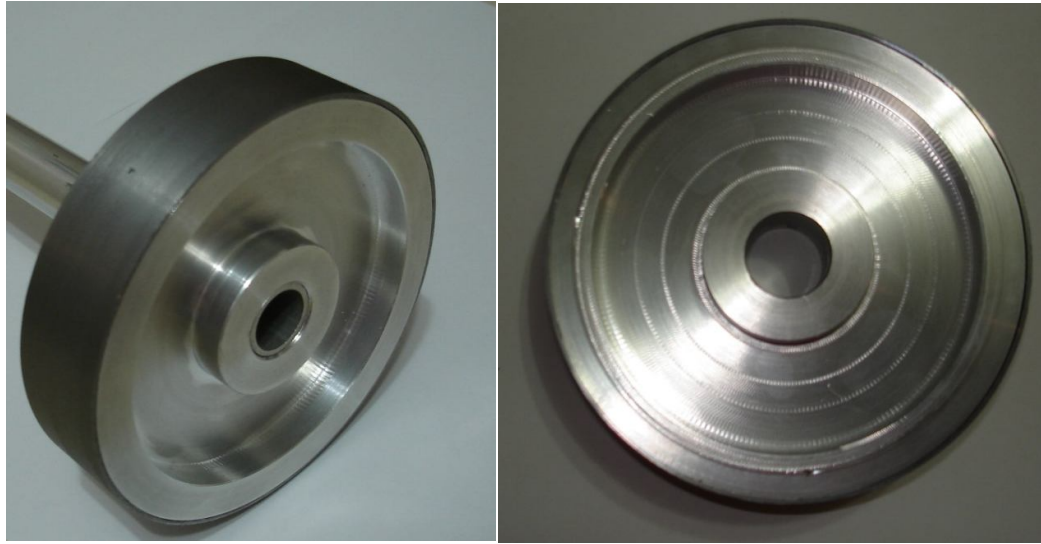


Figura: 8: Anel ferromagnético e cubo construídos.

### 3.5 Dimensionamento do eletroímã

O dimensionamento dos eletroímãs é baseado no eletroímã superior, uma vez que esse é o mais solicitado dos quatro.

O peso próprio do rotor gera um momento que deve ser equilibrado pela força do eletroímã superior. Porém, para que o controle seja possível, o eletroímã deve ter força suficiente para gerar um momento que equilibre o momento o peso próprio do rotor mais uma força que possa agir como controle. Portanto a corrente utilizada nos cálculos desse equilíbrio será máxima ( $i = 2,8A$ ), e será adicionado um coeficiente de segurança.

$$x_g = \frac{x_d \cdot (V_d \cdot \rho_{al} + M) + x_e \cdot (V_e \cdot \rho_{al})}{M_g} \quad (14)$$

$$Mom_g = x_g \cdot M_g \quad (15)$$

$$F_{mag} = \frac{Mom_g}{x_{mag}} \quad (16)$$

Onde

$x_g$  = posição do centro de massa do rotor

$M_g$  = massa total do rotor

$x_d$  = posição do centro de massa do disco de alumínio

$V_d$  = volume do disco de alumínio

$\rho_{al} = 2.8 \text{ g/cm}^3$  densidade do alumínio

$M$  = massa do anel ferromagnético

$x_e$  = posição do centro de massa do eixo de alumínio

$V_e$  = volume do eixo de alumínio

$Mom_g$  = momento devido ao peso próprio

$x_{mag} = 2.l + c = 0,22m$ , local onde pode ser alocada a resultante da força

$F_{mag}$  = força magnética

Para um espaço destinado a bobina de 12 centímetros quadrados, é possível colocar no máximo 1016 voltas de um fio AWG18. Esse parâmetro será utilizado como limite para a seleção da configuração.

A distância escolhida entre o material ferro magnético e o eletroímã (airgap) é de 1.5mm.

A partir dos dados listados anteriormente, é possível calcular a área mínima da seção do eletroímã necessária para o projeto.

$$a_{\min} = \frac{F_{mag} \cdot g^2}{N^2 \cdot i^2 \cdot \mu_0} \quad (17)$$

Para a escolha da área da seção transversal do eletroímã, deve-se considerar um fator de segurança para que não falte comando no atuador superior. Também deve -se considerar que no airgap máximo ( $g = 0,003$ ), o atuador deve ter força suficiente para recuperar a posição central do sistema.

Após algumas simulações das dimensões dos eletroímãs, foi decidido aliviar o eixo e o rotor para reduzir os custos do projeto.

A tab. (2) mostra as dimensões escolhidas para o eletroímã, utilizando o programa do anexo B.

Tabela 2: Dimensões escolhidas para os eletroímãs.

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| Corrente máxima no enrolamento [A]            | 2.8 |
| Número de voltas na espiras                   | 200 |
| Airgap [mm]                                   | 3   |
| Área da perna do eletroímã [mm <sup>2</sup> ] | 255 |

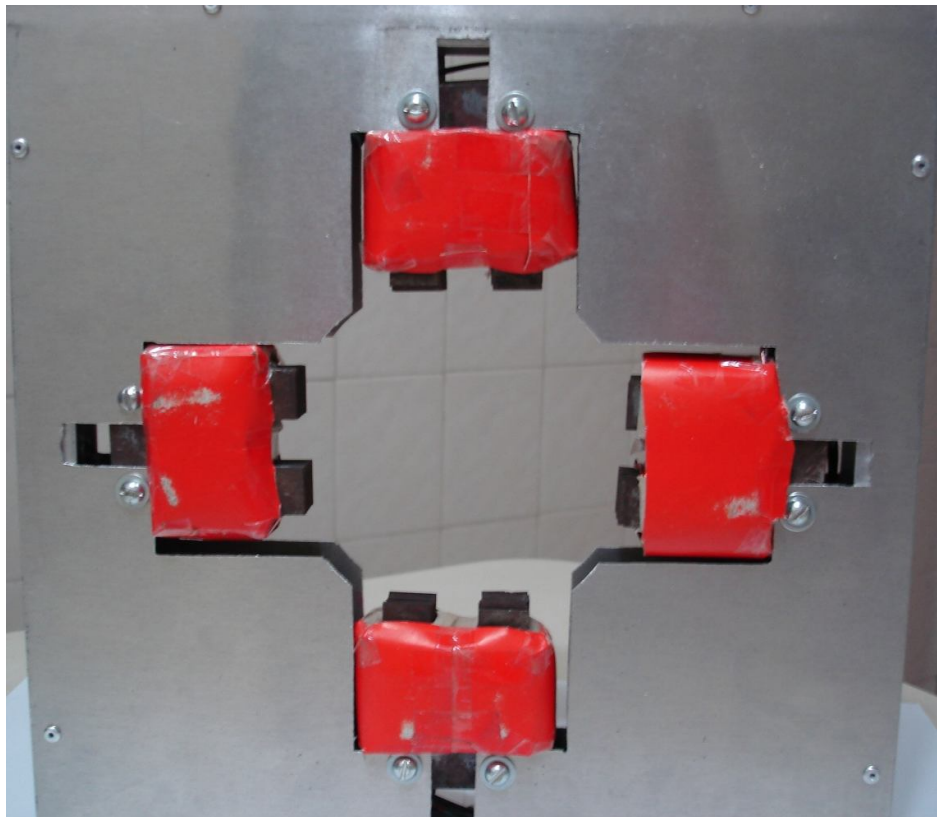


Figura 9: Mancal magnético construído.

### 3.6 Equacionamento da planta a ser controlada

As equações que representam o sistema são deduzidas a partir do equilíbrio de forças nas direções  $\vec{j}$  e  $\vec{k}$ , para que as simulações tornem-se mais simples.

A partir do teorema da resultante, temos:

Na direção  $\vec{j}$  :

$$m_e \cdot \ddot{y} = F_1 - F_2 - m_e \cdot g \quad (18)$$

Na direção  $\vec{k}$  :

$$m_e \cdot \ddot{z} = F_4 - F_3 \quad (19)$$

Onde  $m_e$  é a massa equivalente do rotor.

Substituindo as equações das forças, obtemos as equações a seguir.

Na direção  $\vec{j}$  :

$$m_e \cdot \ddot{y} = \mu_0 \cdot N^2 \cdot a \cdot \frac{[i_1(t)]^2}{z(t)^2} - m_e \cdot g - \mu_0 \cdot N^2 \cdot a \cdot \frac{[i_2(t)]^2}{(2 \cdot g_0 - z(t))^2} \quad (20)$$

Na direção  $\vec{k}$  :

$$m_e \cdot \ddot{z} = \mu_0 \cdot N^2 \cdot a \cdot \frac{[i_4(t)]^2}{z(t)^2} - \mu_0 \cdot N^2 \cdot a \cdot \frac{[i_3(t)]^2}{(2 \cdot g_0 - z(t))^2} \quad (21)$$

A corrente será modelada considerando a bobina do eletroímã como sendo um circuito elétrico composto por uma resistência R e uma indutância L em série com uma diferença de potencial V e sendo percorrida por uma corrente i.

