



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA
DIDÁTICO DE CONTROLE PARA
LEVITAÇÃO MAGNÉTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Helder José Celani de Souza

Itajubá

2003

Helder José Celani de Souza

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA
DIDÁTICO DE CONTROLE PARA
LEVITAÇÃO MAGNÉTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração:

Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador:

Prof. Luiz Eduardo Borges da Silva

Co-orientador:

Prof. Carlos Alberto Murari Pinheiro

Itajubá

2003

***À minha esposa Cidinha, aos meus filhos e
pais pelo incentivo e apoio constante.***

Agradecimentos

Ao Prof. Luiz Eduardo Borges da Silva pela orientação, dedicação e amizade que resultaram neste trabalho.

Ao Prof. Carlos Alberto Murari Pinheiro pela co-orientação, motivação e revisão do trabalho.

Aos Profs. Valberto Ferreira da Silva, Paulo Cesar Rosa, Kazuo Nakashima e Germano Lambert que auxiliaram em distintas fases da implementação do sistema.

À empresa Sense Eletrônica pela doação da fonte de alimentação do sistema, à empresa Precision que forneceu os serviços de medições precisas de peso das esferas de aço e indutância dos magnetos utilizados, à empresa Ladder Automação pelo empréstimo e doação de um PLC Allen Bradley usado nos testes preliminares do sistema e à empresa Metaltex Eletrônica pelo empréstimo de um PLC Aromat.

Aos colegas Joaquim Braga, Valdemar Santos, Claudionor Silva, Ronaldo Bittencourt, Antônio Pereira, Christian Nogueira e Roberto Araki que contribuíram de diferentes formas para realização deste trabalho.

À Deus que nos ilumina e direciona na utilização dos dons naturais e da inteligência com o objetivo de concretizar e solidificar a ciência a favor do bem estar da humanidade.

Sumário

Agradecimentos	iv
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Glossário de Termos	xiv
Capítulo 1 – Introdução	1
Capítulo 2 – Modelagem do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética	5
2.1. Modelagem de Sistemas	5
2.1.1. Introdução	5
2.1.2. Metodologia para Modelagem do Sistema Maglev	5
2.1.2.1. Etapas para Modelagem do Sistema com Controle Analógico	6
2.1.2.2. Etapas para Modelagem do Sistema com Controle Digital	6
2.1.2.2. Etapas para Modelagem do Sistema Real	7
2.1.2.3. Modelagem Alternativa	7
2.2. Descrição e Equacionamento Básico do Sistema	7
2.3. Modelagem do Sistema Maglev com Controle Analógico	11
2.3.1. Obtenção das Variáveis de Estado	11
2.3.2. Linearização do Sistema	13
2.3.3. Obtenção da Equação Característica do Sistema	18
2.3.4. Obtenção dos Autovalores da Equação Característica	20
2.3.5. Obtenção da Matriz de Transição de Estados	22
2.3.6. Obtenção da Função de Transferência do Sistema	24
2.3.7. Obtenção da Matriz de Controlabilidade do Sistema	25
2.3.8. Obtenção da Matriz de Observabilidade do Sistema	28
2.4. Modelagem do Sistema Maglev com Controle Digital	30
2.4.1. Introdução	31

2.4.2. Determinação da FT no domínio Z.	31
2.4.3. Diagrama em Blocos do Sistema	36
2.5. Modelagem Alternativa do Sistema Didático para Levitação	
Magnética	36
2.5.1. Introdução	37
2.5.2. Desenvolvimento da Modelagem Alternativa.....	37

Capítulo 3 – Simulação do Sistema Didático de Controle para Levitação

Magnética	46
3.1. Simulação de Sistemas	46
3.1.1. Introdução	46
3.2. Simulação do Sistema Didático de Controle para Maglev.....	47
3.2.1. Introdução	47
3.2.2. Simulação do Sistema Maglev sem Compensador	48
3.2.2.1. Listagem do Arquivo editado no Prog. Matlab.....	49
3.2.2.2. Resultados - Arquivo Maglev.m no Matlab	50
3.2.2.3. Determinação do Lugar das Raízes e Respostas do Sistema	51
3.3. Simulação do Sistema em Maglev com Compensador	53
3.4. Simulação do Sistema Maglev usando Simulink	56
3.4.1. Introdução	56
3.4.2. Diagrama em blocos do Sistema	56
3.4.3. Resultados da Simulação e Formas de Ondas.....	57

Capítulo 4 – Descrição e Projeto do Sistema Real.....61

4.1. Introdução.....	61
4.2. Histórico do Desenvolvimento	62
4.3. O Eletromagneto ou Bobina do Sistema Maglev	68
4.4. O Sensor de Posição do Sistema Maglev	75
4.4.1. Introdução	75
4.4.2. Sensor Óptico Analógico com Fibra Óptica	75
4.4.3. Sensor Óptico Tipo LASER com Barreira	80
4.5. Descrição do Projeto do Regulador Analógico	85
4.5.1. Introdução	85
4.5.2. Projeto do Circuito Somador.....	86

4.5.3. Projeto do Controlador Eletrônico tipo PID.....	90
4.5.4. Projeto da Fonte de Corrente Controlada por Tensão.....	93
4.5.5. Descrição do Circuito Completo do Regulador	
Analógico	95
4.6. Descrição do Projeto do Sistema em Malha Fechada Digital	99
4.6.1. Introdução	99
4.6.2. Descrição do Sistema Básico em Malha Fechada	
Digital.....	99
4.6.3. Detalhamento do Projeto do Sistema em Malha Fechada	
Digital.....	101
4.6.3.1. Introdução.....	101
4.6.3.2. O Computador do Sistema	101
4.6.3.3. A Programação e Simulação do Sistema.....	102
4.6.3.4. O Conversor A/D e D/A do Sistema	102
4.6.3.5. O Controlador PID do Sistema	103
4.6.3.6. A Referência do Sistema.....	103
4.6.3.7. Diagrama em Blocos do Sistema Maglev em	
Malha Fechada Digital	104
4.6.3.8. Detalhamento Prático e Configuração do	
Sistema	105
4.6.3.8.1. Introdução	105
4.6.3.8.2. Descrição Geral.....	105
4.6.3.8.3. Definição do Tempo e Taxa de	
Amostragem do Sistema Real	106
4.6.3.8.4. A Aquisição de Dados do Sistema	
Real	107
4.7. Montagem Mecânica do Protótipo	110
4.8. Custo do Protótipo do Sistema Real.....	112
Capítulo 5 – Identificação do Sistema Real.....	114
5.1. Introdução.....	114
5.2. O Procedimento de Identificação do Sistema Real	115
5.2.1. Visão Geral da Identificação de Sistemas	115
5.2.2. Etapas de Procedimento de Identificação do	
Sistema Real	116

5.2.2.1. Testes Dinâmicos e Coleta de Dados	116
5.2.2.2. Determinação do Tipo e Estrutura do Modelo.....	118
5.2.2.3. Tratamento dos dados adquiridos do Sistema Real.....	119
5.2.2.4. Simulação do Sistema Identificado	122
Capítulo 6 – Resultados.....	123
6.1. Introdução.....	123
6.2. Histórico dos Testes	123
6.3. Resultados do Sistema Calculado.....	125
6.3.1. Diagrama em Blocos para Simulação do Sistema Calculado	125
6.3.2. Formas de Onda obtidas na Simulação do Sistema Calculado	126
6.4. Resultados do Sistema Real	131
6.4.1. Diagrama em Blocos para Implementação do Sistema Real.....	132
6.4.2. Formas de Onda obtidas na Simulação do Sistema Real	132
6.4.2.1. Resultados usando Referência com Onda Quadrada	132
6.4.2.2. Resultados usando Referência com Onda Senoidal.....	136
6.4.2.3. Resultados usando Referência Constante	139
6.5. Resultados do Sistema Identificado	140
6.5.1. Diagrama em Blocos para Simulação do Sistema Identificado	140
6.5.2. Formas de Onda obtidas na Simulação do Sistema Identificado	141
6.6. Comparação Final de Resultados.....	144
Capítulo 7 – Conclusões e Observações Finais	145
7.1. Introdução.....	145
7.2. Conclusões e Observações Finais.....	145

Anexo 1: Guia de Experiências de Laboratório usando o Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética	148
1. Introdução.....	148
2. Estrutura dos Ensaios	148
3. Ensaio de Laboratório N° 1	149
4. Ensaio de Laboratório N° 2	155
5. Ensaio de Laboratório N° 3	161
6. Ensaio de Laboratório N° 4	167
7. Ensaio de Laboratório N° 5	174
8. Ensaio de Laboratório N° 6	181
Referências Bibliográficas	189
1. Referências Bibliográficas	189
2. Referências da Internet.....	192

Resumo

A levitação magnética, também conhecida por suspensão magnética, do inglês Magnetic Levitation ou Magnetic Suspension, abreviada por Maglev, é uma aplicação do princípio físico da atração e repulsão magnética e do equilíbrio de forças atuando sobre um determinado corpo no espaço, ou seja, uma força de origem magnética contrapondo-se a força peso. A levitação magnética possui várias aplicações práticas, tais como em trens ou veículos de alta velocidade movendo-se sem atrito sob trilhos, em túneis de vento, em fornos de indução, rolamentos mecânicos, motores e outras que estão por vir.

Este trabalho visa o projeto e a implementação de um sistema didático para estudos de engenharia de controle utilizando um controle não linear e os conceitos da levitação magnética. O objetivo principal do sistema é levitar uma esfera de aço sob ação de um campo magnético gerado por uma bobina ou eletromagneto, cuja corrente é controlada por um regulador eletrônico incluso em um sistema de controle em malha fechada. A esfera de aço deverá deslocar-se à posição abaixo da bobina e levitar quando o equilíbrio de forças sobre ela for atingido. A distância entre a esfera e a bobina é medida eletronicamente através de sensoriamento óptico e a bobina é excitada por uma corrente elétrica proveniente de um regulador eletrônico conectado a um amplificador de potência.

O trabalho utiliza dois enfoques distintos para análise de sistemas de engenharia de controle: Sistema em Malha fechada Analógico e Digital. Para atingir estas metas o sistema será modelado e simulado utilizando-se os programas Matlab e Simulink, e posteriormente implementado na prática através da montagem de um protótipo.

Para concluir o trabalho, os resultados do protótipo serão comparados com o resultados da simulação do sistema calculado teoricamente. Além disto será utilizada uma técnica de identificação de sistemas para estimar a função de transferência do sistema prático e igualmente utilizar os resultados obtidos para fins de comparação.

Abstract

The magnetic levitation, also known as magnetic suspension and abbreviated by Maglev, is a result of the magnetic attraction, repulsion and forces equilibrium physical principles applied to a determined object in the space under magnetic forces action. The magnetic levitation has several applications like high speed trains moving without friction on a trail, wind tunnels, induction ovens, mechanical bearings and motors.

This work presents the design and implementation of a didactic control system for surveys and researches purposes in the area of analog and digital control engineering considering a non linear system and the magnetic levitation concepts.

The main target of the didactic control system is to levitate a steel ball under a magnetic field action supplied by a coil which current is controlled by an electronic regulator in a closed loop control system. The steel ball displaces up and down under the coil until weight and magnetic forces equilibrium is reached. The distance between the coil and the ball is measured electronically by an optical sensor and the coil current is driven by an electronic regulator connected to a power amplifier.

This work will cover the magnetic levitation system analysis focusing on two distinct control engineering approaches: Analog and Digital Closed Loop Control System. To reach these targets the system will be modeled and simulated through Matlab and Simulink programs usage and then implemented as a practical prototype.

To conclude it the prototype results will be compared with the theoretically calculated system. In addition a system identification technique will be used to estimate the transfer function of the practical system and also use it for comparisons.

Lista de Figuras

1.1. Trem de Alta Velocidade com Tecnologia Maglev.....	2
1.2 Exemplo de Rolamento Magnético	2
2.1. Esquema Básico do Sistema de Levitação Magnética	7
2.2. Diagrama em Blocos do Sistema com Controle Analógico	9
2.3. Diagrama em blocos de um sistema linearizado representado no espaço de estados.....	16
2.4. Diagrama em Blocos do Sistema Maglev com Controle Digital.....	36
3.1. Lugar das Raízes do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética	51
3.2. Comportamento do Sistema Maglev em Malha Aberta ou Malha Fechada Sem Compensador	52
3.3. Lugar da Raízes do Sistema com controlador PID na Malha de Controle	53
3.4. Curva de Reposta do Sistema com Controlador PID quando excitado por uma Função Degrau.....	54
3.5. Lugar da Raízes do Sistema com controlador PID na Malha de Controle	55
3.6. Curva de Reposta do Sistema Compensado com Controlador PID quando excitado por uma Função Degrau	55
3.7. Diagrama em Blocos do Sistema de Controle para Levitação Magnética utilizado no Simulink (Sistema Calculado).....	57
3.8. Formas de Onda da Saída do Sistema Maglev ou do Sinal de Posição da Esfera considerando Simulação do Sistema Calculado.....	58
3.9. Forma de Onda do sinal de Erro do Sistema Maglev de Controle com referência somada à onda quadrada.....	59
3.10. Forma de Onda da Saída do Controlador PID do Sistema Maglev em Malha Fechada.....	60
3.11. Formas de Onda da Saída do Sistema Maglev Posição em mm.....	60
4.1. CLP Allen Bradley	63
4.2. CLP Aromat.....	63

4.3. Sensor de Ultrassom Murata	64
4.4. Sistema Óptico de Medição de Posição com Placa Fotosensível.....	65
4.5. Sensor Óptico Omron com Fibra Óptica Modelo E3X-DA	65
4.6. Fonte de Alimentação Sense Modelo KF-24.....	67
4.7. Primeira Montagem Mecânica do Sistema Didático	67
4.8 Segunda Montagem Mecânica do Sistema Didático	68
4.9. Projeto da Bobina do Sistema Maglev	70
4.10. Bobina com Núcleo de Ferrite utilizada no Sistema Maglev	72
4.11. Bobinas dos Contatores Siemens e Telmeccanique escolhidas para os protótipos do Sistema Maglev.....	74
4.12. Sensor E3X-DA em detalhes	76
4.13. Configuração Elétrica do Sensor E3X-DA com saída PNP	77
4.14. Montagem da Fibra Óptica E32-DC200 Omron no interior da bobina.....	78
4. 15. Curva Característica “ Posição x Tensão Analógica de Saída” do Sensor de Posição E3X-DA com Fibra Óptica E32-DC200	79
4. 16. Princípio de Funcionamento do Sensor Laser com barreira.....	81
4. 17. Sensor Laser LX2-01T/11 com Barreira	82
4. 18. Curva Característica do Sensor Laser com Barreira Modelo LX2-01T/11, Marca Keyence	83
4. 19. Sistema de Medição do Sensor Laser com Barreira.....	84
4.20. Diagrama de Blocos do Sistema Maglev com Controle Analógico	85
4. 21. Circuito Divisor de Tensão para Ajuste da Tensão de Referência.....	86
4.22. Gráfico do Ajuste da Tensão de Referência x Trimpot de Ajuste de Vref....	87
4.23. Circuito de Acoplamento do Sinal do Sensor Óptico Analógico	88
4.24. Circuito Somador.....	89
4.25. Circuito do Controlador PID	90
4.26. Circuito Completo do Controlador PID	92
4.27. Fonte de Corrente controlada por Tensão – Amplificador do Sistema	94
4.28. Montagem do Regulador Analógico em Protoboard.....	94
4.29. Circuito Completo do Regulador Analógico do Sistema Maglev.....	95
4.30. Placa em Circuito Impresso do Regulador Analógico	96
4.31. Detalhamento do Conector Conexel e Trimpots da placa do Regulador Analógico.....	97

4.32. Amplificador de Potência montado separadamente do Regulador Analógico.....	98
4.33. Descrição das Conexões do Circuito Amplificador	98
4.34. Diagrama de Blocos do Sistema Maglev em Malha Fechada Digital	99
4.35. Relação entre a Referência Interna do Sistema Real e a posição da esfera.....	103
4.36. Diagrama em Blocos do Sistema Maglev em Malha Fechada Digital	104
4.37. Definição do Tempo e Taxa de Amostragem para o Sistema Real	107
4.38. Sistema de Aquisição de Dados – Envio para o Workspace	108
4.39. O Ambiente de Desenvolvimento do Projeto	109
4.40. Protótipo Prático do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética	110
4.41. Desenho Mecânico do Protótipo Prático do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética.....	111
5.1. Sinais Básicos para Identificação de um Sistema	115
5.2. Diagrama utilizado para Aquisição de Dados (Foco no Scope Workspace).....	117
5.3. Diagrama em Blocos para Simulação do Sistema Identificado	122
6.1. Diagrama em Blocos do Sistema Calculado utilizado na Simulação do Sistema Calculado	125
6.2. Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela)	126
6.3. Ampliação do Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela) – Sistema Calculado	126
6.4. Ampliação do Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela) com foco na subida e descida da esfera. Sistema Calculado	127
6.5. Detalhe da subida da Esfera - Sistema Calculado Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela)	127
6.6. Detalhe da descida da Esfera - Sistema Calculado Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela)	128
6.7. Posição da Esfera em relação ao posicionamento físico da bobina para o Sistema Calculado	128
6.8 Sinal de Erro do Sistema Calculado	129
6.9 Sinal de Saída do Controlador PID do Sistema Calculado.....	129
6.10. Lugar das Raízes do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética – Sistema Calculado.....	130

6.11.	Diagrama em Blocos do Sistema Real – Protótipo Prático do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética	131
6.12.	Sinal de Posição da Esfera e Sinal de Referência Sinal de Posição (Cor Magenta) ; Sinal de Referência (Cor Amarela	132
6.13.	Sinal de Posição da Esfera e Sinal de Referência – Ampliação Visualização de 2T ; Sinal de Posição (Cor Magenta) ; Sinal de Referência (Cor Amarela)	132
6.14.	Sinal de Posição da Esfera e Sinal de Referência Ampliação com foco na Descida e Subida da Esfera Sinal de Posição (Cor Magenta) ; Sinal de Referência (Cor Amarela)	133
6.15.	Sinal de Posição da Esfera e Sinal de Referência Ampliação – Visualização 1T ; Sinal de Posição (Cor Magenta) Sinal de Referência (Cor Amarela)	133
6.16.	Sinal de Posição da Esfera e Sinal de Referência Ampliação – Visualização 1/2T ; Sinal de Posição (Cor Magenta) Sinal de Referência (Cor Amarela)	134
6.17.	Posição da Esfera em relação ao posicionamento físico da bobina para o Sistema Real.....	134
6.18.	Forma de Onda do Sinal de Erro do Sistema Real.....	135
6.19.	Forma da Saída do Controlador PID (Amarelo) e Forma de Onda do Sinal de Posição (Cor Magenta)	135
6.20.	Forma da Posição da Esfera (Cor Magenta) e Referência Senoidal (Cor Amarela)	136
6.21.	Forma da Posição da Esfera (Cor Magenta) e Referência Senoidal (Cor Amarela) Ampliação 4T	137
6.22.	Forma da Posição da Esfera (Cor Magenta) e Referência Senoidal (Cor Amarela) Ampliação 1T	137
6.23.	Posição da Esfera em relação ao posicionamento físico da bobina para o Sistema Real com Variação Senoidal na Referência.....	138
6.24.	Posição da Esfera em mm e Saída do Controlador PID para o Sistema Real com Variação Senoidal na Referência	138
6.25.	Posição da Esfera em mm e Sinal de Referência Constante para o Sistema Real	139
6.26.	Posição da Esfera com Sinal de Referência Constante e Saída do Controlador PID para o Sistema Real.....	139
6.27.	Posição da Esfera em relação ao posicionamento físico da bobina para o Sistema Real com Referência Constante.	140
6.28.	Diagrama em Blocos para Simulação do Sistema Identificado	141

6.29.	Forma de Onda da Posição da Esfera em mm e o Sinal de Referência para o Sistema Identificado	141
6.30.	Forma de Onda da Posição da Esfera em mm e o Sinal de Referência para o Sistema Identificado – Ampliação 1T	142
6.31.	Forma de Onda da Posição da Esfera em mm e o Sinal de Referência para o Sistema Identificado – Foco na Descida da Esfera.	142
6.32.	Forma de Onda da Posição da Esfera em mm e o Sinal de Referência para o Sistema Identificado – Foco na Subida da Esfera	143
6.33.	Lugar das Raízes do Sistema Identificado.....	143

Lista de Tabelas

4.1. Dados da Curva Característica do Sensor Óptico Analógico com fibra Óptica (Posição x Tensão de Saída).....	78
4.2. Dados para levantamento da Curva Característica do Sensor Laser com Barreira Modelo LX2-01T/11 Marca Keyence.	83
4.3. Ajuste da Tensão de Referência	87
4.4. Levantamento de Custo do Protótipo Prático	112
6.1. Quadro Comparativo de Resultados dos Sistema Calculado, Real e Identificado.....	144

Glossário de Termos

Maglev – Abreviação de “Magnetic Levitation”. Em português, Levitação Magnética.