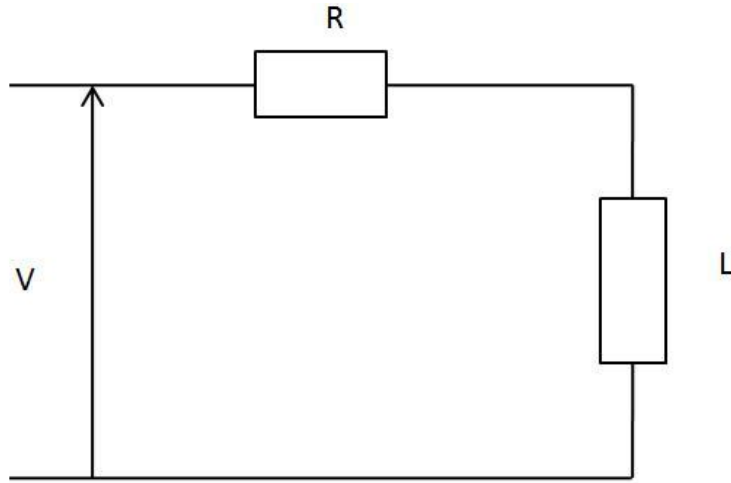


Figura 10: Modelo de um eletroímã.

A equação que rege esse modelo é:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i + \frac{V}{L} \quad (22)$$

A partir das equações acima, podemos montar o sistema de equações que será linearizado segundo o modelo do capítulo 3.7. Nesse equacionamento, será considerada uma indutância magnética média.

Na direção  $\vec{j}$  :

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot a}{2 \cdot g} \quad (23)$$

$$f_1 = \dot{\Psi}_1 = \Psi_2 \quad (24)$$

$$f_2 = \ddot{y} = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot a}{m_e} \cdot \frac{[i_1(t)]^2}{z(t)^2} - m_e \cdot g - \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot a}{m_e} \cdot \frac{[i_2(t)]^2}{(2 \cdot g_0 - z(t))^2} \quad (25)$$

$$f_3 = \dot{I}_3 = -\frac{R}{L} \cdot i_3 + \frac{V}{L} \quad (26)$$

$$f_4 = \dot{I}_4 = -\frac{R}{L} \cdot i_4 + \frac{V}{L} \quad (27)$$

Análise na direção  $\vec{k}$  :

$$f_1 = \dot{\theta}_1 = \theta_2 \quad (28)$$

$$f_2 = \ddot{z} = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot a}{m_e} \cdot \frac{[i_4(t)]^2}{z(t)^2} - \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot a}{m_e} \cdot \frac{[i_3(t)]^2}{(2 \cdot g_0 - z(t))^2} \quad (29)$$

$$f_3 = \dot{I}_1 = -\frac{R}{L} \cdot i_1 + \frac{V}{L} \quad (30)$$

$$f_4 = \dot{I}_2 = -\frac{R}{L} \cdot i_2 + \frac{V}{L} \quad (31)$$

### 3.7 Linearização do modelo

Nessa etapa do projeto é utilizado o método de linearização descrito em (Ogata 1982), que consiste em uma expansão em série de Taylor em torno de um ponto normal de operação. A hipótese adotada é que as variáveis desviam ligeiramente em torno desse ponto de operação, o que é consistente com o caso estudado nesse trabalho. Foram desconsiderados os termos de ordem superior.

Sabemos que:

$$F = f(\psi, \theta) \quad (32)$$

Sendo  $\tilde{\theta}$ ,  $\tilde{\psi}$  e  $\tilde{F}$  os pontos normais de operação do sistema e  $\theta$ ,  $\psi$  e  $F$  as variáveis do problema, temos:

$$F - \tilde{F} = K_1(\psi - \tilde{\psi}) + K_2(\theta - \tilde{\theta}) \quad (33)$$

Onde:

$$K_1 = \left. \frac{df}{d\psi} \right|_{\psi=\tilde{\psi}, \theta=\tilde{\theta}} \quad (34)$$

$$K_2 = \left. \frac{df}{d\theta} \right|_{\psi=\tilde{\psi}, \theta=\tilde{\theta}} \quad (35)$$

$$\tilde{F} = F(\tilde{\psi}, \tilde{\theta}) \quad (36)$$

Portanto, a aproximação linearizada para um modelo é:

$$\begin{bmatrix} F_z \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1y} & K_{2y} \\ K_{1z} & K_{2z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{F}_z \\ \tilde{F}_y \end{bmatrix} \quad (37)$$

### 3.8 Modelo linearizado e obtenção da função de transferência

Dois casos são abordados no presente trabalho: no caso 1, o imã superior atuando sozinho para o controle na direção  $\vec{k}$  e no caso 2, o imã inferior e um imã lateral que exercem uma força fixa e os outros dois imãs exercem o controle do sistema.

Caso 1: Observando as equações do sistema, percebemos que apenas a equação que relaciona a velocidade angular com as forças necessita ser linearizada. Utilizando o método de linearização descrito em 4.7, chegamos às seguintes equações:

Na direção  $\vec{j}$ :

$$\ddot{y}.m_e = k_i.\Delta i(t) + k_z.\Delta z(t) \quad (38)$$

Onde:

$$k_{iz} = \frac{2.N^2.\mu_0.a.i_{ze}}{m_e.(2.g_0-y_e)^2} \quad (39)$$

$$k_{i1} = -\frac{2.N^2.\mu_0.a.i_{1e}}{m_e.y_e^2} \quad (40)$$

$$k_y = \frac{2.N^2.\mu_0.a.i_{1e}^2}{m_e.y_e^3} - \frac{2.N^2.\mu_0.a.i_{ze}^2}{m_e.(2.g_0-y_e)^3} \quad (41)$$

O índice  $e$  representa o estado de equilíbrio do sistema. Para sua obtenção, a equação de equilíbrio dos momentos é utilizada considerando a aceleração angular nula.

$$0 = F_1(i_{1e}, y_e) - m_e.g - F_2(i_{2e}, y_e) \quad (42)$$

Percebemos que às forças dependem das correntes e da posição do equilíbrio. Estabelecendo como condição de contorno uma corrente disponível de 2,8A, são escolhidos os valores  $i_4=0,80A$  e  $i_3=0.30$ . A partir desses dados e da equação acima, obtemos  $z_e=6,0.10^{-4}mm$ .

Portanto, o espaço de estados na direção  $\vec{j}$  é apresentado no sistema abaixo.

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ k_y & 0 & k_{i1} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ I_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{V}{L} \end{pmatrix} \quad (43)$$

$$(Y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ I_1 \end{pmatrix} \quad (44)$$

Na direção  $\vec{k}$ :

$$\ddot{z}.m_e = k_i.\Delta i(t) + k_z.\Delta z(t) \quad (45)$$

Onde:

$$k_{i3} = -\frac{2.N^2.\mu_0.a.i_{3e}}{m_e.(2.g_0-z_e)^2} \quad (46)$$

$$k_{i4} = \frac{2.N^2.\mu_0.a.i_{4e}}{m_e.z_e^2} \quad (47)$$

$$k_{z1} = \frac{2.N^2.\mu_0.a.i_{4e}^2}{m_e.z_e^3} - \frac{2.N^2.\mu_0.a.i_{3e}^2}{m_e.(2.g_0-z_e)^3} \quad (48)$$

O índice  $e$  representa o estado de equilíbrio do sistema. Para sua obtenção, a equação de equilíbrio dos momentos é utilizada considerando a aceleração angular nula.

$$0 = F_4(i_{4e}, z_e) - F_3(i_{3e}, z_e) \quad (49)$$

Percebemos que às forças dependem das correntes e da posição do equilíbrio. Estabelecendo como condição de contorno uma corrente disponível de 2,8A, são escolhidos os valores  $i_4=0,60A$  e  $F_3=1N$ . A partir desses dados e da equação acima, obtemos  $z_e=5,20.10^{-4}$ .

Portanto, o espaço de estados na direção  $\bar{j}$  é apresentado no sistema abaixo.

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{I}_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ k_{z1} & 0 & k_{i3} & k_{i4} \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ I_4 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{V}{L} \end{Bmatrix} \quad (50)$$

$$(Y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ I_4 \end{Bmatrix} \quad (51)$$

Para a aplicação do controle foram determinadas as funções de transferência utilizando o comando ss2tf no software Scilab.

$$\frac{639053,53 + 3,201.10^{-10}.s}{2,594.10^8 - 131945,88.s + 1966,0896.s^2 + s^3}$$

$$\frac{639053,25.s}{2,594.10^8 - 131945,88.s + 1966,0896.s^2 + s^3}$$

$$\frac{5617,399}{1966,0896 + s}$$

## 4. PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE

### 4.1 Controlador PID

O controlador PID (proporcional/integral/derivativo) é um dos tipos de controlador mais utilizado, ele apresenta um bom desempenho desde que o sistema que se deseja controlar seja conhecido e bem comportado e que os parâmetros do controlador sejam corretamente determinados.

Os modos de controle proporcional, integral e derivativo são ações de controle lineares que são implementados na maioria dos controladores comerciais segundo a lei:

$$m(t) = K \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e \, dt - T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (52)$$

Onde:

K= ganho proporcional.

T<sub>d</sub>= tempo derivativo.

T<sub>i</sub>= tempo integral.

Os elementos do controle PID são:

- Controle Proporcional – Se T<sub>d</sub>=0 e T<sub>i</sub> → ∞ temos um controlador proporcional. O seu efeito no comportamento estacionário não é preciso, não consegue eliminar o erro ou *offset*, quando se controlam sistemas do tipo “0” ou auto-regulados. Um aumento do ganho proporcional pode levar, em geral, a um aumento de tempo de assentamento e eventualmente à instabilidade.
- Controle Proporcional Integral – Se T<sub>d</sub>=0, temos um controlador PI. A parte integral produz uma função de transferência do controlador com um pólo na origem,

eliminando, portanto o erro estacionário com entradas de referência constantes qualquer que seja a instalação sob controle, desde que o sistema com retroação seja estável. O erro estacionário deixa de existir, apesar da possível presença de perturbações, porém o sistema demora mais tempo a atingir o valor estacionário, ou seja, a ação integral aumenta o tempo de assentamento.

A combinação dos modos proporcional e integral é vantajosa porque combina a rapidez de resposta do modo proporcional enquanto retém a capacidade de eliminar o erro estacionário do modo integral. Cabe destacar que sistemas com baixa taxa de amortecimento precisam da inserção do modo derivativo.

- Derivativa - Quando  $T_i$  e  $T_d$  não são nulos, temos um controlador PID também conhecido como controlador de três modos. A inclusão de um termo da forma  $T_d (de/dt)$  ultrapassa a limitação das ações proporcional e integral que requerem de um erro, ou de um intervalo de tempo considerável, para produzir uma resposta com certa grandeza; respondendo à taxa à qual a variável controlada varia. Com a inclusão do modo derivativo, o controlador torna-se mais atento mesmo na presença de pequenos erros, podendo assim reduzir a ultrapassagem e o tempo de assentamento. O parâmetro  $T_d$  é a medida desta atenção, como revela imediatamente uma simples análise da resposta a malha aberta do controlador PID.

O usuário pode modificar as propriedades dinâmicas deste controlador atuando nos parâmetros (ajustáveis)  $K$ ,  $T_i$  e  $T_d$ .

A função de transferência do controlador PID em Laplace é:

$$G_c(s) = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (53)$$

#### 4.2 Controlabilidade e observabilidade do sistema

Segundo a definição, tem-se: “Um sistema é dito controlável se em  $t=t_0$  for possível encontrar um vetor de controle  $\delta(t)$  que leve (transfira) o sistema do estado inicial  $x_0$  para qualquer estado final  $x(t_f)$  num tempo finito  $t_0 \leq t \leq t_f$ ”.

Para a verificação da controlabilidade, é utilizada uma análise a partir do Gramiano de Controlabilidade.

$$\tau = \{B : A.B : A^2.B : A^3.B : \dots\}_{n \times m} \quad (54)$$

Como o rank do Gramiano de controlabilidade é igual a três e é igual à ordem do sistema, então o sistema em estudo é dito completamente controlável.

Segundo a definição, tem-se: “Um sistema é dito observável se todo e qualquer estado inicial  $x(t_0)$  pode ser exatamente determinado das medidas  $y(t)$  em um intervalo finito  $t_0 \leq t \leq t_f$ . Ou seja, o sistema é observável se todos os estados afetam cada elemento do vetor de saídas  $\{y\} = [C].\{x\} + [D].\{\delta\}$ ”

Colocar o Gramiano de observabilidade.

$$\varphi = \left\{ C : A^T.C^T : A^{2T}.C^T : \dots \dots \right\}_{n \times m} \quad (55)$$

Como o rank do Gramiano de Observabilidade é igual à ordem do sistema, então o sistema em estudo é completamente observável.

#### 4.3 Determinação das constantes de controle

Para a determinação das constantes de controle, é utilizado o método do último ganho, também chamado de método de Ziegler-Nicholson, em que sincroniza-se o sistema de tal forma que , aplicando apenas o controlador P, consiga-se determinar um ganho,  $K_{Pcrit}$  e um período,  $P_{crit}$  que deixe o sistema marginalmente estável.

## 5. SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL

### 5.1 Microcontrolador PIC

O microcontrolador escolhido foi o PIC 16f877A da *Microchip Technology Inc.*, pois possui duas saídas PWM e entradas analógicas suficientes para o projeto. As demais características do microcontrolador selecionado estão presentes no site de seu fabricante.

### 5.2 Sensor selecionado

O sensor selecionado é uma chave optoeletrônica reflexiva angulada modelo CTK C7L3. Para sua utilização, será necessário um circuito que ajuste a relação entre a variação da diferença de potencia e a variação da distância do sensor ao rotor. Esse circuito está descrito no capítulo 7.1 do presente trabalho.

### 5.3 Modelo do PID aplicado

Como visto anteriormente, o controle PID é um controle analógico. Para que esse tipo de controle seja aplicado utilizando um sistema digital, como o PIC, é necessário que aproximações das integrais e derivadas sejam utilizadas para que o controlador seja digital.

A equação 56 mostra uma aproximação para a derivada do termo derivativo do PID.

$$\frac{de}{dt} \cong \frac{[E(n) - E(n-1)]}{T_s} \quad (56)$$

Onde  $E(n)$  é o erro atual,  $E(n-1)$  é o erro anterior e  $T_s$  é o período entre a medida atual e a medida anterior do erro.

Porém, para limitar a variação na leitura do erro, será utilizado um intervalo de tempo  $T_s$  três vezes maior. A equação 57 mostra a aproximação utilizada no projeto.

$$\frac{de}{dt} \cong \frac{[E(n) - E(n-3)]}{3.T_s} \quad (57)$$

A equação 58 mostra uma aproximação para a integral do termo integrativo do PID.

$$\int_0^n E(t).dt = 3.T_s . \sum_0^3 E(n) \quad (58)$$

O intervalo de tempo utilizado foi o mesmo utilizado na aproximação da derivada.

A equação 59 mostra o modelo do controlador PID que foi utilizado.

$$C(n) = K . \left( E(0) + \frac{1}{T_s} . \sum_0^N E(n) + \frac{T_d . [E(n) - E(n-3)]}{T_s} \right) \quad (59)$$

Onde,  $K_p=K$ ,  $K_i=K/T_i$  e  $K_d=K.T_d$

### 5.4 Programação do PIC

A linguagem escolhida para a escrita do programa foi a linguagem Assembly. As principais vantagens do Assembly em relação à linguagem C, outra linguagem muito

utilizada na programação de PIC, é que após a compilação do programa para hexadecimal, o programa torna-se menor. Isso é um fato importante, já que microcontroladores PIC possuem memória limitada. Uma desvantagem do Assembly é não possuir uma biblioteca com funções para auxiliar a programação. Por isso, é necessário utilizar rotinas de multiplicação e de divisão, que foram baseadas em uma nota de aplicação retirada da página da Microchip (AN544).

Inicialmente, foi desenvolvido um circuito baseado no PIC 16f628A que gera um sinal PWM para cada um dos cinco botões de entrada. Esse circuito foi utilizado para a verificação da força dos eletroímãs do protótipo construído e a determinação da constante de correção das forças no circuito de controle.

Para que o tempo  $T_s$  seja sempre o correto, utilizou-se uma interrupção do timer 0 (TMR0). Toda vez que há o estouro do TMR0, há a leitura do sinal vindo do sensor. Portanto o programa ajusta as saídas PWM e após passar por toda a rotina, espera o estouro do TMR0 para fazer a leitura do sinal do sensor e seguir com a correção do valor do PWM nas saídas. O Anexo D mostra o fluxograma do programa de controle do PIC.

## 6. SISTEMAS ELETRÔNICOS

### 6.1 Entradas analógicas

As entradas analógicas serão digitalizadas através do módulo de conversão analógico digital interno do PIC 16f877A (módulo A/D). Esse módulo converte uma entrada de 0V a 5V em um número digital de 10 bits.

Há dois tipos de entradas analógicas no projeto de controle. Um tipo irá dar o valor das variáveis de controle  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ . O outro tipo de entrada será a aquisição de dados através do sinal do sensor.

A entrada das variáveis será feita através de potenciômetros, conforme a figura 11.