Conversor A/D e D/A – Conversor Analógico/Digital e Digital/Analógico

F.T.- Função de Transferência

D.C. – Direct Current ou Corrente Contínua

Scope – Osciloscópio do programa Simulink

Workspace – Área de memória utilizada para armazenar dados da aquisição de dados no Simulink.

CD-ROM – Compact Disk - Read Only Memory

RAM – Random Access Memory (Memória de Acesso Aleatório)

PID – Proportional Integral Derivator (Proporcional Integral Derivador)

Dead Beat – Tipo de Controlador Digital

SISO Design Tool – Ferramenta para projeto com Sistemas de uma entrada e uma saída (Single Input Single Output – SISO)

PC – Personal Computer (Computador Pessoal)

HD – Hard Driver

PCI - Padrão de Slot do computador pessoal

ISA – Padrão de Slot do computador pessoal

LASER – Light Amplification Stimulated by Emission Radiation

CPU – Central Processing Unit (Unidade Central de Processamento)

RT – Real Time

RTW – Real Time Workshop

ZOH – Zero Order Hold

ScopeData – Arquivo do Simulink que armazena dados de uma aquisição.

ARX - Modelo Auto Regressivo com Entradas Externas

ARMAX – Modelo Auto Regressivo com Médio Móvel e Entradas Externas

PLC – Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programável)

Capítulo 1

Introdução

Capítulo 1

Introdução

A levitação magnética, também conhecida por suspensão magnética (do inglês, Magnetic Levitation ou Magnetic Suspension, abreviada por Maglev) é uma aplicação do princípio físico da atração e repulsão magnética e do equilíbrio de forças atuando sobre um determinado corpo no espaço. A levitação magnética possui várias aplicações práticas, tais como em trens de alta velocidade que se movem sem atrito sob os trilhos, em túneis de vento, em fornos de indução, rolamentos mecânicos, motores e outras aplicações que estão por vir.

As principais aplicações que desencadearam investimentos de grandes empresas, laboratórios, universidades e centros de pesquisa no mundo todo foram os veículos de transporte e os rolamentos magnéticos. Nestas aplicações a levitação magnética suporta a propulsão de objetos ou veículos através do uso de magnetos que permitem o deslocamento destes sem atrito. As pesquisas destas aplicações estão sendo conduzidas desde 1960 nos Estados Unidos, Inglaterra, Japão e Alemanha [1].

Por volta de 1991 a tecnologia Maglev foi aplicada com sucesso na Inglaterra, onde foi desenvolvido e construído um micro ônibus que transitou na região de Birmingham . Em 1996 a Alemanha aprovou um investimento para a implantação de um trem com tecnologia Maglev previsto para circular entre Berlin e Hamburgo [1].

O grande destaque desta tecnologia aplicada aos trens é a velocidade que pode ser atingida por estes veículos, estimada entre 300 Km/h e 480 Km/h [1]. A figura 1.1. mostra um trem com a tecnologia Maglev.



Fig. 1.1. Trem de Alta Velocidade com Tecnologia Maglev

Outra grande revolução tecnológica alavancada pela levitação magnética é sua aplicação em rolamentos mecânicos, os quais passam a ser denominados rolamentos magnéticos. Neste caso, são incorporados quatro ou mais eletromagnetos para levantar um rotor ferromagnético sem contato, onde a estabilidade é alcançada através de um sistema computadorizado que controla as correntes na bobina do eletromagneto [2].

O controlador utiliza a saída de um sensor de posição para gerar e aplicar, através de um amplificador de potência, uma corrente elétrica adequada ao eletromagneto e então atingir a resposta dinâmica desejada. Em sistemas mais sofisticados o controlador pode compensar automaticamente o desbalanceamento do rotor [2].

A figura 1.2. mostra um rolamento magnético do tipo cônico utilizado para fins de pesquisa que foi projetado pelo Laboratório Nacional Sandia [2].



Fig 1.2. Exemplo de Rolamento Magnético

Outra aplicação que começa a despertar interesse é em motores eólicos em levitação magnética, uma inovação no uso de energia eólica para geração de eletricidade, atualmente em pesquisa na Universidade Federal do Maranhão [3].

No Brasil, a maioria das universidades pesquisam a levitação magnética, destacando-se a UFRJ que desenvolveu um protótipo de um trem Maglev que movimenta-se em um trilho de 7 metros de comprimento. Este desenvolvimento é uma importante conquista para o Brasil, uma vez que apenas sete países pesquisam fortemente a tecnologia Maglev, e que somente Japão e Alemanha tem seus protótipos em tamanho real [4].

Atualmente Japão e Alemanha detém as tecnologias mais avançadas em sistemas de levitação magnética e estimam juntas investimentos de 2 a 3 bilhões de Euros por ano para construir dois traçados Maglev. A previsão de Japão e Alemanha é ter sua primeira linha comercial até 2005, mas a China aparece como pioneira, comprando tecnologia alemã e japonesa, de forma a disponibilizar um trem com tecnologia Maglev em um trajeto de 30 km em Xangai até meados de 2003.

Este trabalho visa o projeto e a implementação de um sistema de controle didático para estudos de engenharia de controle utilizando um sistema não linear e conceitos da levitação magnética. O objetivo principal do sistema de controle didático é levitar uma esfera de aço sob ação de um campo magnético gerado por uma bobina ou eletromagneto, cuja corrente é controlada por um regulador eletrônico em malha fechada. A esfera de aço deverá deslocar-se abaixo da bobina e levitar quando o equilíbrio de forças sobre ela for atingido. A distância entre a esfera e a bobina é medida eletronicamente através de sensoriamento óptico e a bobina é excitada por uma corrente elétrica proveniente de um regulador eletrônico conectado a um amplificador de potência.

O trabalho abrangerá o tema considerando a aplicação de sistemas com controle analógico e digital e utilizará técnicas de simulação e identificação de sistemas através dos programas Matlab e Simulink. A modelagem completa e simulação do sistema serão apresentadas no capítulo 2 e 3.

Um protótipo prático será desenvolvido e apresentado como resultado final do trabalho. A função de transferência do sistema prático será comparada e validada a partir dos resultados do sistema calculado teoricamente e do sistema estimado com base no protótipo.

O histórico de desenvolvimento do protótipo será apresentado no capítulo 4 e descreverá todos os passos que levaram a definição final do sistema, considerando os estudos dos sensores para medição de posição, o projeto do amplificador de potência, a escolha da fonte de alimentação DC, a definição da bobina ou eletromagneto do sistema e detalhes da montagem mecânica.

O capítulo 6 apresentará os resultados práticos dos sistemas real, calculado e estimado, assim como uma comparação detalhada entre eles.

As conclusões, comentários de ordem prática e observações finais documentadas durante todo o desenvolvimento do trabalho serão relatadas no capítulo 7.

Um anexo com o título "guia de laboratório para uso do sistema didático de controle para Levitação Magnética, será apresentado no final deste trabalho e visa orientar ao usuário na utilização adequada do sistema.

Capítulo 2

Modelagem do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética

Capítulo 2

Modelagem do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética

2.1. Modelagem de Sistemas

2.1.1. Introdução

A modelagem matemática de um sistema dinâmico é definida pelo conjunto de equações que representa a dinâmica de seu comportamento, as quais são normalmente do tipo diferencial e podem ser obtidas com base nas leis físicas pertinentes aos mesmos [Ogata.1977, p.544] .

O sistema a ser analisado e desenvolvido neste trabalho baseia-se na utilização de uma bobina ou eletromagneto, a qual excitada por uma corrente i , gera um campo magnético H e por conseqüência uma força magnética que atrai uma esfera de aço de massa m . Quando há equilíbrio das forças peso e magnética que agem sobre a esfera, ocorre a levitação. A modelagem fornecerá as equações matemáticas que regem o comportamento dinâmico deste sistema.

2.1.2 Metodologia para Modelagem do Sistema Maglev

Neste trabalho será utilizada uma seqüência de etapas para que a modelagem do sistema seja desenvolvida de forma organizada e clara. A modelagem será desenvolvida partir do equacionamento básico do sistema e posteriormente, serão atribuídos valores práticos às variáveis envolvidas para então executar a simulação do mesmo através dos programas Matlab e Simulink [8], [5] .

2.1.2.1 Etapas para a Modelagem do Sistema com Controle Analógico

As etapas descritas abaixo serão seguidas e desenvolvidas para a modelagem do sistema de Levitação Magnética (Maglev) com controle analógico.

- Obtenção das Variáveis e Equações de Estado.
- Linearização do sistema a partir das equações de estado de sistemas não lineares. Obtenção da equação linear e dos coeficientes matriciais do vetor de estado e do sinal de entrada.
- Obtenção da Equação Característica do Sistema.
- Obtenção dos Autovalores ou Raízes da Equação Característica.
- Obtenção da Matriz de Transição de Estados.
- Obtenção da Função de Transferência do Sistema.
- Obtenção das Matrizes de Controlabilidade e Observabilidade.

2.1.2.2 Etapas para Modelagem do Sistema com Controle Digital.

A modelagem do sistema Maglev com controle digital inicia a partir de sua função de transferência no domínio da frequência, a qual é convertida para o domínio Z em função da amostragem dos sinais do sistema.

O sistema prevê o projeto, simulação e uso de um regulador digital, por exemplo do sistema do tipo Dead Beat ou PID, cujo desenvolvimento não será abordado neste trabalho e fica como sugestão para uma próxima dissertação [6].

As etapas básicas desta modelagem são mostradas a seguir:

- Desenvolvimento da FT com inclusão do termo Conversor A/D & D/A.
- Aplicação da Transformada Z.

- Determinação da FT $G(z)$.
- Determinação da equação do Regulador Dead Beat.
- Diagrama em Blocos do Sistema.

2.1.2.3 Modelagem Alternativa para o Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética

A modelagem do sistema real prevê a utilização de parâmetros e grandezas físicas dos componentes efetivos do sistema didático Maglev. No capítulo 4 será descrito em detalhes o histórico do desenvolvimento e a definição de cada componente do sistema real. O equacionamento matemático desenvolvido no tópico 2.1.2.1. servirá de base para esta abordagem [6].

2.2. Descrição e Equacionamento Básico do Sistema

Seja o sistema representado pela figura 2.1:

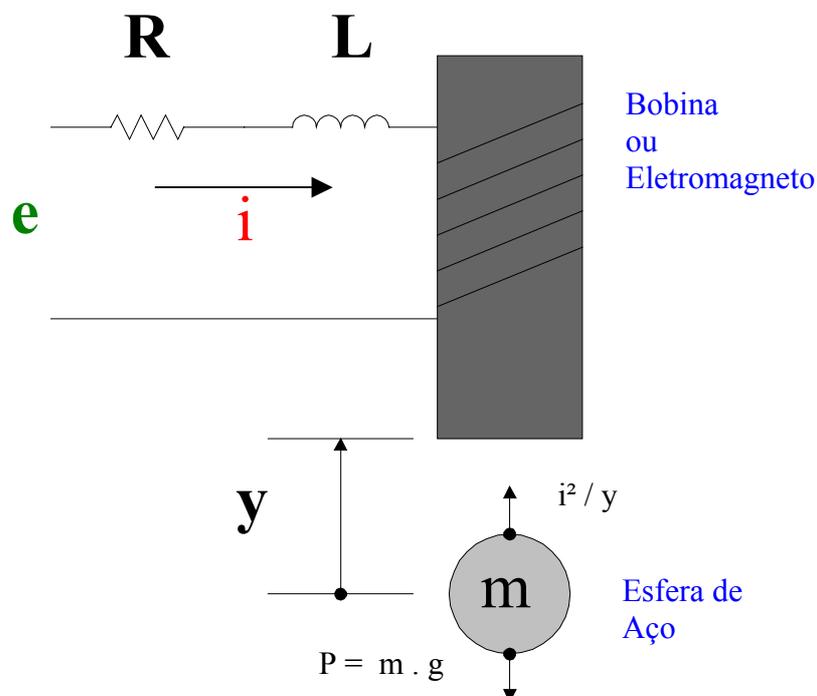


Fig. 2.1 - Esquema Básico do Sistema de Levitação Magnética

Onde:

- R representa a resistência elétrica bobina.
- L representa a indutância da bobina.
- y representa a distância entre a esfera de aço e a bobina.
- i é a corrente elétrica que circula pela bobina.
- e é tensão de excitação da bobina.
- g é a aceleração da gravidade.
- m é a massa da esfera de aço
- P é o peso da esfera de aço.

Na figura 2.1 observa-se que a bobina ou eletromagneto, L, é excitada por uma corrente i, a qual gera um campo magnético H com intensidade proporcional a corrente, o qual impõe uma força de origem magnética à esfera de aço. Esta força é diretamente proporcional ao quadrado da corrente i e inversamente proporcional ao deslocamento da mesma. Se não há controle e a a força magnética é maior que o peso da esfera, observa-se a atração desta e conseqüente movimento desta em direção à bobina. [Kuo. 1995, p.183], [7] .

As equações básicas do circuito da fig.1 são dadas por:

$$F = m \cdot a \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

F = Força

m = Massa

a = Aceleração

As equações diferenciais do sistema são obtidas a seguir, através do avaliação das forças que atuam na esfera e das tensões em cada componente:

$$m \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt} = m \cdot g - k \cdot \left(\frac{i(t)^2}{y(t)} \right) \quad (\text{eq. 2})$$

A tensão de entrada do circuito é dada por:

$$e(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{eq. 3})$$

Do ponto de vista de engenharia de controle este sistema é não linear e instável sem realimentação, ou seja o deslocamento teórico da esfera em direção à bobina tende a infinito nesta condição, limitado na prática pela instalação física da mesma.

Um sistema realimentado prevê que a posição da esfera seja medida e gere um sinal elétrico, que adequadamente tratado, controle a corrente aplicada à bobina, atuando assim no campo magnético gerado, e portanto no controle da força magnética aplicada à esfera, de forma a provocar e controlar seu deslocamento vertical em direção à bobina. A posição de equilíbrio da esfera no espaço será resultado da atuação de um regulador eletrônico ou compensador e do atendimento das condições de contorno básicas do sistema [12].

A figura 2.2 mostra o diagrama de um sistema analógico de controle em malha fechada necessário para levitar a esfera, o qual será detalhado a posteriori.

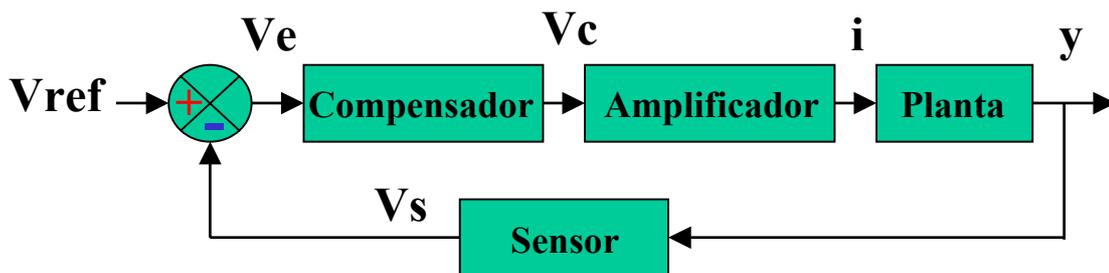


Fig. 2.2 - Diagrama em Blocos do Sistema com Controle Analógico para Levitação Magnética

Onde:

V_{ref} é a tensão de referência do sistema.

V_e é a tensão de erro do sistema.

V_c é o sinal de saída do compensador.

V_s é o sinal de saída do sensor de posição.

i é a corrente que excita a bobina.

y é a posição da esfera.

Sistemas dinâmicos podem ser classificados em lineares e não lineares, estes últimos definidos quando o princípio da superposição não é aplicável, podendo ser variantes ou não no tempo, em malha aberta, isto é, sem realimentação, ou em malha fechada. A teoria de controle convencional ou clássica trata dos sistemas lineares, monovariáveis, isto é, com uma entrada e uma saída, e invariantes no tempo. Por outro lado, a teoria de controle moderno aplica-se aos sistemas lineares e não lineares, variantes ou não variantes no tempo, mono ou multivariáveis. Até pouco tempo uma grande diferença entre as duas metodologias de análise de sistema de controle é que a teoria moderna enfoca a análise no domínio do tempo, enquanto a convencional no domínio da frequência complexa, porém atualmente já é usual uso de ambos os domínios [Ogata. 1997, p.571].

Neste trabalho será utilizado a teoria de controle moderno, mais especificamente a modelagem no espaço de estados. Esta metodologia prevê a definição dos estados, das variáveis de estado, de vetores de estado, do espaço de estados e das equações no espaço de estados, além de abranger o conceito de linearização de equações de estado.

O estado de um sistema dinâmico é o menor conjunto de valores de variáveis que definem comportamento do sistema, considerando que tais valores são conhecidos para $t = t_0$ e que o sinal de entrada também é conhecido para $t \geq t_0$. Tais variáveis são chamadas de variáveis de estado. O vetor de estado é um vetor que contém todas as variáveis de estado que definem o comportamento de um sistema. O espaço de estados trata-se de um espaço dimensional em que qualquer estado pode ser representado por um ponto neste mesmo espaço [Ogata.1997, p.642].

Um sistema dinâmico com número finito de elementos é normalmente representado por equações diferenciais em que o tempo é a variável independente. Se os elementos do vetor são um conjunto de variáveis de estado, e estão contidos nas equações matriciais vetoriais do sistema, tais equações são denominadas equações no espaço de estado [Ogata. 1997, p.734].

Quanto a linearização de sistemas não lineares pode-se dizer que é possível aproximar-se um sistema não linear de um sistema linear invariante no tempo, quando o mesmo é analisado em torno do ponto de operação de equilíbrio, considerando que os sinais envolvidos são pequenos. Desta forma um sistema não linear é equivalente a um sistema linear dentro uma faixa de operação limitada [Kuo. 1995, p.200], [Sinha & Kuszta. 1983, p51-75, p121-131]. Neste trabalho, será aplicada e desenvolvida a técnica de linearização de sistemas não lineares.

2.3. Modelagem do Sistema Maglev com Controle Analógico

2.3.1. Obtenção das Variáveis de Estado

As variáveis de estado são definidas a partir das equações básicas do sistema, as quais já foram apresentadas no item 2.1 e são as dadas pelas equações (1),(2) e (3).

Pode-se definir que:

$$x_1(t) = y(t) \quad (\text{eq. 4})$$

$$x_2(t) = \frac{dy(t)}{dt} \quad (\text{eq. 5})$$

$$x_3(t) = i(t) \quad (\text{eq. 6})$$

onde:

$x_1 = y$ representa a posição da esfera.

x_2 representa a velocidade de deslocamento da esfera.

$x_3 = i$ representa a corrente que excita a bobina.

As equações de estado são dadas por:

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{dy(t)}{dt} = x_2(t) \quad (\text{eq. 7})$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = \frac{d^2y(t)}{dt^2} \quad (\text{eq. 8})$$

Da equação 2, vem:

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = g - \frac{k}{m \cdot \left(\frac{i(t)^2}{y(t)} \right)} \quad (\text{eq. 9})$$

De acordo com equação (6), $i(t) = x_3$, logo:

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = g - \frac{k}{m \cdot \left(\frac{x_3(t)^2}{y(t)} \right)} \quad (\text{eq. 10})$$

Da equação 3, obtém-se o valor de $\frac{di(t)}{dt}$:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{e(t)}{L} + \frac{R}{L} \cdot i(t) \quad (\text{eq. 11})$$

Como $i(t) = x_3(t)$, equação 6, tem-se:

$$\frac{dx_3(t)}{dt} = \frac{e(t)}{L} + \frac{R}{L} \cdot x_3(t) \quad (\text{eq. 12})$$

A saída do sistema é $y(t) = x_1(t)$ (eq. 13)

2.3.2. Linearização do Sistema

A linearização de sistemas não lineares permite aplicar métodos de análise linear que produzem informações fundamentais sobre o comportamento do sistema. O procedimento da linearização de sistemas não lineares utiliza a expansão da função não linear em série de Taylor, em torno do ponto de operação do sistema, com a retenção apenas do termo linear, isto é, os termos de mais alta ordem da série são desprezados em função de seus pequenos valores em torno do ponto de operação [Ogata. 1997, p.650], [Kuo. 1995, p.330].