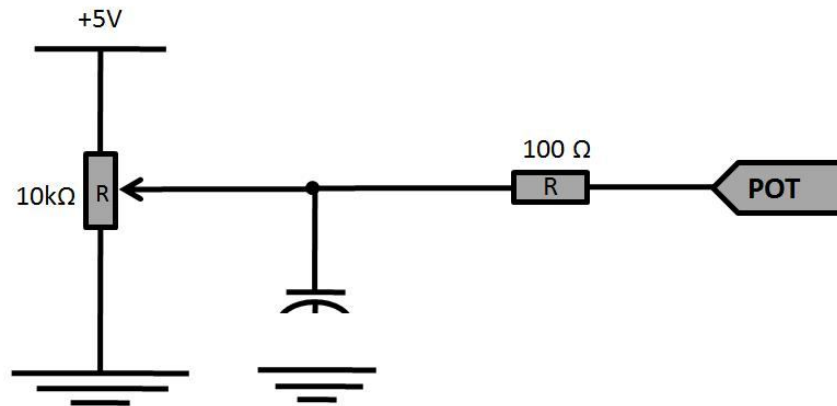


Figura 11: Circuito de entrada analógica via potenciômetro.

A resistência de 100Ω evita que uma corrente muito grande passe pelo PIC, o capacitor de 0,1μF funciona como um filtro, reduzindo a oscilação do sistema e o potenciômetro de 10kΩ varia a voltagem do sistema. POT é a entrada no PIC, com um sinal que varia de 0V à 5V.

O circuito utiliza o BC548 para amplificar o sinal do sensor e potenciômetros e resistência para ajustar a variação de voltagem devido à variação da distância do sensor ao rotor. Para o ajuste correto do circuito, foi executada uma calibração utilizando-se um multímetro.

### 6.2 Entradas digitais

As entradas digitais do sistema foram feitas através de botões e uma resistência de 10kΩ foi incluída no circuito para evitar que uma grande corrente passe para a perna do PIC. Para evitar leituras erradas dos botões, um filtro foi adicionado ao programa

### **6.3 Eletrônica de potência**

A eletrônica de potência utiliza transistores de potência (MOSFET). Esse componente é utilizado em corte/ saturação devido à utilização do PWM. A vantagem desse sistema é que há muito pouca perda de energia devido ao aquecimento do componente, obtendo assim uma perda de energia da ordem de miliwatts.

### **6.4 Saídas utilizadas para verificação do programa**

Para verificar e corrigir o programa utilizado, um conjunto de 8 leds foi utilizado para verificar se as leituras analógicas das variáveis de controle estão condizentes com as entradas desejadas. Outros quatro leds apresentarão qual a variável que está sendo mostrada no conjunto.

### **6.5 Alimentação do sistema**

A alimentação do sistema será feita através de uma bateria de chumbo selada de 12V e 7,2A. Para fornecer a tensão de 5V necessária para o funcionamento dos circuitos integrados , foi utilizado um regulador de tensão modelo CI LM7805.

## 7. MODELO EXPERIMENTAL

O protótipo é formado por duas placas de alumínio que sustentam os quatro eletroímãs (fig.12), uma base de MDF, um suporte para a ponta do eixo, rolamentos, pinos e suportes para os rolamentos, que permitem livre movimentação do eixo e um rotor.

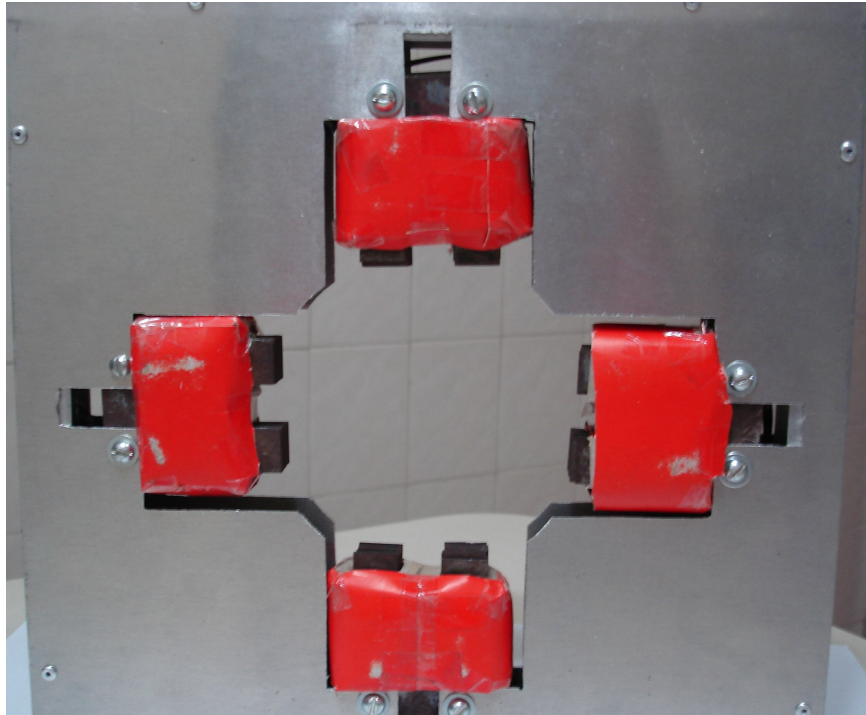


Figura 12: Mancal montado

O acionamento inicial do protótipo foi baseado nos conhecimentos de um controle PID. No primeiro teste, todas as constantes de controle foram zeradas e verificou-se que o sistema permaneceu estático. Em seguida, a constante proporcional foi ajustada até que o sistema ficasse marginalmente estável. Isso ocorre, pois um controle apenas proporcional move os pólos do sistema, que são reais positivos, para o valor nulo no eixo dos reais, chamado de marginalmente estável.

Após encontrar o valor da constante proporcional, é introduzido o controle diferencial, que provoca uma condição de overshoot. Isso ocorre, pois os pólos que estavam marginalmente estáveis tornaram-se negativos na parte real e o módulo da parte imaginária dos pólos ficou menor. Finalmente, depois de achar a constante diferencial, acrescentou-se a constante integral até que a condição de overshoot não foi mais percebida e a reação do rotor permaneça controlada.

## **8. CONCLUSÃO**

A utilização do PWM no controle de motores e eletroímãs é a melhor alternativa, pois às perdas são substancialmente menores e permite que controles digitais sejam utilizados para o controle desses dispositivos.

O controle PID mostrou-se interessante neste tipo de aplicação, pois é um controle simples, bem conhecido e mantém um controle confiável ao mancal magnético.

## 9. BIBLIOGRAFIA

A.M. Mohamed and F. P. Emad, “Comparison Between Current and Flux Control in Magnetic Bearing Systems,” in *Proceedings of the American Control. Conference*, June 1993, pp. 2356-2362.

Beizama, A.M.; Echeverria, J.M.; Martinez-Iturralde, M.; Egana, I.; Fontan, L., “Comparison between pole-placement control and sliding mode control for 3-pole radial magnetic bearings”, in *Proceedings of Power Electronics, Electrical Drives*, June 2008, pp 1315 – 1320.

Bittar, A. Levitação magnética de uma barra flexível. São Paulo, 1993. 158p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Charais, J.; Lourens, R.; “Software PID control of an inverted pendulum using the PIC16F684”, in *Microchip Technology Inc. Application Notes*, 2004.

Duan, G.R.; Wu, Z.Y.; Bingham, C.M.; Howe, D., “Robust active magnetic bearing control using stabilizing dynamical compensators”, in *Proceedings of Electric Machines and Drives*, 1999, May 1999 pp :493 – 495

Falcone, G.F. Eletromecânica. São Paulo, Edgar Blucher, 1985.

Ogata, K. Engenharia de controle moderno. Trad. De André Fábio Kohn e José Carlos T. B. Moraes. Rio de Janeiro, Prentice-Hall do Brasil, 1982.

Sabirin, C.R. Binder, A,”Rotor Levitation by Active Magnetic Bearing using Digital State Controller”, in *Proceedings of Power Electronics and Motion Control Conference*, 2008, Sept. 2008, pp 1625-1632.

## 10. ANEXOS

### Anexo A: Tabela AWG de fios de cobre esmaltados.

| Nº<br>AWG<br>ou<br>B & S | DIÂMETRO |               |      |       | Seção  |                   | Espiras por cm |                       | Espiras por cm² |                                    | Metros por 1000 g                  |       | Peso por 1000 ft |           | Ohms<br>por kg<br>(esmalt.) | Ohms<br>por km | Corrente<br>max. | Nº<br>SWG<br>Aprox. |
|--------------------------|----------|---------------|------|-------|--------|-------------------|----------------|-----------------------|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|-------|------------------|-----------|-----------------------------|----------------|------------------|---------------------|
|                          | Fio nu   | Fio esmaltado | mm   | milis | mm²    | milis<br>circular | Esmalt.        | 2 x seda<br>12 rigid. | 2 x algod.      | sem<br>isolção<br>entre<br>camadas | com<br>isolção<br>entre<br>camadas | m/kg  | nu               | Esmaltado | kg/km                       | nu             | Amp.             |                     |
| 0000                     | 11,68    | 450,0         |      | 107   | 211600 |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 1,05  | 137              | 953       | 0,161                       | 321            | 000000           |                     |
| 000                      | 10,39    | 410,0         |      | 84,5  | 167800 |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 1,32  | 137              | 755       | 0,203                       | 254            |                  |                     |
| 00                       | 9,266    | 364,8         |      | 67,5  | 133100 |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 1,67  | 137              | 596       | 0,256                       | 202            |                  |                     |
| 0                        | 8,262    | 324,9         |      | 53,4  | 105500 |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 2,11  | 137              | 475       | 0,323                       | 160            |                  |                     |
| 1                        | 7,348    | 289,3         |      | 42,3  | 83600  |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 2,66  | 137              | 376       | 0,406                       | 127            | 1                |                     |
| 2                        | 6,544    | 257,6         |      | 33,6  | 65370  |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 3,35  | 137              | 299       | 0,513                       | 101            | 3                |                     |
| 3                        | 5,827    | 229,4         |      | 26,5  | 52640  |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 4,22  | 137              | 237       | 0,646                       | 79,7           | 4                |                     |
| 4                        | 5,169    | 204,3         |      | 21,2  | 41740  |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 5,32  | 137              | 188       | 0,815                       | 63,5           | 5                |                     |
| 5                        | 4,621    | 181,9         |      | 16,8  | 33100  |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 6,71  | 137              | 149       | 1,03                        | 50,4           | 7                |                     |
| 6                        | 4,115    | 162,0         |      | 13,3  | 26250  |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 8,45  | 137              | 118       | 1,30                        | 39,9           | 8                |                     |
| 7                        | 3,665    | 144,3         |      | 10,5  | 20820  |                   |                |                       |                 |                                    |                                    | 10,70 | 137              | 93,7      | 1,64                        | 31,5           | 9                |                     |
| 8                        | 3,264    | 128,5         | 3,32 | 8,35  | 16510  | 3,01              | 2,88           | 2,81                  |                 | 8,8                                | 7,1                                | 13,30 | 137              | 75,5      | 2,07                        | 25,1           | 10               |                     |
| 9                        | 2,906    | 114,4         | 2,96 | 6,65  | 13090  | 3,38              | 3,19           | 3,06                  |                 | 11,1                               | 8,9                                | 16,70 | 137              | 59,5      | 2,59                        | 19,9           | 11               |                     |
| 10                       | 2,588    | 101,9         | 2,65 | 5,27  | 10090  | 3,78              | 3,61           | 3,51                  |                 | 13,9                               | 11,1                               | 21,10 | 137              | 47,3      | 3,27                        | 15,8           | 12               |                     |
| 11                       | 2,305    | 90,7          | 2,36 | 4,15  | 8234   | 4,25              | 4,00           | 3,89                  |                 | 17,5                               | 14,0                               | 26,60 | 137              | 37,5      | 4,15                        | 12,4           | 13               |                     |
| 12                       | 2,053    | 80,8          | 2,11 | 3,30  | 6530   | 4,76              | 4,45           | 4,29                  |                 | 21,8                               | 17,4                               | 33,00 | 137              | 29,8      | 5,22                        | 9,90           | 14               |                     |
| 13                       | 1,828    | 72,0          | 1,88 | 2,63  | 5178   | 5,32              | 4,98           | 4,74                  |                 | 27,4                               | 21,9                               | 42,20 | 137              | 23,6      | 6,56                        | 7,88           | 15               |                     |
| 14                       | 1,628    | 64,1          | 1,68 | 2,09  | 4107   | 5,95              | 5,51           | 5,47                  |                 | 34,1                               | 27,2                               | 53,30 | 137              | 18,7      | 8,26                        | 6,27           | 16               |                     |
| 15                       | 1,450    | 57,1          | 1,50 | 1,65  | 3257   | 6,67              | 6,12           | 5,82                  |                 | 42,8                               | 34,2                               | 67,20 | 137              | 14,9      | 10,4                        | 4,95           | 17               |                     |
| 16                       | 1,291    | 50,8          | 1,34 | 1,30  | 2593   | 7,46              | 6,95           | 6,46                  |                 | 53,8                               | 43,0                               | 84,80 | 137              | 11,8      | 13,2                        | 3,80           | 18               |                     |
| 17                       | 1,150    | 45,3          | 1,20 | 1,04  | 2048   | 8,33              | 7,70           | 7,14                  |                 | 67,5                               | 54,0                               | 106   | 137              | 9,32      | 16,6                        | 3,12           | 18               |                     |
| 18                       | 1,024    | 40,3          | 1,07 | 0,818 | 1624   | 9,30              | 8,54           | 7,82                  |                 | 84,7                               | 67,7                               | 135   | 137              | 7,41      | 21,1                        | 2,45           | 19               |                     |
| 19                       | 0,916    | 35,9          | 0,96 | 0,650 | 1288   | 10,4              | 9,46           | 8,60                  |                 | 105                                | 84,0                               | 170   | 137              | 5,87      | 26,5                        | 1,95           | 20               |                     |
| 20                       | 0,818    | 32,0          | 0,86 | 0,515 | 1022   | 11,5              | 10,5           | 9,32                  |                 | 131                                | 105                                | 214   | 137              | 4,65      | 33,5                        | 1,54           | 21               |                     |
| 21                       | 0,729    | 28,5          | 0,77 | 0,407 | 810,1  | 13,0              | 11,5           | 10,4                  |                 | 164                                | 131                                | 262   | 137              | 3,70      | 42,3                        | 1,22           | 22               |                     |
| 22                       | 0,643    | 25,4          | 0,69 | 0,322 | 642,4  | 14,5              | 13,3           | 11,8                  |                 | 207                                | 165                                | 341   | 137              | 2,93      | 53,6                        | 0,965          | 23               |                     |
| 23                       | 0,570    | 22,6          | 0,61 | 0,255 | 509,5  | 16,2              | 14,4           | 12,9                  |                 | 257                                | 206                                | 429   | 137              | 2,33      | 67,6                        | 0,765          | 24               |                     |
| 24                       | 0,506    | 20,1          | 0,55 | 0,204 | 404,0  | 18,3              | 16,1           | 14,2                  |                 | 324                                | 219                                | 540   | 137              | 1,85      | 84,4                        | 0,612          | 25               |                     |
| 25                       | 0,454    | 17,9          | 0,48 | 0,169 | 320,4  | 20,4              | 17,7           | 15,3                  |                 | 407                                | 271                                | 679   | 137              | 1,47      | 108                         | 0,427          | 26               |                     |
| 26                       | 0,409    | 15,9          | 0,44 | 0,126 | 254,1  | 22,6              | 19,5           | 16,5                  |                 | 513                                | 314                                | 859   | 137              | 1,17      | 137                         | 0,378          | 27               |                     |

## Anexo B: Programa de cálculo das propriedades e simulação do modelo.

```
clear all
```

```
//Parametros iniciais//
```

```
PI=3.141593;
```

```
rof=8000; //Densidade do material ferro magnetico [kg/m^3]//
```

```
roa=2800; //Densidade do alumínio [kg/m^3]//
```

```
dd=0.108; //Diametro externo do disco de aluminio [m]//
```

```
ddi=0.029; //Diametro interno do alivio do disco [m]//
```

```
dde=0.098; //Diametro externo do alivio do disco [m]//
```

```
de=0.019; //Diametro do eixo de aluminio [m]//
```

```
deint=0.015; //Diametro interno do eixo [m]//
```

```
df=0.110; //Diametro externo do disco de material ferro magnetico [m]//
```

```
l=0.2; //Metade do comprimento do eixo de aluminio [m]//
```

```
c=0.0125; //Metade da largura do rotor [m]//
```

```
ca=0.0025; //Metade do comprimento na parte aliviada//
```

```
g=9.8; //Aceleracao da gravidade//
```

```
//Volume [m^3]//
```

```
Ve=2*l*PI*(de/2)^2-2*l*PI*(deint/2)^2;
```

```
Vd=2*c*PI*(dd/2)^2-2*c*PI*(dde/2)^2+2*ca*PI*((dde/2)^2)-  
2*ca*PI*(ddi/2)^2+2*c*PI*((ddi/2)^2)-2*c*PI*((de/2)^2);
```

```
Vf=2*c*PI*((df/2)^2-(dd/2)^2);
```

```
//Calculo das massas//
```

```
M=Vf*rof;
```

$m=(V_e+V_d)*\rho_{oa};$

$M_g=M+m; //M+m//$

$x_g=((2*l+c)*(V_d*\rho_{oa}+M)+l*(V_e*\rho_{oa}))/M_g; //Posicao no eixo x do centro de gravidadedo rotor [m]//$

*//Momento de inercia eixo + disco de alumínio//*

$j_{xa}=(V_e*\rho_{oa}/2)*(d_e/2)^2+((V_d*\rho_{oa})/2)*(d_d/2)^2;$

$j_{ya}=(V_e*\rho_{oa}*(l^2)^4)/3+(V_d*\rho_{oa}*d_d)/16+V_d*\rho_{oa}*(2*l+c)^2;$