Seja o ponto de operação em que $x_1(t) = x_{01}$; $e(t) = e_0(t)$, correspondente ao ponto de equilíbrio da esfera no espaço, onde a força magnética é igual ao peso. Considere também a forma geral de um sistema não linear, representado por uma equação matricial vetorial de estados do tipo:

$$\frac{dx(t)}{dt} - f(x(t), e(t)) = 0 \quad (\text{eq. 14})$$

Considerando as igualdades abaixo no ponto de equilíbrio, vem:

$$x_1(t) = x_{01}(t) = y(t) \quad (\text{eq. 15})$$

$$e(t) = e_0(t) \quad (\text{eq.16})$$

O deslocamento da esfera é função do sinal de entrada da planta e de sua posição, no ponto de operação:

$$x_{1e} = x_e(t) = f(x_{01}, e_0) \quad (\text{eq. 17})$$

Expandindo em série de Taylor, vem:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) = & f(x_{01}, e_0) + \left[\frac{\partial f}{\partial x_1} \Big|_{\substack{e=e_0 \\ x_1=x_{01}}} (x - x_0) + \frac{\partial f}{\partial e} \Big|_{\substack{e=e_0 \\ x_1=x_{01}}} (e - e_0) \right] + \\ & + \frac{1}{2!} \cdot \left[\frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} \Big|_{\substack{e=e_0 \\ x_1=x_{01}}} (x_1 - x_{01})^2 + 2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial e} \Big|_{\substack{e=e_0 \\ x_1=x_{01}}} (x_1 - x_{01})(e - e_0) + \frac{\partial^2 f}{\partial e^2} \Big|_{\substack{e=e_0 \\ x_1=x_{01}}} (e - e_0) \right] + \dots \end{aligned} \quad (\text{eq. 18})$$

Desprezando os termos de mais alta ordem da série de Taylor, tem-se [Demidovitch. 1977, p328], [Barzack.1977, p109], [Castrucci & Curti. 1981, p118] :

$$\dot{x}_1(t) = f(x_{01}, e_0) + \left[\frac{\partial f}{\partial x_1} \Big|_{\substack{e=e_0 \\ x_1=x_{01}}} (x_1 - x_0) + \frac{\partial f}{\partial e} \Big|_{\substack{e=e_0 \\ x_1=x_{01}}} (e - e_0) \right] \quad (\text{eq. 19})$$

Como:

$$y(t) = x_1 \quad (\text{eq. 20})$$

e

$$y_0(t) = x_{01}(t) = f(x_{01}, e_0) \quad (\text{eq. 21})$$

Pode-se escrever a equação de $\dot{\Delta x}_1$, considerando os coeficientes matriciais, A e B, a serem definidos na seqüência:

$$\dot{x}_1 - \dot{x}_{01} = A * (x_1 - x_{01}) + B * (e - e_0) \quad (\text{eq. 22})$$

Onde :

$$\Delta x_1 = x_1 - x_{01} \quad (\text{eq. 23})$$

$$\Delta e = e - e_0 \quad (\text{eq. 24})$$

$$\Delta \dot{x}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{01} \quad (\text{eq. 25})$$

$$\dot{x}_{01} = f(x_{01}, e_0) \quad (\text{eq. 26})$$

Assim sendo, a equação (25) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\Delta \dot{x}_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Big|_{\substack{e=e_0 \\ x_1=x_{01}}} (x_1 - x_0) \Big|_{x_0, e_0} \cdot \Delta x_1 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial e} \Big|_{\substack{e=e_0 \\ x_1=x_{01}}} (e - e_0) \Big|_{x_0, e_0} \cdot \Delta e \quad (\text{eq. 27})$$

O resultado é a equação matricial vetorial geral linearizada descrita a seguir:

$$\dot{\Delta x}_1 = A^* \Delta x_1 + B^* \Delta e \quad (\text{eq. 28})$$

onde os coeficientes matriciais da equação são:

$$A^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 29})$$

$$B^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial e_1} & \frac{\partial f_1}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial e_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial e_1} & \frac{\partial f_2}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial e_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial e_1} & \frac{\partial f_n}{\partial e_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial e_n} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 30})$$

De forma geral um sistema de controle linearizado é representado pelas equações abaixo:

$$\dot{x} = A.x + B.e \quad (\text{eq. 31})$$

$$y = C.x + D.e \quad (\text{eq. 32})$$

onde:

x = vetor de estado

A é a matriz de estado

B é matriz de entrada

C é a matriz de saída

D é a matriz de transmissão direta

e é o sinal de controle escalar ou sinal de entrada

y é a saída do sistema referente à posição da esfera.

A seguir apresenta-se o diagrama de blocos do sistema linearizado, contínuo no tempo e representado no espaço de estados:

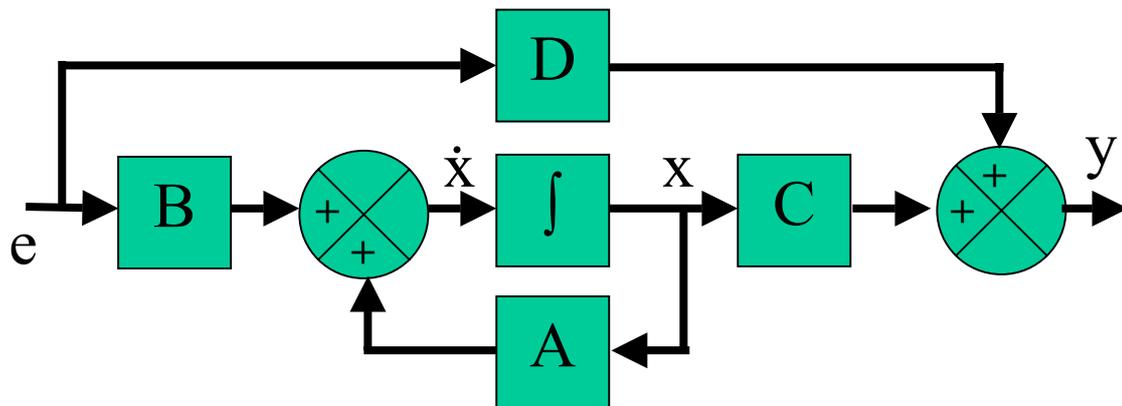


Fig 2.3. Diagrama em blocos de um sistema linearizado representado no espaço de estados.

Adequando o resultado da linearização das equações de estado ao sistema Maglev, e considerando o ponto de operação no equilíbrio, em que as variáveis são representadas com índice 0 (zero), define-se :

$$y_0(t) = x_{01}(t) \quad (\text{eq. 33})$$

$$x_{02}(t) = \frac{dx_{01}(t)}{dt} = 0 \quad (\text{eq. 34})$$

$$\frac{d^2 y_0(t)}{dt} = 0 \quad (\text{eq. 35})$$

Substituindo na equação 1, vem:

$$m \cdot \frac{d^2 y_0(t)}{dt} = m \cdot g - \frac{i(t)^2}{y_0(t)} \quad (\text{eq. 36})$$

O valor de $i(t)$ é obtido a partir da equação 36, como segue:

$$i(t) = \sqrt{m \cdot g \cdot x_{01}} = x_{03}(t) \quad (\text{eq. 37})$$

Com isto, determina-se a matriz de estado e a matriz de entrada, A e B, respectivamente:

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{x_{03}^2}{m \cdot x_{01}^2} & 0 & -2 \cdot \frac{x_{03}}{m \cdot x_{01}} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 38})$$

Substituindo a relação obtida pela equação 37, obtém-se a seguinte matriz de estado:

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{x_{01}} & 0 & -2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 39})$$

onde g é aceleração da gravidade, 9.81 m/s^2 (Sistema Internacional de Unidades).

A matriz de entrada é dada por:

$$B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ L \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 40})$$

A matriz de saída é dada por:

$$C^* = [1 \ 0 \ 0] \quad (\text{eq. 41})$$

A matriz de transmissão de saída é nula.

$$D^* = 0 \quad (\text{eq. 42})$$

Assim sendo, a equação do sistema linearizado no método por estado de estados, resulta:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{x_{01}} & 0 & -2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ L \end{bmatrix} \cdot e \quad (\text{eq. 43})$$

$$C^* = [1 \ 0 \ 0] \quad (\text{eq. 44})$$

2.3.3. Obtenção da Equação Característica do Sistema

A equação característica pode ser obtida utilizando-se o método analítico e determinando-se $|sI - A^*|$, onde I é a matriz identidade, e A* a matriz de estados do sistema.

Desta forma, tem-se:

$$|sI - A^*| = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{x_{01}} & 0 & -2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 45})$$

Desenvolvendo a equação 45, vem:

$$|sI - A^*| = \begin{bmatrix} s & -1 & 0 \\ -\frac{g}{x_{01}} & 0 & -2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 46})$$

Resolvendo o determinante da matriz, obtém-se a equação característica do sistema de levitação magnética de uma esfera de massa m , conforme mostra a equação 47.

$$s^3 + \frac{R}{L} \cdot s^2 - \frac{g}{x_{01}} \cdot s - \frac{g \cdot R}{L \cdot x_{01}} = 0 \quad (\text{eq. 47})$$

onde:

R é resistência interna da bobina

L é a indutância da bobina

g é a aceleração da gravidade (9.81m/s^2)

x_{01} é a posição de equilíbrio da esfera

2.3.4. Obtenção dos Autovalores ou Raízes da Equação Característica.

A equação característica é do terceiro grau e requer um método para sua solução. Para uma equação cúbica na sua forma geral, ou seja do tipo $a_3z^3 + a_2z^2 + a_1z + a_0 = 0$, em que a_3 , a_2 , a_1 e a_0 são seus coeficientes, considere as seguintes variáveis, q e r , definidas como a seguir [Philips & Nagle. 1990, p.265]:

$$q = \frac{(3 \cdot a_1 - a_2^2)}{9} \quad (\text{eq. 48})$$

$$r = \frac{(9 \cdot a_2 \cdot a_1 - 27 \cdot a_0 - 2 \cdot a_2^3)}{54} \quad (\text{eq. 49})$$

Seja a variável $D = q^3 + r^2$. Pode-se provar que há três condições possíveis relativas às raízes deste tipo de equação [4].

Se $D > 0$, a equação tem uma raiz real e duas complexas

Se $D < 0$, a equação tem três raízes reais

Se $D = 0$, a equação tem uma raiz tripla ou uma dupla dependendo de seus coeficientes [4].

A simulação de valores práticos mostra que o valor de D é negativo para o sistema Maglev, e por este motivo considera-se a condição $D < 0$ para dar continuidade a modelagem matemática deste sistema, ou seja com três raízes reais.

Identificando os coeficientes na equação (47), vem:

$$\begin{aligned} a_3 &= 1 & a_2 &= \frac{R}{L} \\ a_1 &= -\frac{g}{x_{01}} & a_0 &= -\frac{g \cdot R}{L} \end{aligned}$$

Com estes valores, calcula-se os valores de q e r:

$$q = \frac{(-3 \cdot g \cdot L^2 - R^2 \cdot x_{01})}{9 \cdot x_{01} \cdot L^2} \quad (\text{eq. 50})$$

$$r = \frac{(-9 \cdot R \cdot g \cdot L^2 + 27 \cdot R \cdot g \cdot x_{01} \cdot L^2 - 2 \cdot R^3 \cdot x_{01})}{54 \cdot x_{01} \cdot L^3} \quad (\text{eq. 51})$$

Assim sendo, para $D < 0$, as raízes da equação características são dadas por:

$$s_1 = 2 \cdot \left[- \left(\frac{-3 \cdot g \cdot L^2 - R^2 \cdot x_{01}}{9 \cdot x_{01} \cdot L^2} \right) \right] \cdot \cos\left(\frac{\theta}{3}\right) - \frac{1}{3} \cdot \frac{R}{L} \quad (\text{eq. 52})$$

$$s_2 = 2 \cdot \left[- \left(\frac{-3 \cdot g \cdot L^2 - R^2 \cdot x_{01}}{9 \cdot x_{01} \cdot L^2} \right) \right] \cdot \cos\left(\frac{\theta + 2\pi}{3}\right) - \frac{1}{3} \cdot \frac{R}{L} \quad (\text{eq. 53})$$

$$s_3 = 2 \cdot \left[- \left(\frac{-3 \cdot g \cdot L^2 - R^2 \cdot x_{01}}{9 \cdot x_{01} \cdot L^2} \right) \right] \cdot \cos\left(\frac{\theta + 4\pi}{3}\right) - \frac{1}{3} \cdot \frac{R}{L} \quad (\text{eq. 54})$$

onde: $\theta = \cos^{-1} \left[\frac{r}{\sqrt{-q^3}} \right] \quad (\text{eq. 55})$

2.3.5. Obtenção da Matriz de Transição de Estados

A matriz de transição de estados Φ é obtida através da transformada inversa de Laplace da matriz inversa que gera a equação característica, isto é, $|sI - A^*|^{-1}$.

$$\Phi(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[|sI - A^*|^{-1} \right] = \mathcal{L}^{-1} \left[\begin{array}{ccc} s & -1 & 0 \\ -\frac{g}{x_{01}} & 0 & 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ 0 & 0 & s + \frac{R}{L} \end{array} \right]^{-1} \quad (\text{eq. 56})$$

A matriz inversa de $|sI - A^*|$ é calculada da seguinte forma:

$$|sI - A^*|^{-1} = \left[\frac{1}{(s + s_1)(s + s_2)(s + s_3)} \right] \cdot H \quad (\text{eq. 57})$$

onde, H é uma matriz dada por:

$$H = - \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} s & 2\sqrt{\frac{g}{m.x_{01}}} \\ 0 & s + \frac{R}{L} \end{bmatrix} & - \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & s + \frac{R}{L} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ s & 2\sqrt{\frac{g}{m.x_{01}}} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -\frac{g}{x_{01}} & 2\sqrt{\frac{g}{m.x_{01}}} \\ 0 & s + \frac{R}{L} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s + \frac{R}{L} \end{bmatrix} & - \begin{bmatrix} s & 0 \\ -\frac{g}{x_{01}} & 2\sqrt{\frac{g}{m.x_{01}}} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -\frac{g}{x_{01}} & s \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} s & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} s & -1 \\ -\frac{g}{x_{01}} & s \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (\text{eq.58})$$

Calculando-se o determinante das matrizes de segunda ordem da matriz H, obtém-se :

$$|sI - A^*|^{-1} = \frac{1}{(s + s_1)(s + s_2)(s + s_3)} \cdot \begin{bmatrix} s \left(s + \frac{R}{L} \right) & s + \frac{R}{L} & -2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m.x_{01}}} \\ \frac{g}{x_{01}} \cdot \left(s + \frac{R}{L} \right) & s \left(s + \frac{R}{L} \right) & -2s \cdot \sqrt{\frac{g}{m.x_{01}}} \\ 0 & 0 & s^2 - \frac{g}{x_{01}} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 59})$$

Com o resultado do desenvolvimento da equação (59), obtém-se a equação final da matriz de transição de estados $\Phi(t)$:

$$\Phi(t) = |sI - A^*|^{-1} \Big|_{s=s_1} \cdot e^{s_1 \cdot t} + |sI - A^*|^{-1} \Big|_{s=s_2} \cdot e^{s_2 \cdot t} + |sI - A^*|^{-1} \Big|_{s=s_3} \cdot e^{s_3 \cdot t} \quad (\text{eq. 60})$$

2.3.6 Obtenção da Função de Transferência do Sistema.

A função de transferência do sistema pode ser obtida a partir das equações no espaço de estado, como segue.

Seja $G(s) = Y(s) / E(s)$, onde $G(s)$ é a função de transferência que relaciona a Transformada de Laplace da entrada e da saída do sistema. Considerando as equações (31) e (32), que representam o equacionamento de um sistema em malha fechada no espaço de estado, e aplicando-se a Transformada de Laplace, obtém-se:

$$s.X(s) - x(0) = A.X(s) + B.E(s) \quad (\text{eq. 61})$$

$$Y(s) = C.X(s) + D.E(s) \quad (\text{eq. 62})$$

Considerando $X(s)$ em evidência na equação (61) e $x(0) = 0$, vem:

$$(sI - A).X(s) = B.E(s) \quad (\text{eq. 63})$$

Multiplicando-se ambos os termos da equação (63) por $(sI - A)^{-1}$, tem-se:

$$X(s) = (sI - A)^{-1}.B.E(s) \quad (\text{eq. 64})$$

Substituindo a equação (64) na equação (62), resulta:

$$Y(s) = C.(sI - A)^{-1}.B.E(s) + D.E(s) \quad (\text{eq. 65})$$

Rearranjando, vem:

$$Y(s) = (B.C.(sI - A)^{-1} + D)E(s) \quad (\text{eq. 66})$$

Logo,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = (B \cdot C(sI - A)^{-1} + D) \quad (\text{eq. 67})$$

A equação (67) mostra a função de transferência do sistema em função das matrizes coeficientes das equações no espaço de estados. A função de transferência do sistema de levitação magnética de uma esfera de aço de massa m é obtida da seguinte forma:

Substitui-se os valores das matrizes na equação (67), o que resulta:

$$G(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot (sI - A)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 68})$$

Substituindo-se a equação (59) na equação (68), resulta

$$G(s) = \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{-2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}}}{(s + s_1)(s + s_2)(s + s_3)} \right] \quad (\text{eq. 69})$$

2.3.7 Obtenção da Matriz de Controlabilidade do Sistema.

A matriz de controlabilidade permite concluir se um sistema é controlável ou completamente controlável. Tais conceitos foram desenvolvidos por Kalman [Ogata. 1997, p.550] e afirma que um sistema é controlável em um instante t_0 se for possível transferir o sistema de qualquer estado inicial $x(t_0)$ para qualquer outro estado em um intervalo de tempo finito, através de um vetor de controle não restrito [Ogata. 1997, p.552].

Este conceito auxilia no projeto de sistemas de controle, pois assegura a existência de solução para um problema de controle ótimo, caso o sistema seja controlável, e também prediz a possibilidade da não existência de solução, caso o sistema não seja controlável [Ogata. 1997, p.555].

Um sistema é dito completamente controlável se todo estado for controlável em um período de tempo finito, $t_0 \leq t \leq t_1$.

Seja a equação:

$$\dot{x} = A.x + B.E \quad (\text{eq. 70})$$

O sistema dado pela equação (70) é de estado completamente controlável, se e somente se, os vetores $B, AB, \dots, A^{n-1}B$ ou a matriz $n \times n$ forem linearmente independentes.

Ou seja,

$$\left[B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1}B \right] \quad (\text{eq. 71})$$

A matriz da equação (71) é chamada de matriz de controlabilidade. Para determinar se um sistema é completamente controlável deve-se achar a matriz de controlabilidade e checar se a mesma é singular, isto é se possui seu determinante igual a zero, ou não singular. Se for singular o sistema não é completamente controlável, caso contrário, é completamente controlável.

Para o sistema de levitação magnética, tem-se:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{x_{01}} & 0 & -2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 72})$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 73})$$

A partir da equação (71), calcula-se a matriz de controlabilidade :

$$A.B = \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ \frac{R}{L^2} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 74})$$

$$A.AB = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{x_{01}} & 0 & 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ 0 & 0 & \frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2}{L} \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ -\frac{R}{L^2} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 75})$$

$$A.AB = \begin{bmatrix} -\frac{2}{L} \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ \frac{2 \cdot R}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ \frac{R^2}{L^3} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 76})$$

Desta forma, a matriz de controlabilidade resulta :

$$[B \ | \ AB \ | \ A^2B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{2}{L} \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ 0 & -\frac{2}{L} \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} & \frac{2 \cdot R}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ \frac{1}{L} & -\frac{R}{L^2} & \frac{R^2}{L^3} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 77})$$

2.3.8 Obtenção das Matrizes de Observabilidade do Sistema.

A observabilidade de um sistema é um conceito que possibilita a determinação de todo estado inicial $x(t_0)$ a partir da observação da saída $y(t)$ durante um intervalo de tempo finito, $t_0 \leq t \leq t_1$. Este conceito tem grande aplicação em sistemas realimentados quando há necessidade de se estimar variáveis de estado não mensuráveis ou não acessíveis para uma medição direta.

Seja um sistema descrito pela equações a seguir:

$$\dot{x} = A \cdot x \quad (\text{eq. 78})$$

$$y = C \cdot x \quad (\text{eq. 79})$$

Pode-se provar que o sistema é completamente observável se, dada uma saída $y(t)$ durante um intervalo de tempo $t_0 \leq t \leq t_1$, $x(0)$ é unicamente determinado, se e apenas se, a matriz $n \times nm$, mostrada na equação (80), apresentar característica n , ou tiver n vetores coluna linearmente independentes. Esta matriz é conhecida como Matriz de Observabilidade.

$$\begin{bmatrix} C \\ \dots \\ CA \\ \dots \\ \cdot \\ \cdot \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 80})$$

A observabilidade depende de qual variável é definida para a saída. No caso do sistema de levitação magnética, tem-se três situações para análise:

a.) $y(t) = x(t)$, onde a saída é a posição da esfera de aço de massa m , cujo valor é dado por $C = [1 \ 0 \ 0]$. Deste modo, a matriz de observabilidade resulta:

$$\begin{bmatrix} C \\ \dots \\ CA \\ \dots \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{x_{01}} & 0 & -2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 81})$$

b.) $y(t) = \frac{dx(t)}{dt}$, onde a saída é a velocidade de deslocamento da esfera de massa m , cujo valor é dado por $C = [0 \ 1 \ 0]$. Deste modo a matriz de observabilidade resulta:

$$\begin{bmatrix} C \\ \dots \\ CA \\ \dots \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{x_{01}} & 0 & -2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \\ 0 & \frac{g}{x_{01}} & -\frac{2 \cdot R}{L} \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 82})$$

c.) $y(t) = i(t)$, onde a saída é a corrente de excitação da bobina geradora do campo magnético e da força magnética que atua sobre a esfera de massa m , cujo valor é dado por $C = [0 \ 0 \ 1]$. Deste modo a matriz de observabilidade resulta:

$$\begin{bmatrix} C \\ \dots \\ CA \\ \dots \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \\ 0 & 0 & \frac{R^2}{L^2} \end{bmatrix} \quad (\text{eq. 83})$$

2.4. Modelagem do Sistema Maglev com Controle Digital

2.4.1. Introdução

O sistema Maglev com controle digital prevê o uso de um controlador digital, por exemplo do tipo Dead Beat ou PID, em malha fechada. A modelagem deve prever o equacionamento do controlador, da planta e do sistema.

Este trabalho abrangerá a determinação da função de transferência da planta no domínio Z, contudo, o projeto e simulação do controlador digital fica como sugestão para outro tema de dissertação.

2.4.2. Determinação da FT do Sistema no domínio Z

A função de transferência no domínio Z é determinada a partir da equação 69, ou seja através da função de transferência do sistema no domínio da frequência, $G(s)$, dada por:

$$G(s) = \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{-2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m \cdot x_{01}}}}{(s + s_1)(s + s_2)(s + s_3)} \right] \quad (\text{eq. 84})$$

Esta equação será fundamental para o equacionamento completo do sistema em malha fechada com controle digital, assim como para o projeto do regulador digital, tipo Dead Beat ou PID, e para a estabilização do sistema nestas condições. Para obtenção desta equação o primeiro passo é introduzir o efeito de amostragem através do termo ZOH [Katz. 1981, p38], [Rolf. 1989, p97], [Jacquot. 1995, p235 e p367], [Franklin & Powell. 1980, p131-171] .

Assim sendo, introduzindo o termo ZOH referente a um conversor D/A na equação (84) e rearranjando a equação vem:

$$G(s) = \frac{(1 - e^{-T \cdot s})}{s} \cdot \left[\frac{A}{(s + s_1)} + \frac{B}{(s + s_2)} + \frac{C}{(s + s_3)} \right] \quad (\text{eq. 85})$$

Onde:

T é o período de Amostragem.

A, B e C são termos que a serem determinados segundo a metodologia mostrada a seguir.

Analisando apenas os termos em que aparecem os numeradores A, B e C, e comparando com a equação característica, igualando-os, resulta em :

$$A.(s + s_2).(s + s_3) + B.(s + s_1).(s + s_3) + C.(s + s_1).(s + s_2) = \frac{-2.\sqrt{\frac{g}{m.x_{01}}}}{L} \quad (\text{eq. 86})$$

Trabalhando os termos, obtém-se:

$$\begin{aligned} &A.s^2 + A.s.s_3 + A.s.s_2 + A.s_2.s_3 + B.s^2 + B.s.s_1 + B.s.s_3 + B.s_1.s_3 + \\ &+ C.s^2 + C.s.s_2 + C.s.s_1 + C.s_1.s_2 = \frac{-2.\sqrt{\frac{g}{m.x_{01}}}}{L} \end{aligned} \quad (\text{eq. 87})$$

Assim vem:

$$\begin{aligned} &s^2.(A + B + C) + s.(A.s_3 + A.s_2 + B.s_3 + B.s_1 + C.s_2 + C.s_1) + \\ &+ A.s_2.s_3 + B.s_1.s_3 + C.s_1.s_2 = \frac{-2.\sqrt{\frac{g}{m.x_{01}}}}{L} \end{aligned} \quad (\text{eq. 88})$$

Comparando e igualando termo a termo, conclui-se que:

$$A + B + C = 0 \quad (\text{eq. 89})$$

$$A.s_3 + A.s_2 + B.s_3 + B.s_1 + C.s_2 + C.s_1 = 0 \quad (\text{eq. 90})$$

$$A.s_2.s_3 + B.s_1.s_3 + C.s_1.s_2 = \frac{-2.\sqrt{\frac{g}{m.x_{01}}}}{L} \quad (\text{eq. 91})$$

Conhecendo-se as raízes da equação característica, s_1 , s_2 e s_3 , a massa da esfera de aço, m , e a distância de equilíbrio, x_{01} , calcula-se os numeradores A, B e C.

Com isto, substituindo-se os coeficientes na equação da função de transferência, reescreve-se a equação da seguinte forma :

$$G(s) = (1 - e^{T.s}) \left[\frac{A}{s.(s + s_1)} + \frac{B}{s.(s + s_2)} + \frac{C}{s(s + s_3)} \right] \quad (\text{eq. 92})$$

A equação (92) ainda pode ser reescrita da forma abaixo:

$$G(s) = (1 - e^{T.s}) \left[\frac{A}{s_1} \cdot \frac{s_1}{(s + s_1)} + \frac{B}{s_2} \cdot \frac{s_2}{(s + s_2)} + \frac{C}{s_3} \cdot \frac{s_3}{(s + s_3)} \right] \quad (\text{eq. 93})$$

Para determinar a função de transferência no domínio Z, aplica-se a transformada Z na equação (93), e obtém-se:

$$G(z) = \frac{(z-1)}{z} \cdot \left[\frac{\frac{A}{s_1} \cdot (1 - e^{-s_1.T}) \cdot z}{(z-1)(z - e^{-s_1.T})} + \frac{\frac{B}{s_2} \cdot (1 - e^{-s_2.T}) \cdot z}{(z-1)(z - e^{-s_2.T})} + \frac{\frac{C}{s_3} \cdot (1 - e^{-s_3.T}) \cdot z}{(z-1)(z - e^{-s_3.T})} \right] \quad (\text{eq. 94})$$

Simplificando a equação 94, tem-se:

$$G(z) = \frac{\frac{A}{s_1} \cdot (1 - e^{-s_1 T})}{(z - e^{-s_1 T})} + \frac{\frac{B}{s_2} \cdot (1 - e^{-s_2 T})}{(z - e^{-s_2 T})} + \frac{\frac{C}{s_3} \cdot (1 - e^{-s_3 T})}{(z - e^{-s_3 T})} \quad (\text{eq. 95})$$

Na seqüência desenvolve-se a equação (95), obtendo-se:

$$G(z) = \frac{\left(\left(\frac{A}{s_1} \cdot (1 - e^{-s_1 T}) \cdot (z - e^{-s_2 T}) \cdot (z - e^{-s_3 T}) \right) + \left(\frac{B}{s_1} \cdot (1 - e^{-s_2 T}) \cdot (z - e^{-s_1 T}) \cdot (z - e^{-s_3 T}) \right) + \left(\frac{C}{s_3} \cdot (1 - e^{-s_3 T}) \cdot (z - e^{-s_1 T}) \cdot (z - e^{-s_2 T}) \right) \right)}{(z - e^{-s_1 T})(z - e^{-s_2 T})(z - e^{-s_3 T})} \quad (\text{eq. 96})$$

Desenvolvendo o numerador e o denominador da equação (96), vem:

$$G(z) = \frac{\left(\left(\frac{A}{s_1} \cdot (1 - e^{-s_1 T}) \cdot (z^2 - z \cdot e^{-s_3 T} - z \cdot e^{-s_2 T} + e^{-s_3 T} \cdot e^{-s_2 T}) \right) + \left(\frac{B}{s_2} \cdot (1 - e^{-s_2 T}) \cdot (z^2 - z \cdot e^{-s_3 T} - z \cdot e^{-s_1 T} + e^{-s_1 T} \cdot e^{-s_3 T}) \right) + \left(\frac{C}{s_3} \cdot (1 - e^{-s_3 T}) \cdot (z^2 - z \cdot e^{-s_2 T} - z \cdot e^{-s_1 T} + e^{-s_1 T} \cdot e^{-s_2 T}) \right) \right)}{(z^3 - z^2 \cdot (e^{-s_1 T} + e^{-s_2 T} + e^{-s_3 T}) + z \cdot (e^{-s_1 T} \cdot e^{-s_2 T} + e^{-s_1 T} \cdot e^{-s_3 T}) - (e^{-s_1 T} \cdot e^{-s_2 T} \cdot e^{-s_3 T}))} \quad (\text{eq. 97})$$

Trabalhando os termos, vem:

$$G(z) = \frac{\left(\begin{array}{l} \left(\frac{A}{s_1} \cdot (1 - e^{-s_1 T}) + \frac{B}{s_2} \cdot (1 - e^{-s_2 T}) + \frac{C}{s_3} \cdot (1 - e^{-s_3 T}) \right) \cdot z^2 + \\ - \left(\frac{A}{s_1} \cdot (1 - e^{-s_1 T}) \cdot (e^{-s_3 T} + e^{-s_2 T}) + \frac{B}{s_2} \cdot (1 - e^{-s_2 T}) (e^{-s_1 T} + e^{-s_3 T}) + \right. \\ \left. + \frac{C}{s_3} \cdot (1 - e^{-s_3 T}) (e^{-s_1 T} + e^{-s_2 T}) \right) \cdot z + \\ + \left(\frac{A}{s_1} \cdot (1 - e^{-s_1 T}) (e^{-s_3 T} + e^{-s_2 T}) + \frac{B}{s_2} \cdot (1 - e^{-s_2 T}) (e^{-s_1 T} + e^{-s_3 T}) + \right. \\ \left. + \frac{C}{s_3} \cdot (1 - e^{-s_3 T}) (e^{-s_1 T} + e^{-s_2 T}) \right) \end{array} \right)}{\left(z^3 - z^2 \cdot (e^{-s_1 T} + e^{-s_2 T} + e^{-s_3 T}) + z \cdot (e^{-s_1 T} \cdot e^{-s_2 T} + e^{-s_1 T} \cdot e^{-s_3 T}) - (e^{-s_1 T} \cdot e^{-s_2 T} \cdot e^{-s_3 T}) \right)}$$

(eq. 98)

A equação (98) é a função de transferência da planta no domínio Z [Franklin & Powell. 1980, p131-171], [Jacquot. 1995, p235 e p367] . O próximo passo é o equacionamento do controlador digital e do sistema em malha fechada, tema já proposto para uma próxima dissertação.

2.4.3. Diagrama em Blocos do Sistema com Controle Digital

A figura 2.4 mostra o diagrama em blocos básico do Sistema com Controle Digital, o qual poderá ser utilizado para uma simulação. Tal como já comentado, este estudo fica proposta para uma futura dissertação.

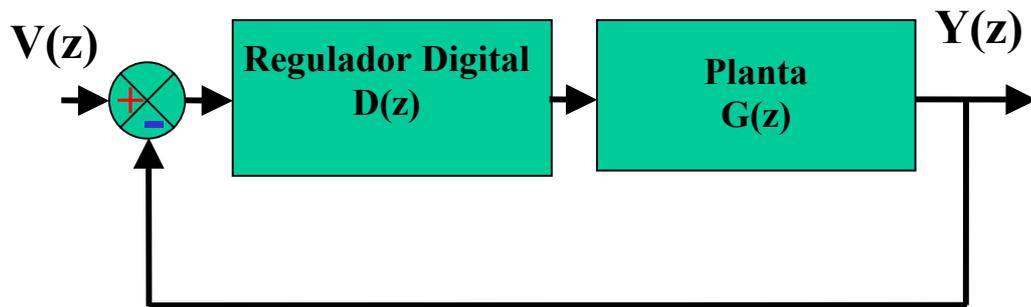


Fig. 2.4. Diagrama em Blocos do Sistema Maglev com Controle Digital

2.5. Modelagem Alternativa para o Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética

2.5.1. Introdução

Este tópico visa a obtenção de um modelo mais preciso para sistema real e utilizará os resultados das simulações para validar o protótipo prático. A diferença básica entre o que foi desenvolvido no item 2.1.2.1. e esta modelagem alternativa é a utilização de grandezas e parâmetros reais de cada componente utilizado no protótipo, tais como as F.T.'s do sensor de posição, do compensador e do amplificador.

O capítulo 4 mostrará que o sensor de posição escolhido é do tipo óptico e possui um feixe de luz que será interrompido pela esfera de aço, de forma que quando a esfera tende a distanciar da bobina a saída do sensor tende a aumentar. A saída do sensor de posição é realimentada e através de um compensador, gera o sinal de controle para o amplificador de corrente alimentar a bobina do sistema.

2.5.2. Desenvolvimento da Modelagem Alternativa

Para definição deste modelo para sistema real deve-se entender que as variáveis de interesse são: posição ou distância entre esfera e bobina, denominada por x , corrente na bobina, denominada por i , e a velocidade da esfera. A análise inicia-se pela determinação da força magnética que atua sobre a esfera de aço.

A força gerada pela bobina, f , é dada por [Sharian & Hassul, 1993, p.455] :

$$f = -\frac{i^2}{2} \cdot \frac{dL}{dx} \quad (\text{eq. 112})$$

onde:

L é a indutância total no sistema.

A esfera suspensa no campo magnético afeta o valor da indutância da bobina no sistema. Quando a esfera aproxima-se da bobina, a indutância total aumenta e quando a esfera afasta-se a indutância total diminui, atingindo um valor mínimo quando a esfera aproxima-se do infinito. Este valor mínimo é, naturalmente, a indutância da bobina [Houpis & Lamont. 1987, p.473], [Thaler & Brown. 1960, p.251].

Assim sendo, a indutância total é dada por:

$$L = L_1 + \frac{L_0 \cdot x_0}{x} \quad (\text{eq. 113})$$

onde:

L_1 é a indutância da bobina na ausência da esfera.

L_0 é a indutância adicional adicionada pela presença da esfera no campo.

Derivando a equação (113) para obter o termo $\frac{dL}{dx}$ da equação (112), e na seqüência substituindo este valor na equação da força magnética, vem:

$$f = -\frac{i^2}{2} \cdot \left(\frac{-L_0 \cdot x_0}{x^2} \right) = \frac{L_0 \cdot x_0}{2} \cdot \left(\frac{i}{x} \right)^2 \quad (\text{eq. 114})$$

Se for atribuindo o valor de uma constante $C = \frac{L_0 \cdot x_0}{2}$, tem-se:

$$f = C \cdot \left(\frac{i}{x} \right)^2 \quad (\text{eq. 115})$$

onde o valor da constante C é determinada experimentalmente.

Para produzir um modelo rastreável, há necessidade de linearizar a equação da força, de forma a obter:

$$f = C \cdot \left(\frac{I_0}{X_0} \right)^2 + \left(\frac{2 \cdot C \cdot I_0}{X_0} \right) \cdot i - \left(\frac{2 \cdot C \cdot I_0^2}{X_0^3} \right) \cdot x \quad (\text{eq. 116})$$

onde:

I_0 e X_0 são os valores de equilíbrio para estas variáveis.

i e x são entendidos como variáveis incrementais.

Sabendo que no equilíbrio a força magnética na esfera iguala à força gravitacional, define-se f_0 como a força magnética no equilíbrio, a qual é dada por:

$$f_0 = C \left(\frac{I_0}{X_0} \right)^2 = m \cdot g \quad (\text{eq. 117})$$

onde:

m é a massa da esfera de aço.

É importante observar que esta equação permite determinar experimentalmente o valor da constante C .

Sabendo que o interesse é controlar as variáveis incrementais para manter a esfera na posição de equilíbrio, lineariza-se o sistema e calcula-se $f_1 = f - f_0$, seguindo o seguinte raciocínio:

$$f_1 = f - f_0 = K_1 \cdot (x - X_0) + K_2 \cdot (i - I_0) \quad (\text{eq. 118})$$

No equilíbrio, vem:

$$f = f_0 + K_1 \cdot x + K_2 \cdot i \quad (\text{eq. 119})$$

onde:

$$f_0 = f(x, i) \quad (\text{eq. 120})$$

$$K_1 = \left. \frac{\partial}{\partial x} f(x, i) \right|_{x = X_0; i = I_0} \quad (\text{eq. 121})$$

$$K_2 = \left. \frac{\partial}{\partial i} f(x, i) \right|_{x = X_0; i = I_0} \quad (\text{eq. 122})$$

Calculando f_0, K_1 e K_2 , vem:

$$f_0 = C \cdot \frac{I_0^2}{X_0^2} = m \cdot g \quad (\text{eq. 123})$$

$$K_1 = \frac{\partial}{\partial x} C \cdot \left(\frac{i}{x}\right)^2 = -\frac{2 \cdot C \cdot i^2}{x^3} \Big|_{x = X_0; i = I_0} \quad (\text{eq. 124})$$

então:

$$K_1 = -\frac{2 \cdot C \cdot I_0^2}{X_0^3} \quad (\text{eq. 125})$$

$$K_2 = \frac{\partial}{\partial i} C \cdot \left(\frac{i}{x}\right)^2 = \frac{2 \cdot C \cdot i}{x^2} \Big|_{x = X_0; i = I_0} \quad (\text{eq. 126})$$

então:

$$K_2 = \frac{2 \cdot C \cdot I_0}{X_0^2} \quad (\text{eq. 127})$$

Logo, com base na equação (118), vem:

$$f_1 = \left(\frac{2 \cdot C \cdot I_0}{X_0^2}\right) \cdot i - \left(\frac{2 \cdot C \cdot I_0^2}{X_0^3}\right) \cdot x \quad (\text{eq. 128})$$

O equacionamento da parte elétrica referente à bobina é obtido considerando que o modelo desta é um circuito série resistor-indutor, onde a esfera já é considerada no conjunto uma vez que afeta a indutância total em função da distância em relação à bobina. A relação tensão-corrente na bobina é dada por:

$$v = R.i + L(x) \cdot \frac{di}{dt} \quad (\text{eq. 129})$$

Esta equação é considerada complicada devido à dependência da indutância em função da posição da esfera. Assim sendo, uma simplificação pode ser feita assumindo que quando o sistema for adequadamente projetado, a esfera será mantida próxima da posição de equilíbrio, isto é, $x = x_0$. Isto significa que $L(x)$ é simplesmente $L_1 + L_0$. Adicionalmente considera-se que a indutância inerente da bobina, L_1 , é muito maior que a indutância incremental devido à posição da bobina, L_0 , o que permite então escrever:

$$v = R.i + L_1 \cdot \frac{di}{dt} \quad (\text{eq. 130})$$

A equação de movimento da esfera deriva da relação familiar entre a aceleração de um corpo e o somatório das forças que agem sobre este corpo.

Logo:

$$m \cdot \ddot{x} = -f_1 \quad (\text{eq. 131})$$

onde:

m é a massa da esfera.

O modelo para o sensor de posição é um elemento de ganho simples como será mostrado no capítulo 4.

$$v_s = \beta \cdot x \quad (\text{eq. 132})$$

onde:

v_s é a tensão de saída do sensor de posição

β é o ganho entre a posição da esfera e a tensão de saída do sensor, determinado experimentalmente.

Aplicando a transformada de Laplace nas equações do sistema, podemos afirmar que:

$$I(s) = \frac{V(s)}{R + s \cdot L_1} \quad (\text{eq. 133})$$

$$F_1(s) = \left(\frac{2 \cdot C \cdot I_0}{X_0^2} \right) \cdot I(s) - \left(\frac{2 \cdot C \cdot I_0^2}{X_0^3} \right) \cdot X(s) \quad (\text{eq. 134})$$

$$X(s) = -\frac{1}{m \cdot s^2} \cdot F_1(s) \quad (\text{eq. 135})$$

$$V_s(s) = \beta \cdot X(s) \quad (\text{eq. 136})$$

Para obter a função de transferência $G(s) = \frac{V_s(s)}{V(s)}$ do sistema real substitui-se as equações (136) e (133) em $G(s)$, obtendo-se:

$$G(s) = \frac{V_s(s)}{V(s)} = \frac{\beta \cdot X(s)}{I(s)(R + sL_1)} = \frac{\beta \cdot X(s)}{L_1 \cdot I(s) \left(s + \frac{R}{L_1} \right)} \quad (\text{eq. 137})$$

Igualando o valor de $F_1(s)$ nas equações (134) e (135), pode-se obter o valor de $X(s)$, como segue:

$$F_1(s) = \left(\frac{2 \cdot C \cdot I_0}{X_0^2} \right) \cdot I(s) - \left(\frac{2 \cdot C \cdot I_0^2}{X_0^3} \right) \cdot X(s) = -m \cdot s^2 \cdot X(s) \quad (\text{eq. 138})$$

$$\frac{2 \cdot C \cdot I_0}{X_0^2} \cdot I(s) = \left(-m \cdot s^2 + \frac{2 \cdot C \cdot I_0^2}{X_0^3} \right) \cdot X(s) \quad (\text{eq. 139})$$

Extraindo o valor de $X(s)$, vem :

$$X(s) = \frac{-\left(\frac{2 \cdot C \cdot I_0}{X_0^2} \right) \cdot I(s)}{m \cdot \left(s^2 - \frac{2 \cdot C \cdot I_0^2}{m \cdot X_0^3} \right)} \quad (\text{eq. 140})$$

Substituindo o valor de $X(s)$ em $G(s)$, na equação (137), vem:

$$G(s) = \beta \cdot \frac{\left(\frac{-2.C.I_0}{X_0^2} \right) \cdot I(s)}{m \cdot \left(s^2 - \frac{2.C.I_0^2}{m.X_0^3} \right)} \cdot \frac{1}{L_1 \cdot I(s) \left(s + \frac{R}{L_1} \right)} \quad (\text{eq. 141})$$

Simplificando a equação (141), tem-se:

$$G(s) = - \frac{\left(\frac{2.\beta.C.I_0}{X_0^2.m.L_1} \right)}{\left(s + \frac{R}{L_1} \right) \cdot \left(s^2 - \frac{2.C.I_0^2}{m.X_0^3} \right)} \quad (\text{eq. 142})$$

A equação (142) representa a função de transferência do sistema real e será utilizada como a equação da planta para fins de projeto do sistema de controle analógico e digital [5].