*//Momento de inercia do anel ferromagnético//*

$j_{xf}=M/2*((d_f/2)^2-(d_d/2)^2);$

$j_{yf}=(M/4)*((d_f/2)^2-(d_d/2)^2)+M*(2*l+c)^2;$

*//Momento de inercia//devo corrigir devido aos alivios//*

$j_x=j_{xa}+j_{xf}; //Momento de inercia em relacao ao eixo x//$

$j_y=j_{ya}+j_{yf}; //Momento de inercia em relacao ao eixo y//$

$j_z=j_y; //Momento de inercia em relacao ao eixo z//$

$w=0; //velocidade de rotaçao do rotor//$

*//Dados do circuito eletrico do sistema//*

$V=12; //Voltagem [Volts]//$

$R=4.2; //Resistencia [Ohm]//$

*//Sistema sem controle//*

*//Sistema mecanico//*

$\text{function } y=\text{xdot}(t,x)$

```

y(1)=x(1)*x(3)*x(4)-((w*jx)/jy)*x(3)-(((x(3)^2)*x(2)*(jy-jz))/jy)-x(1)*x(3)*x(4)*((jx-
jz)/jy);
y(2)=x(1);
y(3)=x(3)*x(1)*x(2)-((w*jx)/jz)*x(1)-(x(1)^2)*x(4)*((jy-jx)/jz)-x(3)*x(1)*x(2)*((jy-
jx)/jz)-(M+m)*g*xg;
y(4)=x(3);
endfunction

```

```

//valores inicial

```

```

t0=0;          // Instante inicial//
t=0:0.1:100;   // Vetor de tempo//
x0=[0;0;0;0]; //diversas tentativas foram feitas, mas nenhuma deu certo//

```

```

dx=ode(x0,t0,t,xdot);
//plotagem dos grafico da resposta do sistema//

```

```

//xset("window",1)
//plot2d(t,dx(1,:),style=1)
//xtitle('aceleração angular em torno de y','t','psi dois pontos')
//xset("window",2)
//plot2d(t,dx(2,:),style=2)
//xtitle('velocidade angular em torno de y','t','psi ponto')
//xset("window",3)
//plot2d(t,dx(3,:),style=3)
//xtitle('aceleração angular em torno de z','t','teta dois pontos')
//xset("window",4)
//plot2d(t,dx(4,:),style=4)
//xtitle('velocidade angular em torno de z','t','teta ponto')

```

```

//Dimencionamento do eletroima//

```

```

//Momento do peso proprio//

```

```

Momg=Mg*xg;
Fmag=(Momg*g)/(2*I+c); //forca do eletroima superior para equilibrar o peso
[N]//

```

```

//Calcula o numero de espiras para a forca magnetica necessaria//
i=2.8; //corrente maxima do fio 18AWG [A]//
mi0=1.2566/1000000; //permeabilidade magnetica do vacuo [tesla.m/A]//
a=0.017*0.015; //area da perna do eletroima [m^2]//
g=0.003; //airgap maximo [m]//
g0=0.0015; //airgap médio [m]//
N=((Fmag*g^2)/(i^2*mi0*a))^(1/2);
Nesc=200; //Esse numero foi escolhido para haver uma margem de
segurança//
k=(Nesc^2)*mi0*a; //constante utilizada no calculo da força magnetica
L=mi0*(Nesc^2)*a/(2*g); //indutancia magnetica média do circuito []//

```

```

//Funcao de transferencia//

```

```

me=0.5
//em j://
i1e=0.6;
i2e=0.2;
ye=0.000647;

```

```

ki1=-2.279;
ki2=0.5697;
kyi=2430.67-151.917j;

```

```

A=[0 1 0 ; kyi 0 ki1; 0 0 -(R/L) ];
B=[0;0; V/L];
C=[1 0 0 ; 0 1 0 ; 0 0 1];
fi=syslin('c',A,B,C);
dirj=ss2tf(fi);

```

```

//Projeto de controle//

//Controlabilidade//
dA=size(A); //ordem do sistema//
dA

cr=[B A*B A^2*B A^3*B];
rkc=rank(cr); //rank do gramiano de controlabilidade//
rkc

//Observabilidade do sistema//

dA
rko=contr(A',C');
rko

//Metodo de Ziegler-Nicholson//

//Entrada//
t=0:0.1:1000; ;
ui=zeros(t); //Entrada impulso unitário//
ui(1)=1;

x1=[0,0015];

//Primeira funcao de transferencia//
s=poly(0,'s');
N=poly([-12802.052],'s','coef')
D=(poly([-4480232.7 -2278.753 1966.0896 1],'s','coef'));
ft1=N/D;
kp1=0.2;

//Polos do sistema//
//plzr(ft1)

```

```
Ts1=syslin('c',N*kp1/(D+N*kp1));
```

```
[ys11]=csim(ui,t,Ts1,x1);
```

## ANEXO C: Programa em assembly para controle do mancal magnético

```
;*****PID com pic 16f877 e entrada analógica para  
AMB*****
```

```
#INCLUDE <P16F877A.INC>
```

```
;*****configurações para gravação*****
```

```
__CONFIG _CP_OFF & _CPD_OFF & _DEBUG_OFF & _LVP_OFF &  
_WRT_OFF & _BODEN_OFF & _PWRTE_ON & _WDT_ON & _XT_OSC
```

```
;*****Definição das variáveis*****
```

```
CBLOCK    0X20                ;Posição inicial da RAM  
KP                ;constante proporcional do controle  
KI                ;constante integral do controle  
KD                ;constante derivativa do controle  
EN0                ;valor do erro atual lido pelo sensor  
ENREAL            ;valor real do erro medido pelo sensor  
EN1                ;valor do erro anterior (En-1)  
EN2                ;valor do erro 2 vezes anterior (En-2)  
EN3                ;valor do erro 3 vezes anterior (En-3)  
DOPID              ;variavel que começa como 0, passa a  
zero quando termina o MAIN e passa a 1 no final da interrupção (PID FLAG  
set=1 sim no fluxograma)  
WORK_TEMP  
  
INTH                ;high bit do resultado da parte integral  
INTL                ;low bit do resultado da parte integral  
DERH                ;high bit do resultado da parte derivativa  
DERL                ;low bit do resultado da parte derivativa
```

PROPH ;high bit do resultado da parte  
proporcional

PROPL ;low bit do resultado da parte  
proporcional

ACCaHI ; ACUMULADOR a DE 16 BITS UTILIZADO  
ACCaLO ; NA ROTINA DE DIVISÃO

ACCbHI ; ACUMULADOR b DE 16 BITS UTILIZADO  
ACCbLO ; NA ROTINA DE DIVISÃO

ACCcHI ; ACUMULADOR c DE 16 BITS UTILIZADO  
ACCcLO ; NA ROTINA DE DIVISÃO

ACCdHI ; ACUMULADOR d DE 16 BITS UTILIZADO  
ACCdLO ; NA ROTINA DE DIVISÃO

temp ; CONTADOR TEMPORÁRIO UTILIZADO  
; NA ROTINA DE DIVISÃO

H\_byte ; ACUMULADOR DE 16 BITS UTILIZADO  
L\_byte ; P/ RETORNAR O VALOR DA ROTINA  
; DE MULTIPLICAÇÃO

mulplr ; OPERADOR P/ ROTINA DE MULTIPLICAÇÃO  
mulcnd ; OPERADOR P/ ROTINA DE MULTIPLICAÇÃO

ENDC

;\*\*\*\*\*Definição dos bancos de RAM\*\*\*\*\*

#DEFINE BANK1 BSF STATUS,RP0

```
#DEFINE      BANK0      BCF  STATUS,RP0
```

```
;*****Constantes internas*****
```

```
ALFASENSOR      EQU  .200  ;valor que transforma a entrada de 8 bits  
do sensor no valor real do erro
```

```
;*****Entradas*****
```

```
#DEFINE  ENTRADAKP      PORTA,0  ;entrada analógica da  
constante KP
```

```
#DEFINE ENTRADAKI      PORTA,1  ;entrada analógica da constante  
KI
```

```
#DEFINE ENTRADAKD      PORTA,2  ;entrada analógica da constante  
KD
```

```
#DEFINE BKP          PORTD,0          ;caso 1, fazer  
a leitura da entrada analogica RA0 e mostrar seu valor nos leds RB0 a  
RB7, acendendo o led indicativo LEDKP. Se 0, ficar em loop esperando
```

```
#DEFINE BKI          PORTC,4          ;caso 1, fazer  
a leitura da entrada analogica RA1 e mostrar seu valor nos leds RB0 a  
RB7, acendendo o led indicativo LEDKI. Se 0, ficar em loop esperando
```

```
#DEFINE BKD          PORTD,2          ;caso 1, fazer  
a leitura da entrada analogica RA2 e mostrar seu valor nos leds RB0 a  
RB7, acendendo o led indicativo LEDKD. Se 0, ficar em loop esperando
```

```
#DEFINE BLER      PORTD,3          ; caso 1, pular para 2 e  
zerar o pwm para que novos valores de KP, KI e KD sejam dados. Se 0,  
passar retopara 1
```

```
#DEFINE  ENTRADASENSOR      PORTE,2  ;entrada analógica  
da posição do rotor dada pelo sensor
```

```
;*****Saídas*****
```

```
#DEFINE  PWM1      PORTC,2  ;saída pwm pelo pino 17
```

```
#DEFINE  PWM2      PORTC,1  ;saída pwm pelo pino 16
```