No sistema real a indutância e resistência da bobina são medidas através de uma ponte RLC devidamente calibrada. A posição de equilíbrio, X_0 , é definida pelo projetista e é dado do projeto, cuja definição deve ser feita considerando a largura do feixe de luz do sensor de posição [5]. Uma esfera de aço de massa conhecida será utilizada, cujo massa deverá ser medida com uma balança de precisão calibrada. A corrente I_0 é determinada de forma prática, colocando-se a esfera na posição X_0 , e com uma fonte de alimentação aplicar tensão na bobina de forma a determinar a corrente que provoca o início do movimento de atração da esfera pela bobina, a qual é I_0 . A constante C é calculada pela equação (117), como segue:

$$C = \left(\frac{X_0}{I_0} \right)^2 . m . g \quad (\text{eq. 143})$$

Por último, a constante do sensor β é determinada pelo deslocamento da esfera em uma faixa de posição conhecida e a medida da saída analógica do sensor de posição. Uma curva é levantada e a constante determinada [Shahian. 1993, p.455], [Dorf. 1980, p326-370] .

Com todos estes parâmetros e variáveis determinados a F.T. é calculada para o sistema real viabilizando então as simulações, ajustes dos controladores e medidas práticas. Este procedimento será mostrado no capítulo 3 através do programa Matlab e Simulink.

Capítulo 3

Simulação do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética

Capítulo 3

Simulação do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética

3.1. Simulação de Sistemas

3.1.1. Introdução

A simulação a partir da modelagem e a obtenção do comportamento dinâmico do sistema fornecem informações essenciais para execução de projetos em sistemas de controle.

Os programas Matlab e Simulink serão utilizados para execução da simulação do sistema, para o tratamento matemático, para solução das equações do sistema e para abordagem de engenharia de controle, ressaltando que esta última contempla basicamente a obtenção do lugar das raízes, as respostas dinâmicas referentes a diferentes excitações de entrada e a simulação com distintas técnicas de compensação.

O procedimento básico para simular um sistema consiste na edição de um arquivo com extensão m, típico do programa Matlab, o qual contém o equacionamento do sistema, sua execução e a obtenção dos resultados desejados, tais como: lugar das raízes, raízes da equação característica do sistema, função de transferência, etc.

Um outro caminho é elaborar o diagrama em blocos do sistema e simulá-lo diretamente através dos recursos do programa Simulink, o qual além de permitir uma simulação com respostas a diferentes sinais de entrada, também fornece o registro das formas de onda nos vários pontos de interesse.

Neste trabalho a simulação é executada considerando uma bobina de indutância igual a 220 mH com 27Ω de resistência interna, distância de equilíbrio igual a $8 \cdot 10^{-3}$ m e uma esfera de aço de massa igual a $55 \cdot 10^{-3}$ Kg, cujo procedimento de simulação combina as duas técnicas descritas acima.

3.2. Simulação do Sistema Didático de Controle para Maglev

3.2.1. Introdução

A partir dos valores obtidos para o sistema real e do equacionamento básico implementado no arquivo maglev.m no programa Matlab, simula-se o sistema em malha aberta e malha fechada. Inicialmente será obtido o lugar das raízes e seu comportamento em resposta a uma função degrau em malha aberta. De forma análoga é feito para o sistema em malha fechada, onde um compensador é definido e introduzido na malha com o objetivo de estabilizar o sistema.

É relevante observar que existe um sinal negativo no numerador da função de transferência do sistema, o qual é decorrência do comportamento físico deste e será eliminado matematicamente multiplicando-se por -1. Este cálculo é realizado no arquivo maglev.m e move o gráfico do lugar das raízes para o 2º e 3º quadrantes, contudo mantém a condição de instabilidade dada pela presença de um pólo à direita do eixo das ordenadas.

Na prática, a inversão dos terminais da bobina ou a utilização de um amplificador com ganho -1 na malha de controle permite a obtenção deste efeito. Fisicamente, o sinal negativo na função de transferência mostra que há uma tendência da posição da esfera aumentar em relação à bobina a medida que a força magnética, que compensa seu peso, decresce. Haverá um ponto de equilíbrio em que a esfera levita.

3.2.2. Simulação do Sistema Maglev sem Compensador

Nesta simulação, utilizou-se os seguintes valores obtidos para o sistema real:

Indutância da Bobina (L)	:	220 mH
Resistência Interna da Bobina (R)	:	27 Ω
Massa da Esfera de Aço	:	$55 \cdot 10^{-3}$ Kg
Distância de Equilíbrio	:	$8 \cdot 10^{-3}$ m
Aceleração da Gravidade (g)	:	9,81 m/s ²

A seguir apresenta-se o conteúdo do arquivo maglev.m, já editado com o equacionamento básico do sistema e com a definição dos valores dos componentes práticos do sistema real.

Na seqüência, roda-se este arquivo no programa Matlab de forma a obter a função de transferência, as raízes da equação característica e a determinação do lugar das raízes para este sistema.

3.2.2.1. Listagem do Arquivo Maglev.m editado no Programa Matlab 6

Arquivo **Maglev.m** (Programa Matlab)

```

% Funções da Planta do Sistema Maglev
% MAGLEV = Sistema Suspensão ou Levitação Magnética
% Curso de Mestrado em Eng. Elétrica - EFEI
% Orientador: Prof. Luiz Eduardo Borges
% Aluno: Helder José Celani de Souza
% Arquivo: Maglev_s01
% Tipo: Matlab Simulation
% Data: Maio/2001 / Atualização: Outubro/2002

% Parâmetros
% massa da esfera de aço
m = 55e-3 % dado em Kg

% Aceleração da Gravidade
g = 981e-2 % dado em m/s^2

% Resistência da Bobina utilizada no sistema
R = 27 % dado em ohms

% Indutância da Bobina utilizada no sistema
L = 220e-3 % dado em Henry

% Distância no ponto de equilíbrio
x0 = 8e-3 % posição de equilíbrio dada em m

i0 = 0.63 % corrente de equilíbrio dada em A

% Cálculo da Constante do Sistema
Const=(x0^2/i0^2)*m*g

Beta=400 % FT do Sensor dada em V/m

% Fator de Ganho que multiplica o Numerador da Função de
Transferência
k= -(2*Beta*Const*i0)/(m*L*x0^2)

% Numerador da FT
num=[]

% Denominador da FT
den=[-R/L -sqrt(2*Const*(i0^2)/(m*(x0^3)) )
sqrt(2*Const*(i0^2)/(m*(x0^3)) )]

% Criação do sistema em malha fechada
sys = zpk(num,den,k)

% FT da Planta
sys=Tf(sys)

% Cálculo e Localização do Lugar das Raízes
rltool (sys);

```

3.2.2.2. Resultados da Execução do Arquivo Maglev.m no Matlab

Raízes da Equação Característica:

ans =
- 122,73
+ 49,52
- 49,52

Numerador da Função de Transferência:

Const = $8,7002 \cdot 10^{-5}$
 $I_0 = 0.6300$ A
Beta = 400 V/m
 $k = -5,6623 \cdot 10^4$
num = [1]

Denominador da Função de Transferência:

den = [-122,73 -49,52 49,52]

Função de Transferência:

$$G(s) = \frac{-56623,38}{s^3 + 122,73s^2 - 2453s - 3,01 \cdot 10^5}$$

Na forma Zero/Pólo/Ganho:

$$G(s) = \frac{-5.662e004}{(s + 122,73)(s + 49,52)(s - 49,52)}$$

3.2.2.3. Determinação do Lugar das Raízes e Respostas do Sistema

O comando `rltool` permite obter o lugar das raízes do sistema e posicionar pólos e zeros com o objetivo de estabilizar o sistema, conforme mostrado na fig 3.1.

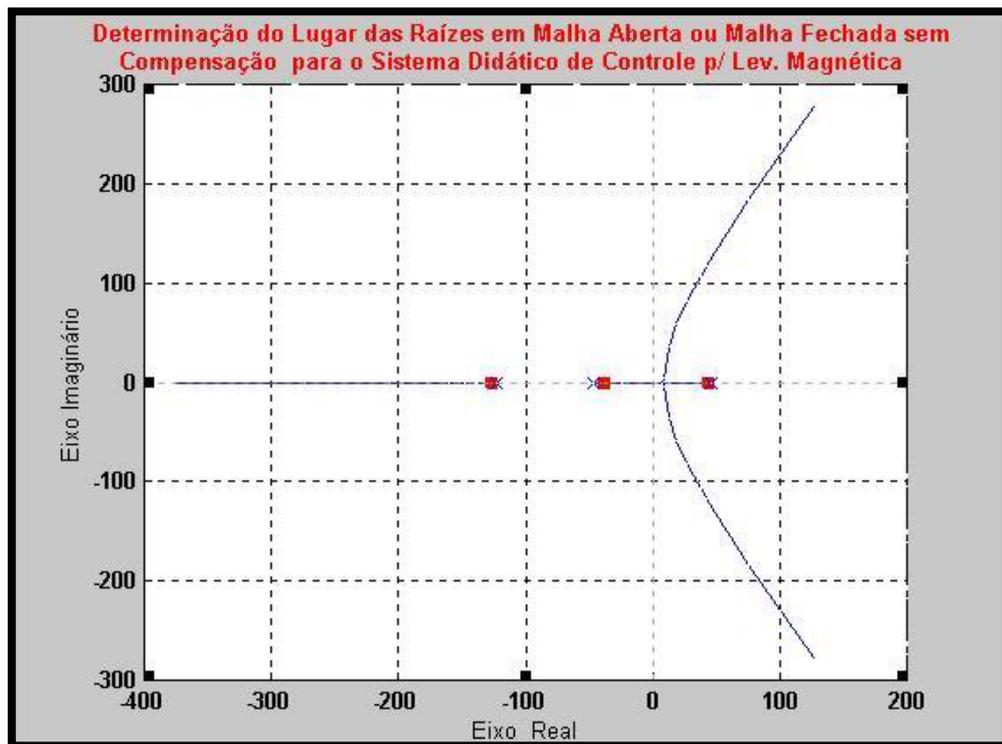


Fig. 3.1 - Lugar das Raízes do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética

Observa-se que o sistema é instável, uma vez que apresenta um pólo à direita do eixo das ordenadas. No total são três pólos, sendo dois à esquerda do eixo das ordenadas, localizados em $-49,52$ e $-122,73$, e outro à direita em $+49,52$. O objetivo é estabilizar o sistema através de um regulador eletrônico, de modo que o lugar das raízes e o ponto de operação do sistema seja posicionado no lado esquerdo do eixo y do gráfico.

Antes de posicionar os pólos e zeros do regulador eletrônico verifica-se o comportamento do sistema em malha aberta em resposta a uma excitação do tipo degrau.

Quando o sistema está instável e em malha aberta, ou em malha fechada sem compensador, a tendência da esfera é ser atraída fortemente pelo campo magnético gerado pela bobina sem apresentar condições de controle em torno do ponto de equilíbrio, ou seja a amplitude do sinal de saída do sistema tende a infinito. Na prática, a esfera irá deslocar-se em direção ao núcleo da bobina, batendo neste e permanecendo atraída. A figura 3.2 mostra esta situação, através da aplicação de um degrau positivo no sistema.

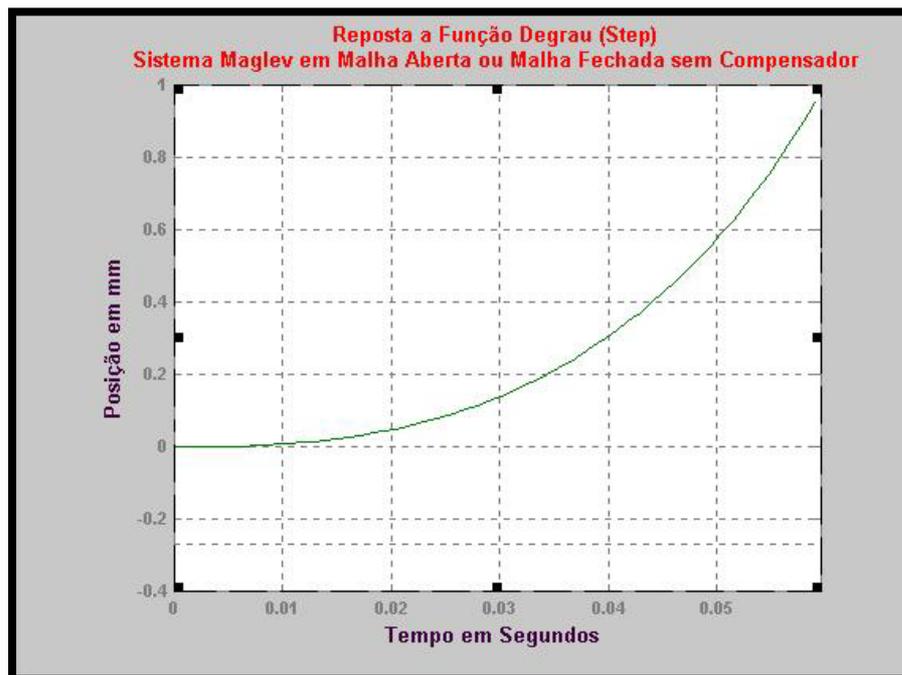


Fig. 3.2.- Comportamento do Sistema Maglev em Malha Aberta ou Malha Fechada Sem Compensador

O próximo passo da simulação do sistema didático de controle para Levitação Magnética é a introdução de um regulador ou compensador eletrônico na malha de controle e estabilizar o sistema.

3.3. Simulação do Sistema Maglev com Compensador

A ferramenta SISO DESIGN TOOL, mais especificamente o comando rltool do programa Matlab permite a inserção de pólos e zeros diretamente no gráfico lugar das raízes e de imediato verificar se o sistema estabiliza com o tipo de compensação realizada.

Será utilizado um controlador PID, sintonizado com base nas regras de Ziegler-Nichols [Ogata, 1997, p.545) e através de experimentos práticos, tendo sido obtido os seguintes parâmetros: $K_i = 0,001$; $K_p = 4$ e $K_d = 0,12$. Isto permite dizer que um pólo e um zero serão introduzidos na origem e um zero em -33 .

A figura 3.3. mostra o lugar da raízes após a introdução dos pólos e zeros do controlador PID, considerando ganho igual a 1.

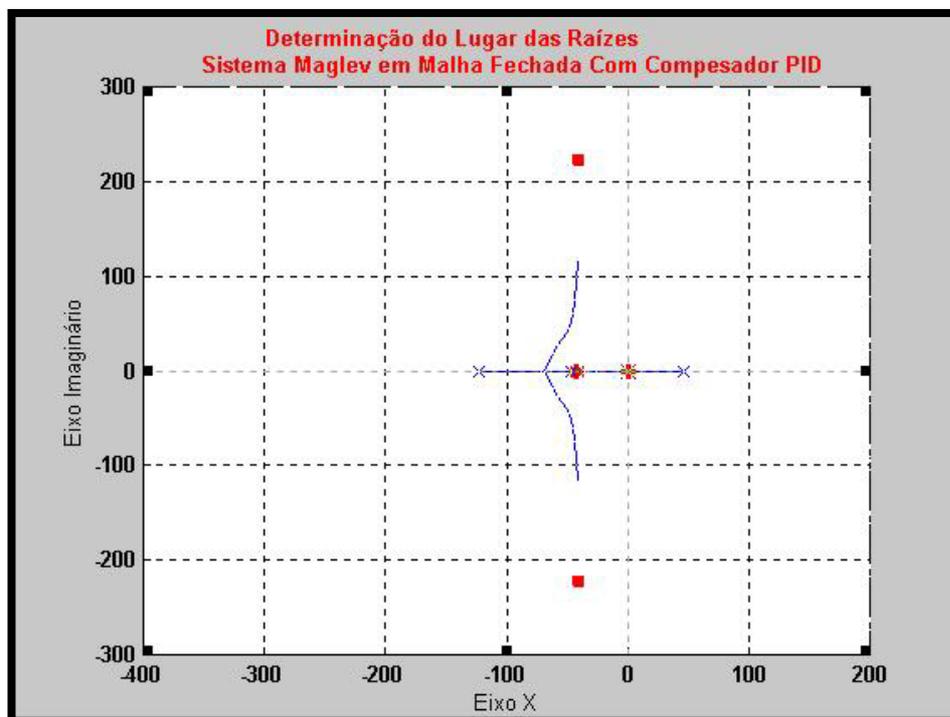


Fig. 3.3. Lugar da Raízes do Sistema com controlador PID na Malha de Controle

A figura 3.4. mostra a resposta a um função tipo degrau (positivo) do sistema compensado com um controlador PID, considerando ganho do compensador ajustado para 1.

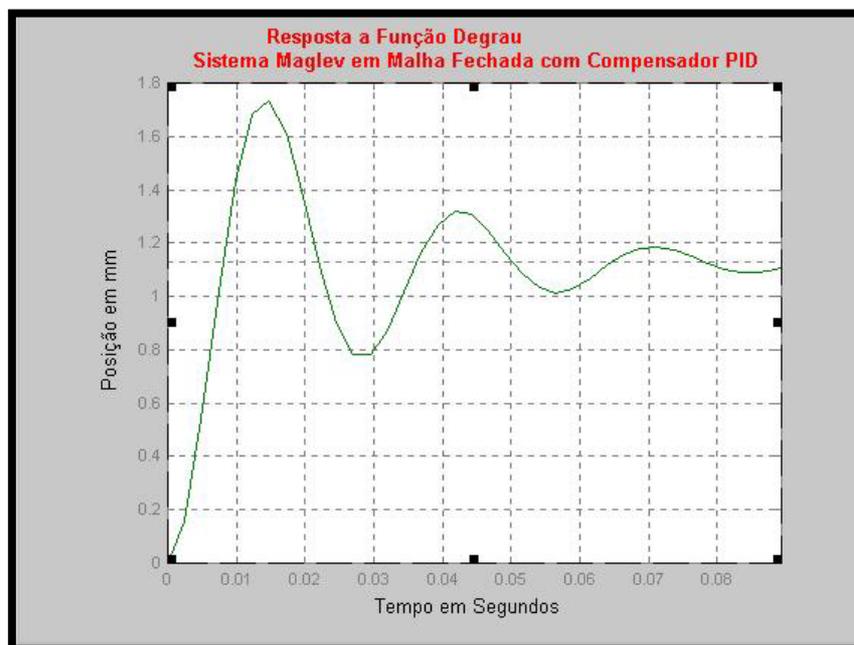


Fig. 3.4. Curva de Resposta do Sistema Compensado com Controlador PID quando excitado por uma função tipo Degrau.

Na figura 3.4 observa-se que a resposta do sistema estabiliza em 0.08 segundos com um overshoot de 0.7 mm acima do ponto de equilíbrio. Apesar do overshoot observado a estabilidade do sistema ainda é preservada. Devido a falta de recursos do comando rltool do Matlab não foi possível adequar a escala de posição frente ao valor real na prática.

As figuras 3.5. e 3.6 mostram situações idênticas as das figuras 3.3 e 3.4, contudo com ganho do compensador agora é ajustado para 0.127, permitindo que a posição da esfera estabilize em $8.10^{-3} m$, contudo apresenta uma perda significativa no tempo de resposta do sistema.