;leds que indicam os valores lidos nas entradas analogicas

```
#DEFINE L0 PORTB,0
```

```
#DEFINE L1 PORTB,1
```

```
#DEFINE L2 PORTB,2
```

```
#DEFINE L3 PORTB,3
```

```
#DEFINE L4 PORTB,4
```

```
#DEFINE L5 PORTB,5
```

```
#DEFINE L6 PORTB,6
```

```
#DEFINE L7 PORTB,7
```

;leds que indicam qual o valor que está sendo mostrado pelos leds que indicam os valores

```
#DEFINE LEDKP PORTD,7
```

```
#DEFINE LEDKI PORTD,6
```

```
#DEFINE LEDKD PORTD,5
```

```
#DEFINE LED PORTD,4
```

;\*\*\*\*\*Vetor de reset do pic\*\*\*\*\*

```
ORG 0X0000
```

```
GOTOCONFIGU
```

;\*\*\*\*\*Configurações iniciais de hardware e software\*\*\*\*\*

```
CONFIGU
```

```
CLRF PORTA
```

```
CLRF PORTB
```

```
CLRF PORTC
```

```
CLRF PORTD
```

```
CLRF PORTE
```

```
BANK1
```

```
MOVLW B'00000111'
```



BANK0

MOVLW B'00000111'

MOVWF T2CON ;configura TIMER2  
;TIMER2 ligado  
;prescaler - 1:16  
;postscaler - 1:1

MOVLW B'00001111'

MOVWF CCP1CON ;configura pino RC2 para  
pwm

CLRF CCPR1L ;zera duty cycle do pwm

MOVLW B'00001111'

MOVWF CCP2CON ;configura pino RC1 para  
PWM

CLRF CCPR2L ;zera duty cycle do pwm

BTFSC STATUS,NOT\_TO ;reset por estouro do WDT

GOTO\$ ;não - aguarda estouro

;\*\*\*\*\*Inicialização da RAM\*\*\*\*\*

MOVLW 0X20

MOVWF FSR

LIMPA\_RAM

CLRF INDF

INCF FSR,F

MOVFFSR,W

XORLW 0X80

BTFSS STATUS,Z

GOTOLIMPA\_RAM

;\*\*\*\*\*Início da interrupção\*\*\*\*\*

;Essa é uma interrupção de timer, que serve para manter o tempo de aquisição fixo e conhecido

;Essa interrupção lê a entrada analógica AN7 (sensor)

```
ORG 0X04 ;endereço inicial da interrupção
MOVWF WORK_TEMP ;copia W para W_TEMP
SWAPF STATUS,W
MOVWF STATUS_TEMP ;copia STATUS para STATUS_TEMP
```

;\*\*\*\*\*Rotina de interrupção\*\*\*\*\*

```
MOVLW .11 ;(RESET THE TMRO
INTERRUPT TO HAPPEN IN 3.9mSECONDS 256Hz????)
;ainda não tenho certeza
```

dessa parte

```
MOVWF TMR0
MOVLW B'00111101' ;seleciona AN7, dado vindo do
sensor
```

```
MOVWF ADCON0
DELAY .40 ;espera mínimo de 20us
antes de começar uma conversão A/D
```

```
BSF ADCON0, GO ;inicia a conversão
```

ESP\_EN0

```
BTFSC ADCON0, NOT_DONE
```

```
GOTOESP_EN0
```

```
MOVFSR, w ;salva em f o valor dos 8 bits a esquerda
da leitura do sensor
```

```
MOVWF EN0 ;esse dado não é o valor
real de EN0, devo trabalhar o dado para que ele se torne o valor do erro.
Esse valor varia de 0 a 255
```

```

;multiplicar EN0 pela
constante ALFASENSOR para dar o valor real da distancia (ENREAL)

```

```

;*****Rotina de saída da interrupção*****

```

```

SAI_INT

```

```

    SWAPF    STATUS_TEMP,W

```

```

    MOVWF    STATUS    ;move STATUS_TEMP para STATUS

```

```

    SWAPF    WORK_TEMP,F

```

```

    SWAPF    WORK_TEMP,W                ;move W_TEMP para W

```

```

    BSF      DOPID                    ;PID FLAG set sim (da ao

```

```

DOPID o valor 1)

```

```

    RETFIE                                ;comando para sair da

```

```

interrupção

```

```

; *****Parte do programa que so entra em cena a primeira vez
que passar por aqui e nas vezes em que eu apertar o botão de leitura(para
evitar ruidos)*****

```

```

LEITURAK                                ;le as entradas analogicas

```

```

AN0(KP), AN1(KI) e AN2(KD)

```

```

;acho q tem q zerar o pwm aqui,

```

```

pq pode dar *****

```

```

    BSF      LED

```

```

    BCF      LEDKP

```

```

    BCF      LERKI

```

```

    BCF      LEDKD

```

```

LOOPKP

```

```

    BTFSS    BKP

```

```

    GOTOLOOPKP

```

```

LERKP

```

```

    BTFSS      BKP                                ;se 1, pula a proxima linha
    GOTOLERKP
    MOVLW      B'00000101'                        ;seleciona entrada analogica AN0
para ler
    MOVWF      ADCON0
    DELAY      .40                                ;pequena espera para
leitura
    BSF        ADCON0, GO                          ;inicia a leitura
    ESPKP
    BTFSC      ADCON0, NOT_DONE                    ;enquanto a leitura não estiver
terminada (1), fica esperando
    GOTOESPKP
    MOVFADRESH, W
    MOVWF      KP                                ;passa o valor dos 8 bits
mais significativos da leitura para o KP

                                                ;para que nao de problema,
pode ser que o primeiro bit defina se o numero e positivo ou negativo, ou
seja, perca mais um bit

```

#### ;VERIFICAÇÃO A PARTIR DOS LEDS

```

    BSF        LEDKP
    BTFSC      KP,0 ;se a posicao do KP testada for 0, nao acende o led
    BSF        L0
    BTFSC      KP,1
    BSF        L1
    BTFSC      KP,2
    BSF        L2
    BTFSC      KP,3
    BSF        L3
    BTFSC      KP,4
    BSF        L4
    BTFSC      KP,5
    BSF        L5

```

```

BTFSC    KP,6
BSF      L6
BTFSC    KP,7
BSF      L7

LOOPKI
    BTFSS    BKI
    GOTOLOOPKI

LERKI
    BTFSS    BKI                                ;se 1, pula a proxima linha
    GOTOLERKI
    MOVLW    B'00001101'                        ;seleciona entrada analogica AN1
para ler
    MOVWF    ADCON0
    DELAY    .40                                ;pequena espera para
leitura
    BSF      ADCON0, GO                          ;inicia a leitura
ESPKI
    BTFSC    ADCON0, NOT_DONE                    ;enquanto a leitura não estiver
terminada (1), fica esperando
    GOTOESPKI
    MOVFADRESH,    W
    MOVWF    KI                                ;passa o valor dos 8 bits
mais significativos da leitura para o KI

;para que nao de problema,
pode ser que o primeiro bit defina se o numero e positivo ou negativo, ou
seja, perca mais um bit
;VERIFICAÇÃO A PARTIR DOS LEDS
BCF      LEDKP
BSF      LEDKI
BTFSC    KI,0    ;se a posicao do KI testada for 0, nao acende o led
BSF      L0

```

|       |      |
|-------|------|
| BTFSC | KI,1 |
| BSF   | L1   |
| BTFSC | KI,2 |
| BSF   | L2   |
| BTFSC | KI,3 |
| BSF   | L3   |
| BTFSC | KI,4 |
| BSF   | L4   |
| BTFSC | KI,5 |
| BSF   | L5   |
| BTFSC | KI,6 |
| BSF   | L6   |
| BTFSC | KI,7 |
| BSF   | L7   |

LOOPKD

|            |     |
|------------|-----|
| BTFSS      | BKD |
| GOTOLOOPKD |     |

LERKD

|           |     |  |                             |
|-----------|-----|--|-----------------------------|
| BTFSS     | BKD |  | ;se 1, pula a proxima linha |
| GOTOLERKD |     |  |                             |

|          |             |  |                                  |
|----------|-------------|--|----------------------------------|
| MOVLW    | B'00010101' |  | ;seleciona entrada analogica AN0 |
| para ler |             |  |                                  |

|       |        |
|-------|--------|
| MOVWF | ADCON0 |
|-------|--------|

|       |     |  |                              |
|-------|-----|--|------------------------------|
| DELAY | .40 |  | ;pequena espera para leitura |
|-------|-----|--|------------------------------|

|     |            |  |                   |
|-----|------------|--|-------------------|
| BSF | ADCON0, GO |  | ;inicia a leitura |
|-----|------------|--|-------------------|

ESPKD

|       |                  |  |                                                               |
|-------|------------------|--|---------------------------------------------------------------|
| BTFSC | ADCON0, NOT_DONE |  | ;enquanto a leitura não estiver terminada (1), fica esperando |
|-------|------------------|--|---------------------------------------------------------------|

GOTOESPKD

|             |   |
|-------------|---|
| MOVFADRESH, | W |
|-------------|---|

MOVWF KD ;passa o valor dos 8 bits  
mais significativos da leitura para o KD

;para que nao de problema,  
pode ser que o primeiro bit defina se o numero e positivo ou negativo, ou  
seja, perca mais um bit

;VERIFICAÇÃO A PARTIR DOS LEDS

BCF LEDKI

BSF LEDKD

BTFSC KD,0 ;se a posicao do KD testada for 0, nao acende o led

BSF L0

BTFSC KD,1

BSF L1

BTFSC KD,2

BSF L2

BTFSC KD,3

BSF L3

BTFSC KD,4

BSF L4

BTFSC KD,5

BSF L5

BTFSC KD,6

BSF L6

BTFSC KD,7

BSF L7

LOOPLER

BTFSS BLER

GOTOLOOPLER

GOTO LEITURAK

MAIN ;1 do fluxograma, parte que  
se repete eternamente, ate que eu queira fazer nova leitura do KP, KI e KD

```

MOVFDOPID
BTSS      STATUS,Z           ;PID flag=1?? (sim no fluxograma)
GOTOMAIN          ;nao
                        ;sim

PIDPROP          ;calcula o termo
proporcional do PID, que e a multiplicacao de KP por ENREAL
MOVFKP,W
MOVWF     MULTP          ;da os valores das entradas
de MULTI
MOVFENREAL,W
MOVWF     MULTC
CALL MULTI          ;chama a funcao que fara a
multiplicacao

MOVFMULTH
MOVWF     PROPH          ;da os valores do resultado
da multiplicacao aos valores da parte proporcional
MOVFMULTL
MOVWF     PROPL

PID_INT
BTSS      INT_TERM_H, 7
GOTOSUME_NEG
SUME_POS
BTSS      EN0, 7
GOTOCHECK_2_BIG
ADD_INT_TERM
MOVFEN0, W
MOVWF     AARGB0
MOVFKI,   W
MOVWF     BARGB0
CALL FXM0808S

```

```

SWAPF    AARGB1, F
MOVLW    0FH
ANDWF    AARGB1, F
BTFSC    AARGB0, 0
BSF       AARGB1, 4
BTFSC    AARGB0, 1
BSF       AARGB1, 5
BTFSC    AARGB0, 2
BSF       AARGB1, 6
BTFSC    AARGB0, 3
BSF       AARGB1, 7
SWAPF    AARGB0, F
MOVLW    0FH
ANDWF    AARGB0,  F
MOVLW    0F0H
BTFSC    AARGB0 ,3
ADDWF    AARGB0,  F
MOVFAARGB1,  W
ADDWF    INT_TERM_L,  F
BTFSC    STATUS, C
INCF     INT_TERM_H,  F
MOVFAARGB0,  W
ADDWF    INT_TERM_H,  F
GOTOPID_DIF
SUME_NEG
BTFSS    EN0,  7
GOTOADD_INT_TERM
MOVLW    B'00010100'
ADDWF    INT_TERM_H,  W
MOVWF    TEMP2
BTFSS    TEMP2,  7
GOTOADD_INT_TERM

```

```

GOTOPID_DIF
CHECK_2_BIG
    MOVLW    B'11101100'
    ADDWF    INT_TERM_H,    W
    MOVWF    TEMP2
    BTFSC    TEMP2,    7
    GOTOADD_INT_TERM

```

```

PID_DIF
    MOVFEN0, W
    MOVWF    AARGB0
    MOVFEN3, W
    SUBWF    AARGB0, F
    MOVFKD,    W
    MOVWF    BARGB0
    CALL FXM0808S

```

```

    SWAPF    AARGB0, F
    MOVLW    0F0H
    ANDWF    AARGB0, F
    SWAPF    AARGB1, F
    MOVLW    0FH
    ANDWF    AARGB1, W
    ADDWF    AARGB0, W
    MOVWF    DER_TERM_H
    BTFSC    DER_TERM_H, 7
    GOTOTEST_SMALL
TEST_LARGE
    MOVLW    B'11101100'
    ADDWF    DER_TERM_H,    W
    BTFSS    STATUS,    C
    GOTOPID_PROP
    MOVLW    B'00010100'

```

```

MOVWF    DER_TERM_H
GOTO     PID_PROP
TEST_SMALL
MOVLW    B'00010100'
ADDWF    DER_TERM_H,    W
BTFSC    STATUS,    C
GOTO     PID_PROP
MOVLW    B'11101100'
MOVWF    DER_TERM_H
PID_PROP
MOVFEN0, W
MOVWF    AARGB0
MOVFINT_TERM_H,    W
ADDWF    AARGB0,    F
MOVFDER_TERM_H, W
ADDWF    AARGB0,    F
MOVFKP,    W
MOVWF    BARGB0
CALL     FXM0808S

SET_MOTOR
BTFSS    AARGB0, 7
GOTO     SET_FWD
SET_REV
BSF      CCP1CON, 7
BSF      CCP1CON, 6
COMFAARGB0,    F
COMFAARGB1, F
INCF     AARGB1,    F
BTFSC    STATUS, C
INCF     AARGB0,    F
GOTO     SET_PWM
SET_FWD

```

```

BCF      CCP1CON, 7
BSF      CCP1CON, 6
SET_PWM
MOVLW    B'11110000'
ANDWF    AARGB0, W
BTFSC    STATUS,  Z
GOTOSCALE
MOVLW    3FH
MOVWF    CCPR1L
GOTOSHIFT_ERRORS
SCALE
RLF      AARGB0,  F
RLF      AARGB0,  F
BCF      AARGB0, 1
BCF      AARGB0, 0
BTFSC    AARGB1, 7
BSF      AARGB0, 1
BTFSC    AARGB1, 6
BSF      AARGB0, 0
MOVFAARGB0,  W
MOVWF    CCPR1L
BCF      CCP1CON,5
BCF      CCP1CON,4
BTFSC    AARGB1, 5
BSF      CCP1CON,5
BTFSC    AARGB1, 4
BSF      CCP1CON,4
SHIFT_ERRORS
MOVFEN2, W
MOVWF    EN3
MOVFEN1, W
MOVWF    EN2
MOVFEN0, W

```

```

MOVWF    EN1
CLRF DO_PID
BCF      PORTA, 4
GOTOMAIN

```

GOTO MAIN ;so para lembrar que tem que mandar voltar, pq senao ele vai calcular as funcoes sem necessidade

\*\*\*\*\*ROTINA DE MULTIPLICAÇÃO\*\*\*\*\*

```

mult    MACRO    bit
; Begin macro

```

```

    BTFSC    mulplr,bit
    ADDWF    H_byte,F
    RRF      H_byte,F
    RRF      L_byte,F

```

```

    ENDM
; End of macro

```

```

; *****
;
;   Begin Multiplier Routine
; *****

```

```

mpy_F
    CLRF     H_byte
    CLRF     L_byte
    MOVF     mulcnd,W      ; move the multiplicand to W reg.
    BCF      STATUS,C      ; Clear carry bit in the status Reg.

```

```

mult    0
mult    1
mult    2
mult    3
mult    4
mult    5
mult    6
mult    7

```

```

RETURN          ; RETORNA

```

```

;*****ROTINA DE DIVISÃO*****
,

```

```

D_divF
    MOVLW    .16
    MOVWF    temp          ; CARREGA CONTADOR PARA
DIVISÃO

```

```

    MOVF     ACCbHI,W
    MOVWF    ACCdHI
    MOVF     ACCbLO,W
    MOVWF    ACCdLO        ; SALVA ACCb EM ACCd

```

```

    CLRF     ACCbHI
    CLRF     ACCbLO        ; LIMPA ACCb

```

```

    CLRF     ACCcHI
    CLRF     ACCcLO        ; LIMPA ACCc

```

DIV

```
BCF    STATUS,C
RLF    ACCdLO,F
RLF    ACCdHI,F
RLF    ACCcLO,F
RLF    ACCcHI,F
MOVF   ACCaHI,W
SUBWF  ACCcHI,W           ;check if a>c
BTFSS  STATUS,Z
GOTO   NOCHK
MOVF   ACCaLO,W
SUBWF  ACCcLO,W           ;if msb equal then check lsb
```

NOCHK

```
BTFSS  STATUS,C           ;carry set if c>a
GOTO   NOGO
MOVF   ACCaLO,W           ;c-a into c
SUBWF  ACCcLO,F
BTFSS  STATUS,C
DECF   ACCcHI,F
MOVF   ACCaHI,W
SUBWF  ACCcHI,F
BSF    STATUS,C           ;shift a 1 into b (result)
```

NOGO

```
RLF    ACCbLO,F
RLF    ACCbHI,F
```

```
DECFSZ temp,F           ; FIM DA DIVISÃO ?
GOTO   DIV              ; NÃO - VOLTA P/ DIV
; SIM
RETURN                      ; RETORNA
```

**END**