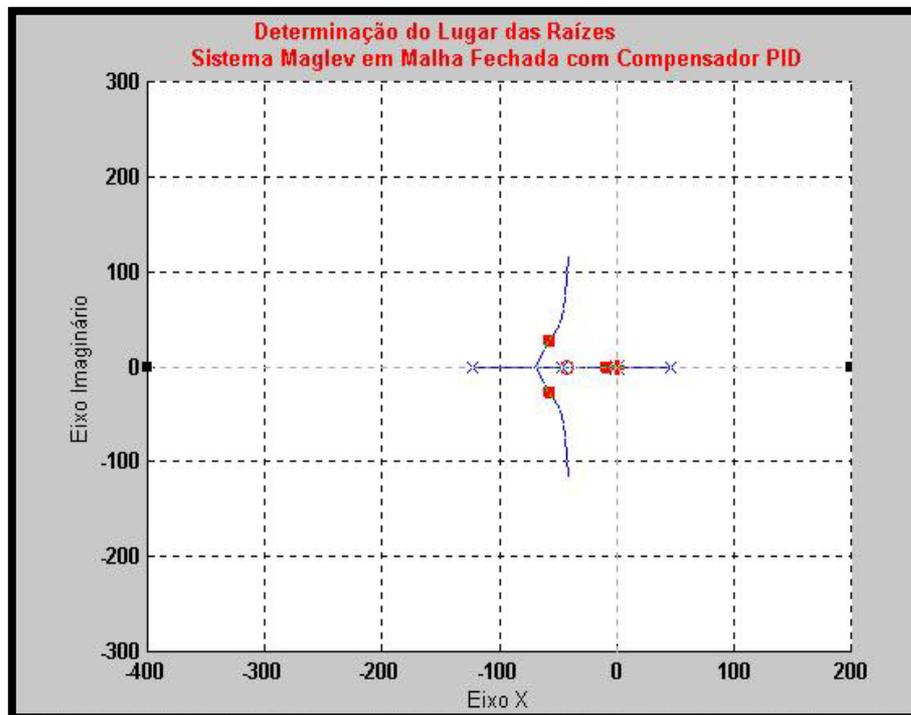


Fig. 3.5. Lugar da Raízes do Sistema com controlador PID na Malha de Controle (Ganho ajustado em 0.127)

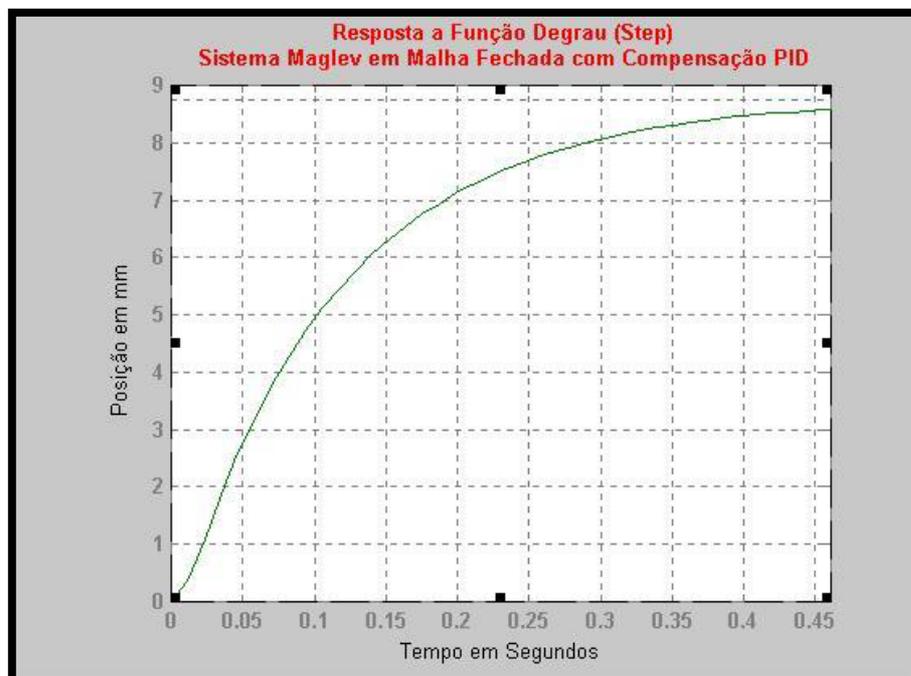


Fig. 3.6. Curva de Resposta do Sistema Compensado com Controlador PID quando excitado por função tipo Degrau. (Ganho igual a 0.127)

3.4. Simulação do Sistema Maglev usando Simulink

3.4.1. Introdução

Através do programa Simulink obtém-se o diagrama de blocos do sistema Maglev em malha fechada com o compensador projetado para estabilizá-lo. A simulação é realizada com excitação do tipo degrau ou com variados tipos de formas de ondas, as quais são medidas e registradas em função do tempo.

3.4.2. Diagrama em Blocos do Sistema

A figura 3.7 apresenta o diagrama em blocos do sistema didático de controle para Levitação Magnética baseado em cálculos e considerações teóricas.

No diagrama, o controlador PID possui $K_i = 0.001$; $K_p = 4$ e $K_d = 0.12$, a função de transferência da planta é exatamente a obtida anteriormente pelo arquivo Maglev.m e executado no Matlab, e o bloco de ganho chamado de fator de correção corresponde a compensações de ganho entre a teoria e prática. As discrepâncias entre teoria e prática são atribuídas aos valores práticos dos componentes não serem exatamente iguais aos calculados.

O sistema pode operar com excitação tipo degrau e constante, onda quadrada e onda senoidal, cujos resultados serão apresentados na seqüência. Através dos osciloscópios, ou Scopes, do programa Simulink, é possível monitorar as formas de onda nos pontos desejados durante a simulação. A figura 3.7 mostra o diagrama em blocos utilizado para simulação do sistema com base nos cálculos efetuados no Matlab.

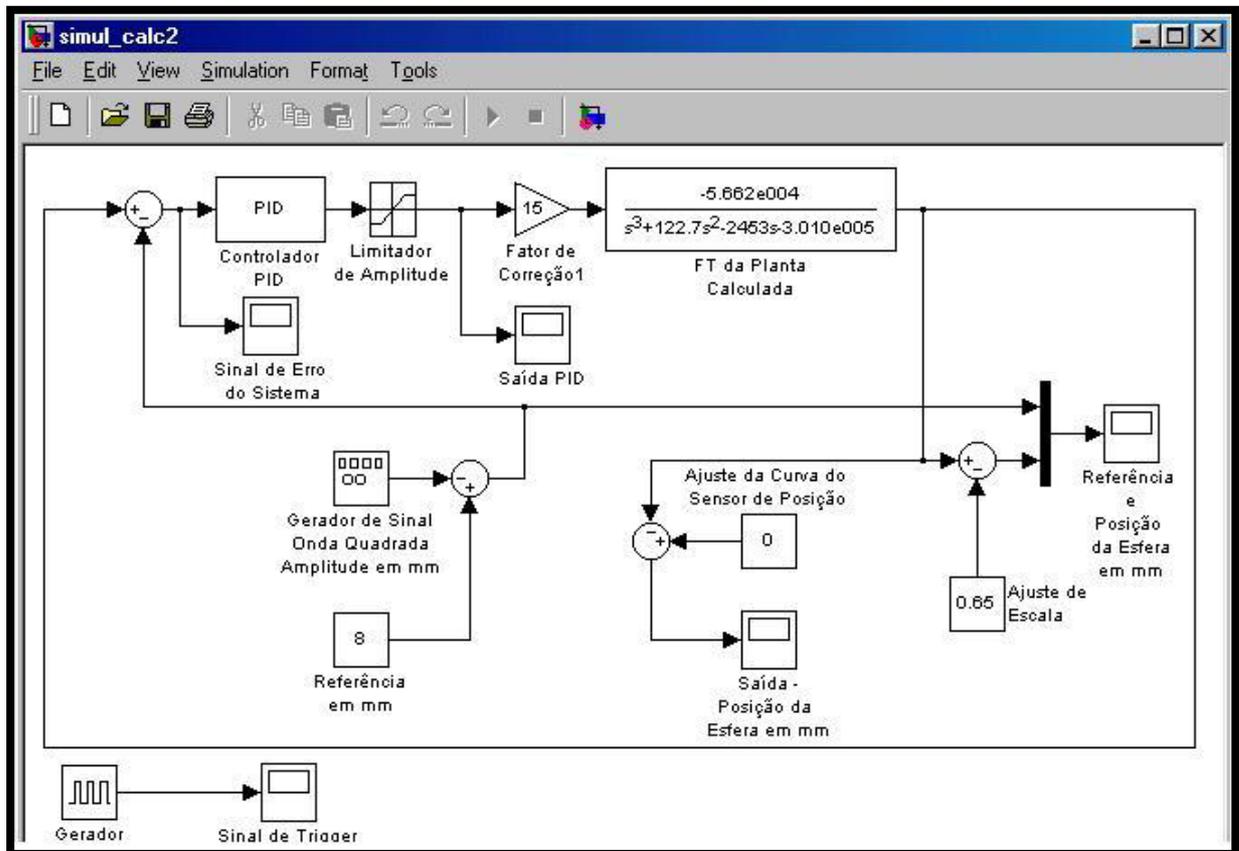


Fig. 3.7. Diagrama em Blocos do Sistema Calculado

3.4.3. Resultados da Simulação e Formas de Onda

Serão apresentadas as medições e formas de onda do erro, da saída do controlador PID e da saída do sistema.

As figuras 3.8, 3.9 e 3.10 apresentam formas de onda do sinal de posição do sistema calculado com excitação de referência tipo onda quadrada em torno de um set-point.

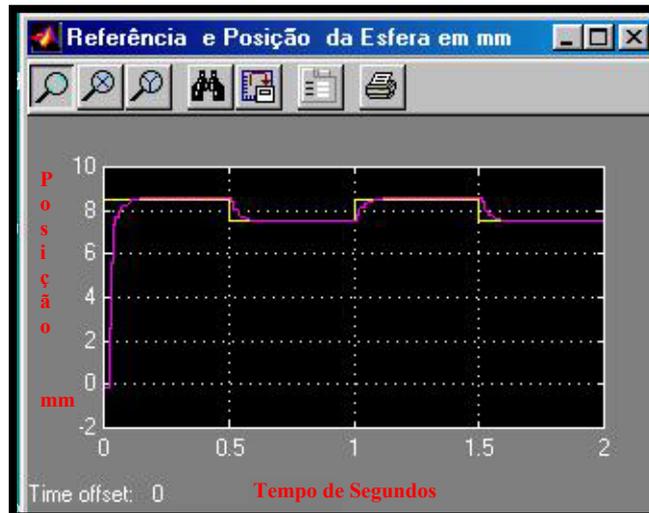


Fig. 3.8. Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela)

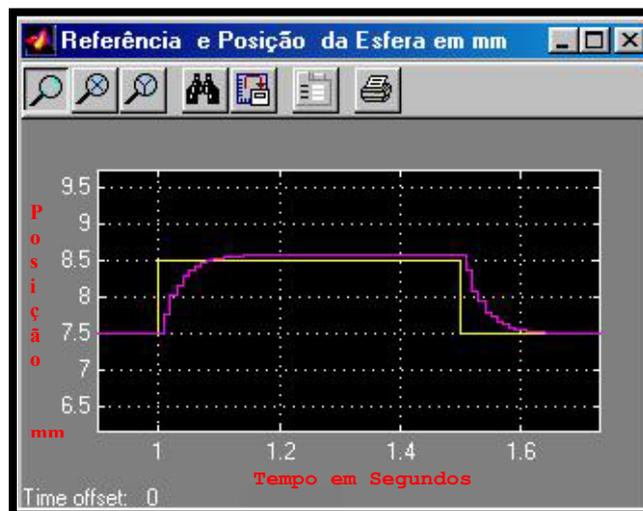


Fig. 3.9. Ampliação do Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela) com foco na subida e descida da esfera.

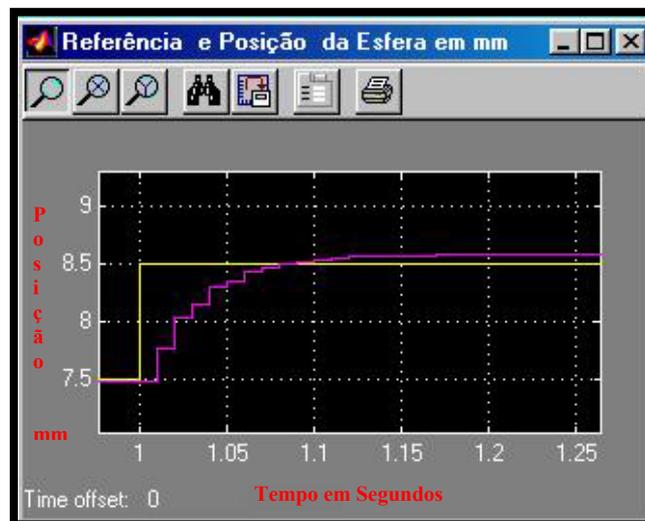


Fig. 3.10. Detalhe da descida da Esfera
Sinal de Posição (Cor Magenta) e
Sinal de Referência (Cor Amarela)

A figura 3.11 mostra o sinal de erro do sistema na entrada do controlador PID.

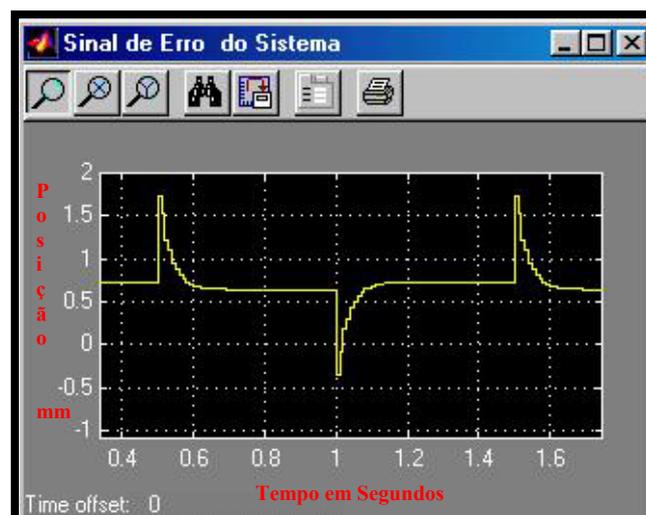


Fig. 3.11. Sinal de Erro do Sistema Calculado

A figura 3.12 mostra a saída do controlador PID.

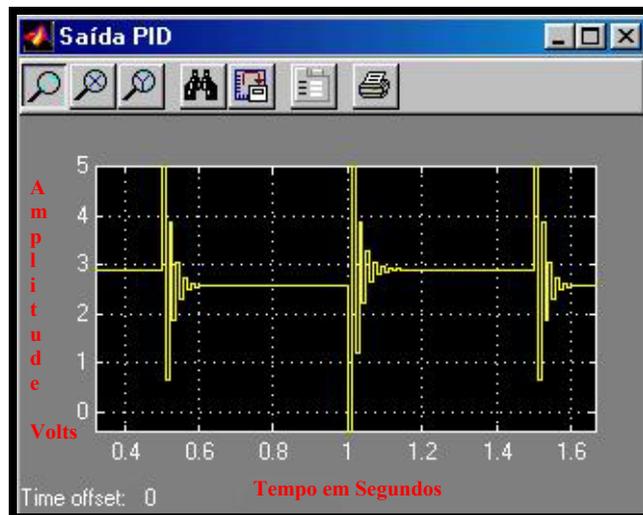


Fig. 3.12. Sinal de Saída do Controlador PID do Sistema Calculado

No capítulo 5 será apresentada uma forma de onda que mostra a saída calibrada em mm e referenciada ao sistema prático, isto é, utilizando uma referência física correspondente à base da bobina, o que quer dizer que da bobina para baixo entende-se como sendo 0 mm até a posição de equilíbrio da esfera em mm.

Além disto, os capítulos 4 e 5 apresentarão em detalhes o desenvolvimento do projeto e suas considerações práticas, os procedimentos, preparação e execução de testes do sistema, os diversos resultados e um quadro comparativo entre os comportamentos do sistema calculado, real e identificado.

Capítulo 4

Descrição e Projeto do Protótipo do Sistema Didático

Capítulo 4

Descrição e Projeto do Protótipo do Sistema Didático

4.1. Introdução

Este capítulo apresenta o histórico do desenvolvimento, as definições do tipo de sensoriamento de posição, da bobina ou eletromagneto, do projeto mecânico e dos detalhes da montagem mecânica, da escolha e tratamento mecânico das esferas, das fontes de alimentação DC, do projeto do regulador eletrônico e sua implementação em malha fechada com controle analógico e digital, além de cobrir as dificuldades encontradas para realização do protótipo prático [9], [10], [11] .

O sistema real prevê a utilização de uma bobina para gerar o campo magnético, um sensor de posição que detecta a distância entre a esfera de aço e a bobina, uma fonte de alimentação D.C. com potência e ripple adequadas e uma fonte de corrente controlada por tensão que excitará a bobina em função da tensão de controle.

A viabilidade técnica e comercial associada a possibilidade de reprodução prática do protótipo do sistema didático para Levitação Magnética foram características essenciais durante o desenvolvimento deste trabalho.

4.2. Histórico do Desenvolvimento

A idéia inicial foi construir uma bobina que tivesse a capacidade de gerar um campo magnético suficiente para atrair esferas de aço de até 0,100 Kg, cujo projeto e informações técnicas serão apresentadas posteriormente. As esferas foram obtidas a partir de rolamentos usados e pesadas em uma balança calibrada e classificadas por peso.

O trabalho prevê o projeto e implementação de uma malha de controle analógica e uma digital para fins didáticos, a serem implementadas em duas fases distintas durante o desenvolvimento.

A implementação da malha analógica consiste no projeto e montagem de um regulador eletrônico analógico a partir dos resultados das simulações e modelagem do sistema, o qual lê o sensor de posição e retorna corrente corrente para a bobina do sistema.

Por outro lado a malha digital deverá ser implementada através de um microcomputador pessoal, tipo PC, uma placa de aquisição de dados e um programa adequado para tal função. Inicialmente foi pesquisado e testado a possibilidade flexibilizar o projeto através do uso de um controlador lógico programável com um módulo de entrada tipo conversor A/D e um módulo de saída tipo conversor D/A, tal como será descrito na sequência.

O primeiro passo foi utilizar o controlador lógico programável do fabricante Aromat & Matsushita modelo FP0 e o módulo A/D-D/A modelo FP1, os quais após diversos testes, não foram aprovados por apresentar o tempo de processamento e de resposta inadequado ao sistema de levitação magnética, da ordem de 1:1.

Em seguida, tentou-se um outro controlador lógico programável da Allen Bradley modelo Micrologix 1762, muito mais rápido que o anterior e que permitiu grande avanço na pesquisa, contudo foi igualmente descartado por não possuir ainda o tempo de resposta compatível com a necessidade do sistema.

A solução e conclusão final foi desenvolver um sistema com um microcomputador, tipo PC, placa de aquisição de dados A/D e D/A e programação pelo módulo tempo real do programa Matlab e Simulink.

As figuras 4.1 e 4.2 mostram estas fases do projeto.



Fig. 4.1. CLP Allen Bradley

CLP Aromat

CLP Allen
Bradley



Fig.4.2. CLP Aromat

O desenvolvimento do sensor de posição iniciou-se pela pesquisa da medição de distância através de sensores de ultrassom, utilizando para os testes práticos os modelos da série MA40A do fabricante Murata. O princípio deste tipo de medição é o efeito doppler, em que o tempo de emissão e retorno de um pulso de ultrassom é medido e convertido em distância.

Os resultados não foram favoráveis devido a falta de repetibilidade do sistema de sensoriamento e dificuldade no posicionamento inicial da esfera devido a instalação mecânica dos sensores emissor e receptor. Desta forma, esta alternativa técnica foi descartada para aplicação neste trabalho.

A figura 4.3 mostra o Sensor de Ultrassom utilizado.



Fig. 4.3. Sensor de Ultrasom Murata

Uma segunda técnica de medição de posição pesquisada foi o sensoriamento óptico com barreira fotosensível.

O princípio deste sensor é a medição da diferença de incidência total de luz em uma placa fotosensível, sem obstrução, e a luz incidente quando um objeto é posicionado entre a fonte emissora de luz e a barreira fotosensível. Este método é válido e bastante utilizado em sistemas de levitação magnética, conforme pesquisa realizada pela Universidade Federal de Minas Gerais, [Caldeira, Fabrício Reis, “Trabalho de Pesquisa em Levitação Magnética”, UFMG, 1997], [11] .

O inconveniente deste sistema é a limitação do range de medição em função do tamanho e alto custo da placa fotosensível. Outro limitante é a dificuldade de aquisição da placa fotosensível por ser importada e sem representação comercial no Brasil.

Em razão das restrições apresentadas, esta alternativa foi também descartada para aplicação neste trabalho.

A figura 4.4 mostra este tipo de sensoriamento.

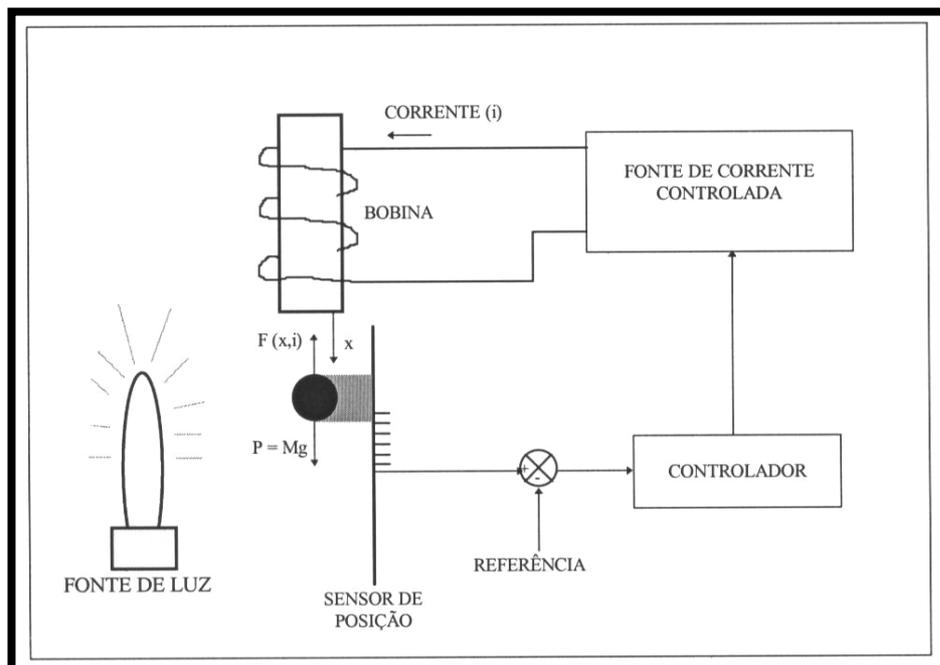


Fig. 4.4. Sistema Óptico de Medição de Posição com Placa Fotosensível

Intensificou-se as pesquisas em um sistema de medição de posição que apresentasse duas características imprescindíveis: custo viável para construção e reprodução do protótipo e preferencialmente que permitisse uma medição direta da distância entre esfera e bobina, permitindo uma inovação tecnológica neste tipo de aplicação. Após estudos, foi definido e localizado no mercado brasileiro o sensor óptico analógico com fibra óptica, do fabricante Omron modelo E3X-DA, o qual atendeu o requisito estabelecido.

A figura 4.5 mostra o sensor Omron E3X-DA com fibra óptica.



Fig.4.5. Sensor Óptico Omron com Fibra Óptica Modelo E3X-DA

O sensor Omron modelo E3X-DA foi testado, aprovado, e definido para o desenvolvimento do primeiro protótipo do sistema didático para Levitação Magnética, apesar de sua saída analógica não ser linear em relação a posição medida.

Outro tipo de sensoriamento pesquisado e testado foi o LASER com barreira óptica, cujo princípio assemelha-se ao de barreira fotosensível no que tange o conceito de funcionamento, entretanto é viável para aplicação neste trabalho, dado sua disponibilidade no mercado nacional, sua facilidade adaptação a montagem mecânica, o fato de possuir saída linear e alta precisão de medida. O único ponto desfavorável é seu custo que é cerca de 3 vezes o custo do sensor com fibra óptica, mas ainda assim é uma alternativa a ser considerada. O princípio deste sensor baseia-se em um transmissor LASER que emite um feixe de luz com $1.10^{-3}m$ de espessura e $10.10^{-3}m$ de largura, em que a interrupção deste por um objeto cria uma sombra ou falta de luz no receptor LASER e por diferença de incidência de luz, mede a posição do objeto [General Catalog of Measuring Instruments, N.KA-ME-04, Keyence Corporation, November, 1991] .

Uma grande vantagem deste sensor em relação ao de fibra óptica E3X-DA é que sua curva característica é linear, o que evita a linearização do sistema de sensoriamento, reduz custo do projeto e complexidade. Tal complexidade não é significativa frente ao custo do sensor, e poderá ser considerada para sensores de mais baixo custo com saída analógica não linear.

Diante de duas alternativas significativas para medição de posição, decidiu-se testar efetivamente ambas para esta aplicação, mesmo sabendo que isto poderia implicar em duas montagens mecânicas distintas e tempo adicional para o desenvolvimento.

A fonte de alimentação DC do sistema deve possuir tensão de saída igual a +24VDC, corrente máxima de saída igual a 5 A e ripple menor que 0,5%. Foi escolhido o modelo modelo KF-24 do fabricante Sense Eletrônica. Para a alimentação DC do circuito regulador analógico foram utilizadas duas fontes para atender a necessidade de alimentação simétrica dos amplificadores operacionais presentes neste.

A figura 4.6 mostra as fontes de alimentação DC usadas no protótipo prático.



Fig. 4.6. Fonte de Alimentação Sense Modelo KF-24

O amplificador de corrente ou fonte de corrente controlada por tensão foi projetado de forma a atender uma variação de tensão de controle de 0 a 5 V, para uma saída de corrente de 0 a 250mA, compatível com a bobina utilizada.

Na primeira montagem mecânica do sistema foi utilizada uma base de madeira, uma guia em aço 1020 oxidada e dois suportes deslizantes, sendo um para fixar a bobina e outro para fixar a base de apoio para a esfera de aço, conforme mostra a figura 4.7.

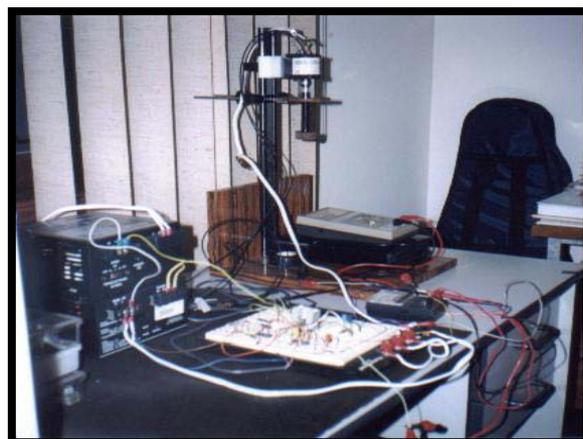
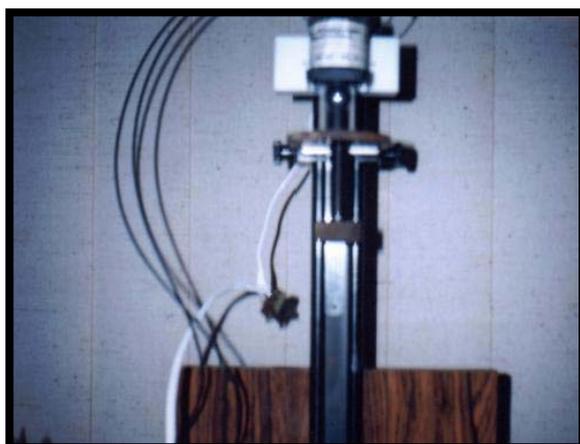


Fig. 4.7. Primeira Montagem Mecânica do Sistema Didático de Levitação Magnética

Um tarugo de teflon foi utilizado para fixação e espaçamento da bobina em relação à guia de aço, objetivando eliminar ou minimizar interferências desta guia no campo magnético.

Em função da experiência adquirida na construção do primeiro protótipo, algumas melhorias foram introduzidas no segundo, tal como a utilização de perfis de alumínio que permitiram uma montagem rápida, flexível e de baixo custo. Esta montagem adapta-se para diferentes tipos de bobinas ou sensores, além de possibilitar rápidos ajustes mecânicos, conforme mostra a figura 4.8.

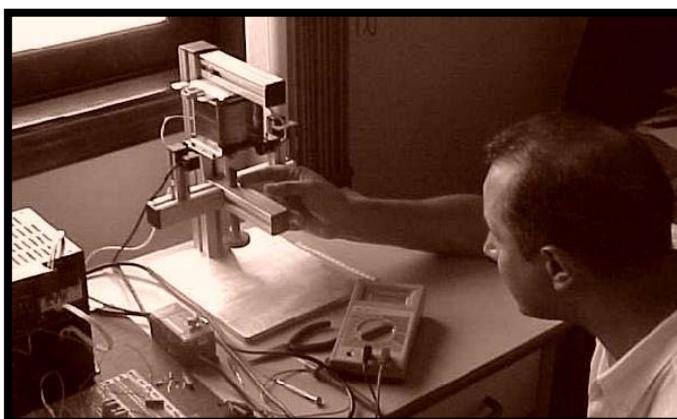


Fig. 4.8. Segunda Montagem Mecânica do Sistema Didático de Levitação Magnética

A segunda montagem mecânica trouxe flexibilidade para o desenvolvimento e permitiu testes com diferentes tipos de bobinas e sensores. A seguir, será realizada um abordagem mais detalhada de cada componente do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética.

4.3. O Eletromagneto ou Bobina do Sistema Maglev

A implementação prática iniciou com o projeto e construção de uma bobina com núcleo de ferrite, diâmetro externo de 64 mm e 100 mm de comprimento. Tais dimensões foram obtidas em função do fio e do número de espiras definidas para o projeto. As dimensões e número de espiras da bobina foram definidas com base em outras experiências práticas que mostram bom desempenho em protótipos de levitação magnética [13].

Utilizou-se fio de cobre com seção reta $S = 0,75.10^{-6} m^2$, núcleo de ferrite cilíndrico de comprimento $L = 100.10^{-3} m$ e diâmetro $d_n = 10.10^{-3} m$, 2000 espiras, resistência elétrica máxima de 100Ω e indutância máxima de 700 mH, sabendo que a resistência elétrica é diretamente proporcional ao comprimento do fio de cobre e a indutância da bobina varia significativamente em função do número de espiras e das características físicas do ferrite utilizado.

Para o fio com seção reta $S = 0,75.10^{-3} m^2$, o diâmetro deste é igual a $0,997.10^{-3} m$, de forma que o cálculo do número de espiras para a primeira camada do enrolamento da bobina é dado por:

$$\text{Número de Espiras da 1º Camada} = \frac{100.10^{-3}}{0.997.10^{-3}} = 102 \quad (\text{eq. 4.1})$$

Para 2000 espiras, o número total de camadas do enrolamento da bobina é dado por:

$$\text{Número Total de Camadas} = \frac{2000}{102} \cong 20 \quad (\text{eq. 4.2})$$

O diâmetro total é dado por:

$$d_t = d_1 + d_2 + d_n \quad (\text{eq. 4.3})$$

onde:

d_t = diâmetro total

d_1 = distância da extremidade externa esquerda ao núcleo da bobina

d_2 = distância da extremidade externa direita ao núcleo da bobina

d_n = diâmetro do núcleo da bobina

A figura 4.9 ilustra detalhes do projeto da bobina:

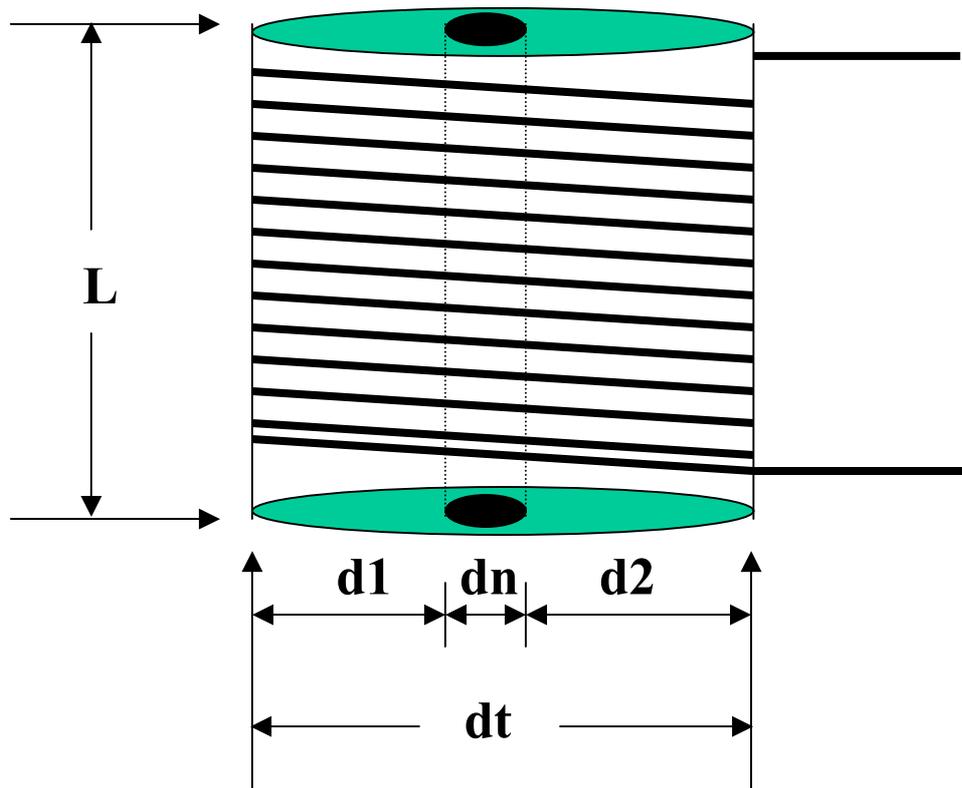


Fig. 4.9. Projeto da Bobina do Sistema Maglev

A seguir, mostra-se o cálculo do diâmetro externo da bobina:

$$d_1 = d_2 = 20.0.997.10^{-3} \cong 20.10^{-3} m \quad (\text{eq. 4.5})$$

O diâmetro do núcleo é $d_n = 10.10^{-3}$, e portanto do diâmetro total resulta em:

$$d_t = 20.10^{-3} + 20.10^{-3} + 10.10^{-3} = 50.10^{-3} m$$

Assim,

$$d_t = 50.10^{-3} m$$

O cálculo da resistência elétrica da bobina é dada por:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (\text{eq. 4.6})$$

onde:

R é a resistêncita elétrica

ρ é a resistividade elétrica do material do fio utilizado, no caso, do cobre

L_f é o comprimento total do fio utilizado no enrolamento da bobina

S é a seção reta do fio utilizado no enrolamento da bobina

Para uma espira na primeira camada, o perímetro desta é dado por:

$$P_1 = 2 \cdot \pi \cdot r = \pi \cdot d_n = \pi \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 31,42 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (\text{eq. 4.7})$$

O comprimento total de fio para a primeira camada será dado por:

$$L_{f1} = 102 \cdot (31,42 \cdot 10^{-3}) = 3,20 \text{ m} \quad (\text{eq. 4.8})$$

O comprimento total de fio para 20 camadas é calculado a seguir:

$$L_f = N_{camadas} \cdot L_{f1} = 20 \cdot 3,20 = 64 \text{ m} \quad (\text{eq. 4.9})$$

Assim sendo, a resistência elétrica da bobina resulta em:

$$R = \frac{0,018 \cdot 10^{-6} \cdot 64}{0,75 \cdot 10^{-6}} = 1,54 \Omega \quad (\text{eq. 4.10})$$

A bobina foi enrolada em um carretel de PVC para melhor sustentação mecânica e o núcleo de ferrite introduzido no interior deste, o qual foi ainda fechado em suas extremidades através de uma tampa com rosca, fabricada em celeron.

Na prática a bobina apresentou uma indutância resultante de 620 mH e resistência elétrica de 3,8 Ω , sendo tais grandezas medidas através de uma ponte RLC calibrada do laboratório de Metrologia do Instituto de Pesquisas Espaciais em São José dos Campos. As variações em relação ao projeto original ocorreram em função da montagem mecânica, alteração do diâmetro externo, e por conseguinte, o comprimento do fio utilizado.

A figura 4.10 mostra a bobina em sua montagem final.



Fig. 4.10. Bobina com Núcleo de Ferrite utilizada no Sistema Maglev.

Alimentou-se a bobina com 24 VDC, e utilizando esferas de aço de até $60 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}$, verificou-se que os resultados práticos desta bobina não foram satisfatórios devido aos seguintes pontos:

- Campo magnético de intensidade baixa
- Aquecimento excessivo da bobina
- Dispersão excessiva do campo magnético
- Dificuldade de montagem mecânica seriada

Diante da situação optou-se por descobrir no mercado uma bobina comercial que pudesse atender as necessidades do sistema. A primeira tentativa foi utilizar uma bobina de uma válvula solenóide da marca Schrader Bellows modelo K593-702 operando em +24 V DC, cujos resultados foram igualmente insatisfatórios devida à baixa intensidade de campo, apesar da corrente consumida ser baixa e não haver aquecimento durante longo tempo de operação.

O aquecimento das bobinas utilizadas em sistema similares de levitação magnética é comum devido a baixa resistência elétrica da bobina e uso de tensões mais elevadas para obtenção de maiores correntes que possibilitem maior intensidade de campo magnético. Por este motivo é usual a utilização de dissipadores de calor acoplado à bobina para permitir operação prolongada.

Ficou então estabelecido um desafio adicional ao projeto para obter uma bobina que pudesse operar sem alta dissipação de calor, ou pelo menos que opere sem a necessidade de dissipador de calor, o que, se inviável, eleva o custo do projeto.

Na sequência, testou-se bobinas de contadores comerciais, das marcas Siemens e Telemecanique. A primeira, com indutância de 680 mH e 90 Ω do contator Siemens modelo 3TH42-24VDC, e a segunda com indutância de 220 mH e 27 Ω do contator Telemecanique modelo LP1D6511-24VDC.

O núcleo destas bobinas são de aço silício e apresentam alta eficiência magnética, ou seja, geram um campo magnético de alta intensidade capaz de criar uma força magnética suficiente para atrair esferas acima de $100 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}$, conforme especificação do projeto.

Com o intuito de determinar a influência do núcleo na bobina, mediu-se a indutância destas sem o núcleo, obtendo-se uma indutância de 181 mH para a bobina da Siemens e 68,5 mH para a bobina da Telemecanique. As bobinas também apresentam baixo consumo de corrente, minimizando o efeito da dissipação de calor. Nos casos citados, o consumo máximo de corrente operando com +24 VDC foi de 0,27 A para bobina Siemens e 0,89 A para bobina Telemecanique.

A bobina de 220 mH, Telemecanique, é fisicamente maior que a bobina de 680 mH, Siemens, contudo apresenta intensidade de campo magnético menor apesar de consumir mais corrente. Este fato pode ser explicado devido a bobina de 680 mH ser construída com número maior de espiras, utilizar fio mais fino e núcleo de melhor qualidade, tanto que sua resistência elétrica e indutância são consideravelmente maiores.

Os resultados foram favoráveis para os dois tipos de bobinas e decidiu-se utilizar e testá-las em dois protótipos distintos.

A figura 4.11 ilustra as bobinas a serem utilizadas nos protótipos.

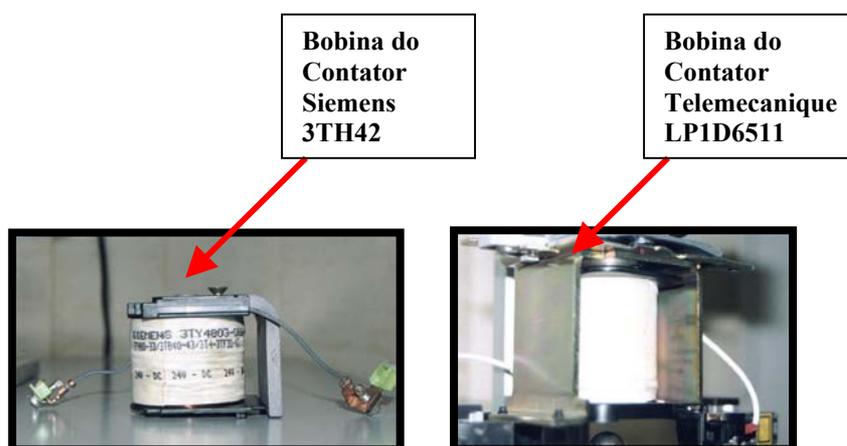


Fig. 4. 11. Bobinas dos Contatores Siemens e Telmechanique escolhidas para os protótipos do Sistema Maglev

A conclusão final é que qualquer das bobinas comerciais escolhidas e testadas poderão ser utilizadas no sistema real.

4.4. O Sensor de Posição do Sistema Maglev

4.4.1. Introdução

O sensor de posição é um componente do sistema que requer precisão, resposta rápida e preferencialmente uma saída analógica linear em relação a posição do objeto. Conforme já descrito no histórico do desenvolvimento, os sensores ópticos analógicos com fibra óptica e tipo Laser com barreira foram escolhidos para os protótipos do sistema Maglev.

4.4.2. Sensor Óptico Analógico com Fibra Óptica

O sensor óptico analógico com fibra óptica, do fabricante Omron, modelo E3X-DA com Fibra óptica modelo E32-DC200, mede a posição através da difusão e reflexão de luz em um objeto.

Uma fibra óptica é utilizada para conduzir o feixe de luz infravermelho proveniente do transmissor do sensor e emití-la até o objeto. Outra fibra é utilizada para receber a luz refletida através do receptor e amplificador do sensor, e desta forma medir a diferença de luz entre total emitido e refletido, convertendo-a em um sinal analógico proporcional a distância do objeto [Omron Semiconductor and Sensors, “Digital Fiber Amplifier E3X-DA, Cat. No.E305-E3-1, 1999].

O sensor possui um conversor A/D interno com resolução de 12 bits que assegura alta precisão na leitura, saídas analógicas do tipo NPN ou PNP que adequam-se aos circuitos externos e um amplificador com display.

Além disto o sensor permite ajuste de vários parâmetros, tais como: ganho, faixa de saída analógica, tempo de resposta, temporização da saída, distância sensora, modo de alta velocidade de resposta, percentual de nível digital (limite de ganho), ativação de circuito Sample and Hold e sistema bargraph para indicação da saída analógica [Omron Semiconductor and Sensors, “Digital Fiber Amplifier E3X-DA, Cat. No.E305-E3-1, 1999].

Para o sistema Maglev, o sensor E3X-DA foi alimentado com +24 VDC, foi ajustado uma saída analógica entre 0 e 5 VDC, um tempo de resposta de 1 ms, indicação da saída analógica tipo percentual, saída tipo PNP, modo de seleção da saída tipo “Light ON”, e distância sensora até 400 mm [Omron Semiconductor and Sensors, “Digital Fiber Amplifier E3X-DA, Cat. No.E305-E3-1, 1999].

A seguir, a figura 4.12 mostra o sensor E3X-DA em detalhes.

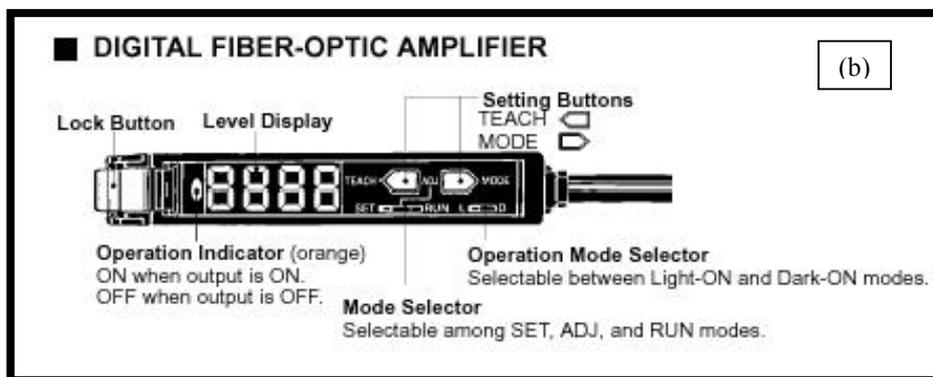
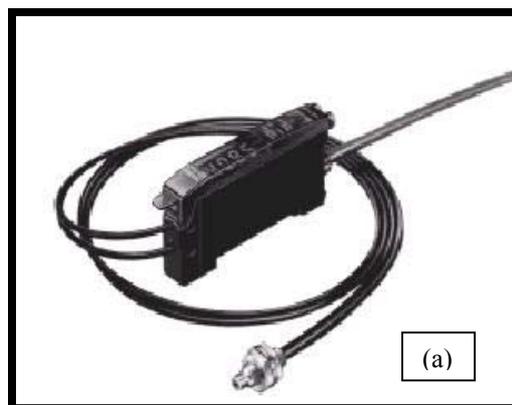


Fig. 4.12. Sensor E3X-DA em detalhes. (a) O sensor (b) O amplificador do sensor.

A figura 4.13 apresenta a configuração elétrica com saída tipo PNP que foi utilizada para montagem final do sensor no sistema real.

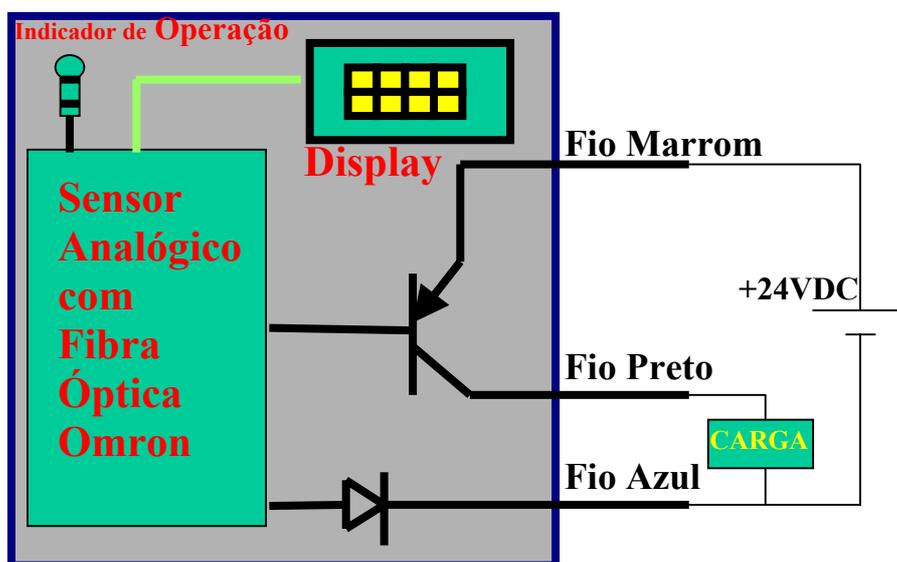


Fig. 4.13. Configuração Elétrica do Sensor E3X-DA com saída PNP

De forma a possibilitar uma medição direta da posição da esfera em relação a bobina, a montagem mecânica da fibra óptica foi feita no interior do núcleo da bobina, ou seja a luz incidente na esfera origina-se na face inferior da bobina e de cima para baixo. Em relação a outros sistemas similares é uma forma de medição inédita e inovadora.

A figura 4.14 mostra a montagem mecânica do sensor que utiliza a bobina Siemens modelo 3TH42 com o referido sensor de fibra óptica.

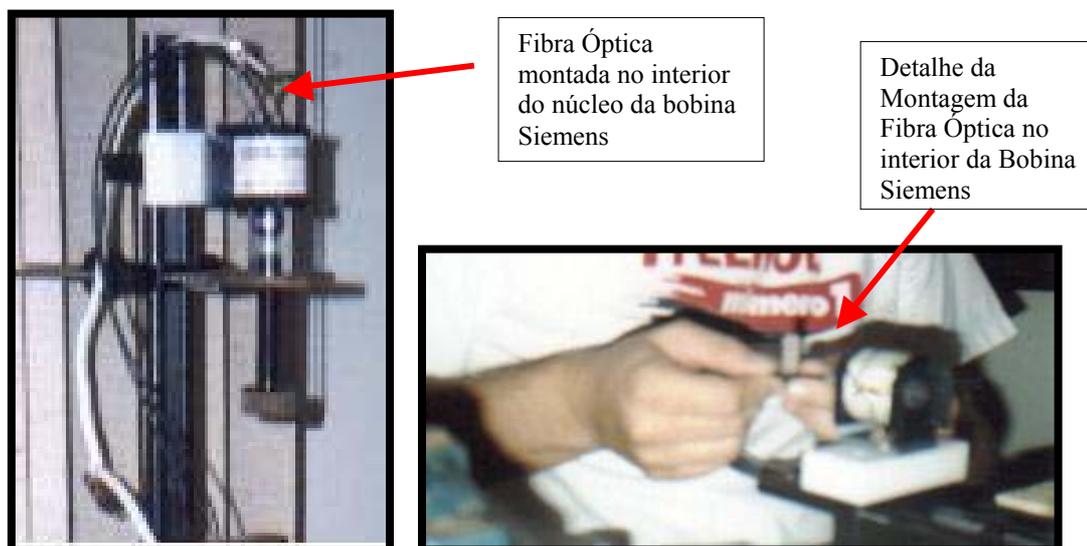


Fig. 4.14. Montagem da Fibra Óptica E32-DC200 Omron no interior da bobina.

Com esta montagem foi possível o levantamento da curva característica do sensor através da medição da tensão de saída em função da variação de posição da esfera em relação a bobina. Na sequência, a tabela 4.1 mostra os resultados obtidos nesta etapa.

Distância da Esfera em mm	Tensão de Saída do Sensor em Volts
1,00	4,91
2,00	4,91
3,00	4,91
4,00	4,87
5,00	4,78
6,00	3,75
7,00	2,93
8,00	2,41
9,00	2,06
10,00	1,75
11,00	1,65
12,00	1,54
13,00	1,48
14,00	1,42
15,00	1,38

Tabela 4.1. Dados da Curva Característica do Sensor Óptico Analógico com fibra Óptica (Posição x Tensão de Saída)

A figura 4.15. mostra o gráfico correspondente a tabela 4.1, onde observa-se a existência de não linearidade entre a tensão de saída do sensor a posição medida. Este resultado prático implica na restrição do range de medida, uma vez que o sistema deverá operar na região mais linear da curva, ou seja entre $5.10^{-3} m$ a $8.10^{-3} m$.

A linearização do sinal de saída do sensor com fibra óptica é possível e foi realizada, contudo, descartada, devido às próprias desvantagens de manuseio e ajustes desta alternativa técnica.

Conclusivamente, o primeiro protótipo do sistema Maglev utilizou o sensor com fibra óptica sem linearização de sua saída operando na posição de equilíbrio igual a $7.10^{-3} m$, região mais linear da curva.

Segue a figura 4.15 que mostra a curva característica deste tipo de sensor.

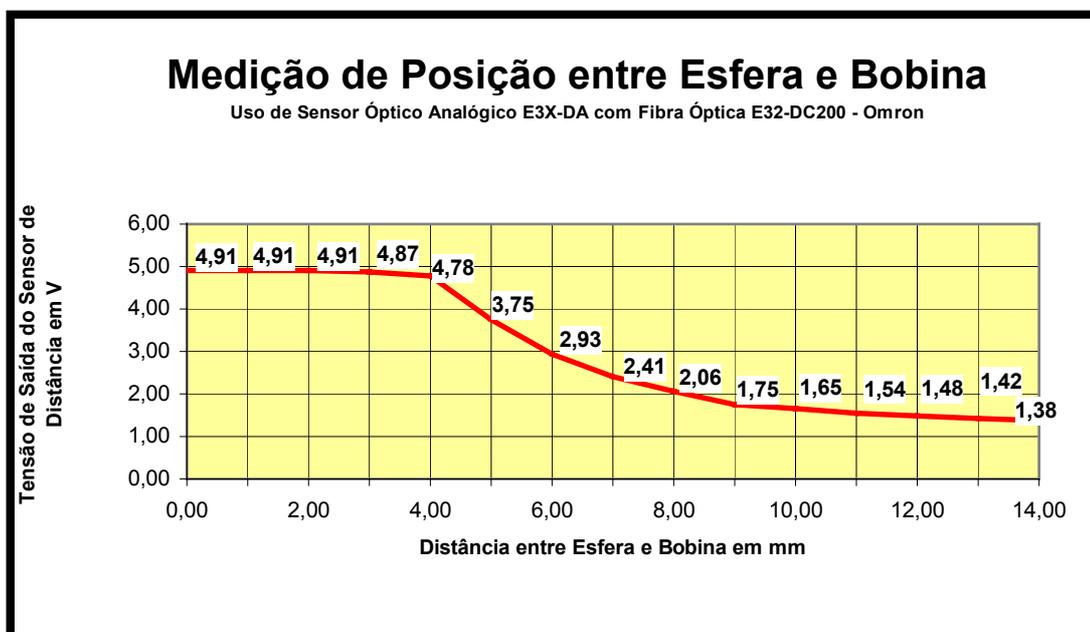


Fig. 4.15. Curva Característica “ Posição em mm x Tensão Analógica de Saída em V” do Sensor de Posição E3X-DA com Fibra Óptica E32-DC200

Os testes práticos mostraram que o posicionamento da esfera em relação ao feixe infravermelho deve ser retilíneo para que a reflexão seja a maior possível, e portanto evitar dispersão excessiva. A solução para o posicionamento retilíneo da esfera foi utilizar um tubo de vidro para guiá-la, e permitir seu deslocamento ao longo do eixo principal do núcleo da bobina.

Outro fator de difícil controle são as imperfeições, tais como riscos ou manchas, na superfície da esfera utilizada. Tais imperfeições são usualmente provenientes do uso e desgaste dos rolamentos usados, e podem dispersar os feixes de luz ou até refletí-los com um ângulo que não atinge a fibra óptica receptora. Para eliminação ou minimização das imperfeições da superfície da esfera utilizou-se um processo de galvanização química e polimento da superfície.

Tais ações corretivas contribuíram fortemente para o sucesso do primeiro protótipo com sensor analógico com fibra óptica, lembrando que os testes práticos utilizaram um regulador eletrônico analógico montado em protoboard.

Conclusivamente decidiu-se investir mais tempo no sensor tipo Laser.

4.4.3. Sensor Óptico Tipo LASER com Barreira

As restrições observadas no primeiro protótipo usando sensor de posição com fibra óptica conduziram ao desenvolvimento de um segundo protótipo. Este utiliza um sensor óptico tipo Laser com barreira e objetiva o aumento do range de sensoriamento de posição, a melhoria da repetibilidade, a eliminação da necessidade de guia vertical para a esfera e independência do sensor em relação as características da superfície da esfera.

O sensor Laser com barreira mede a posição, diâmetro ou espessura de um objeto, baseado na detecção e medição da diferença de luz entre a intensidade total emitida por um transmissor Laser e a parcela incidente em um receptor devido a obstrução do feixe de luz por um objeto.

A interrupção do feixe de Laser, que caracteriza o sensor do tipo barreira, corresponde a uma área física, calculada pela multiplicação da espessura do feixe Laser e a distância interrompida pelo objeto [General Catalog of Measuring Instruments, N.KA-ME-04, Keyence Corporation, November, 1991].

O sensor utilizado no segundo protótipo é da marca Keyence, modelo LX2-01T/11, cujo feixe Laser para o modelo LX2 Standard possui $10 \cdot 10^{-3} m$ de largura e $1 \cdot 10^{-3} m$ de espessura [General Catalog of Measuring Instruments, N.KA-ME-04, Keyence Corporation, November, 1991], ou seja a interrupção total do feixe emitido corresponderá a uma área de $10 \cdot 10^{-6} m^2$.

A figura 4. 16 ilustra o princípio de funcionamento.

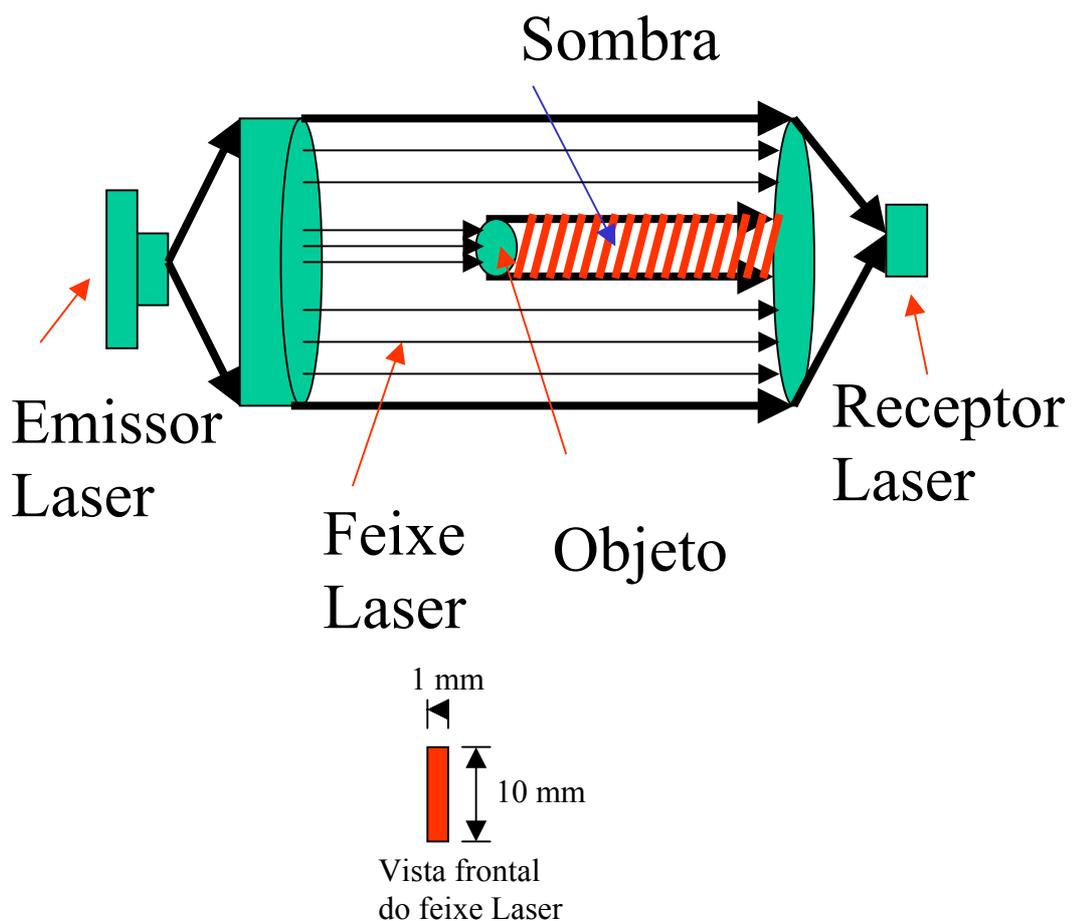


Fig. 4.16. Princípio de Funcionamento do Sensor Laser com barreira

O Sensor Laser LX2-11 possui um amplificador de sinal que pode operar com alimentação igual a +24 VDC. Dentre suas características, permite controle de ganho, ajuste de tolerância alta e baixa da saída analógica, tempo de resposta e o modo de operação da saída, o qual é “Light ON”.

A figura 4. 17 mostra o sensor, emissor e receptor Laser e seu amplificador.

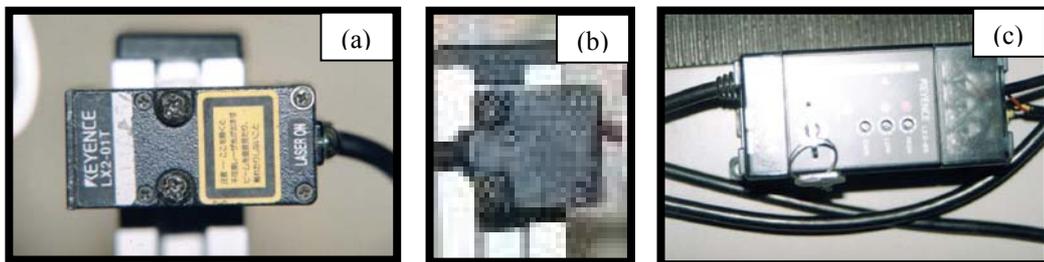


Fig. 4.17. Sensor Laser LX2-01T/11 com barreira.
(a) Emissor (b) Receptor (c) Amplificador

A distância sensora máxima do sensor Laser LX2-11 é de $300 \cdot 10^{-3} m$ e possui um comportamento linear da saída analógica em função da posição medida.

A tabela 4.2 apresenta os dados das medições de posição e tensão de saída para este tipo de sensor.

Área do Feixe Laser em mm ²	Distância da Esfera em mm	Tensão de Saída do Sensor em Volts
0,00	0,00	5,00
1,00	1,00	4,50
2,00	2,00	4,10
3,00	3,00	3,60
4,00	4,00	3,30
5,00	5,00	3,00
6,00	6,00	2,50
7,00	7,00	2,10
8,00	8,00	1,80
9,00	9,00	1,50
10,00	10,00	1,00
11,00	11,00	1,00
12,00	12,00	1,00

Tabela 4.2. Dados para levantamento da Curva Característica do Sensor Laser com Barreira.

A seguir, a figura 4.18 mostra o gráfico da curva característica obtida para o sensor LX2-01T/11.

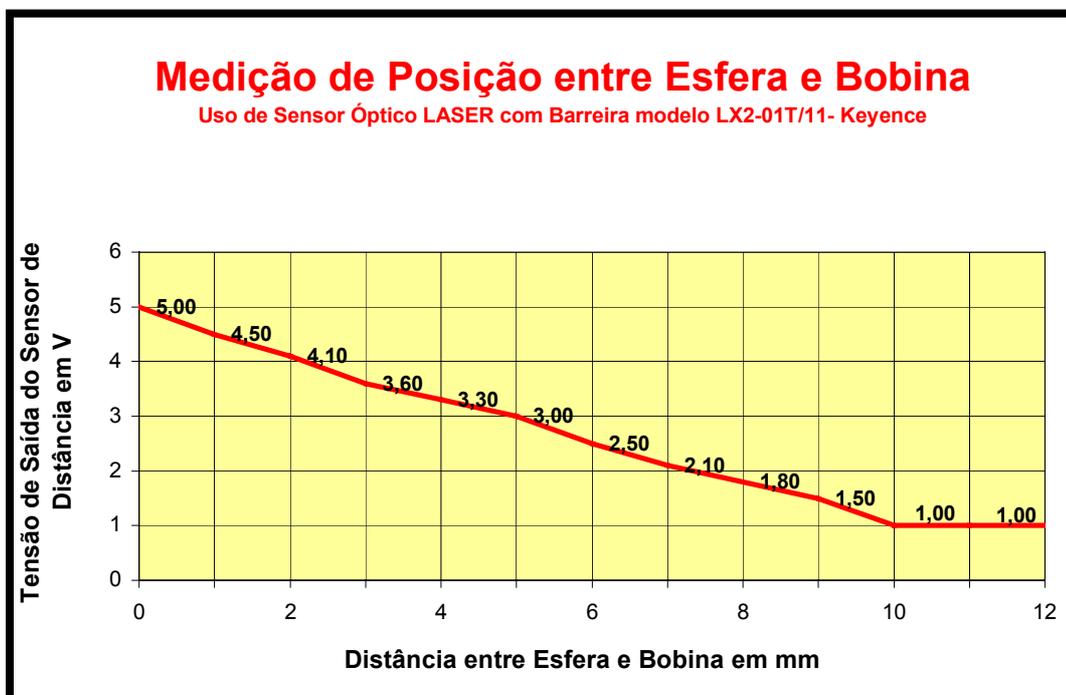


Fig. 4.18. Curva Característica do Sensor Laser com Barreira Modelo LX2-01T/11, Marca Keyence

A curva característica do sensor LX201T/11 apresenta boa linearidade da tensão de saída em relação a posição medida, além de permitir um range de medida mais amplo quando comparado ao sensor óptico com fibra óptica. É importante salientar que a espessura do feixe Laser é igual a $1 \cdot 10^{-3} m$, e portanto a área obstruída é correspondente a medida direta da posição do objeto, isto é, uma área obstruída de $2 \cdot 10^{-6} m^2$ corresponde a posição $2 \cdot 10^{-3} m$ de obstrução da largura do feixe Laser.

A figura 4.19 ilustra este detalhe da medição.

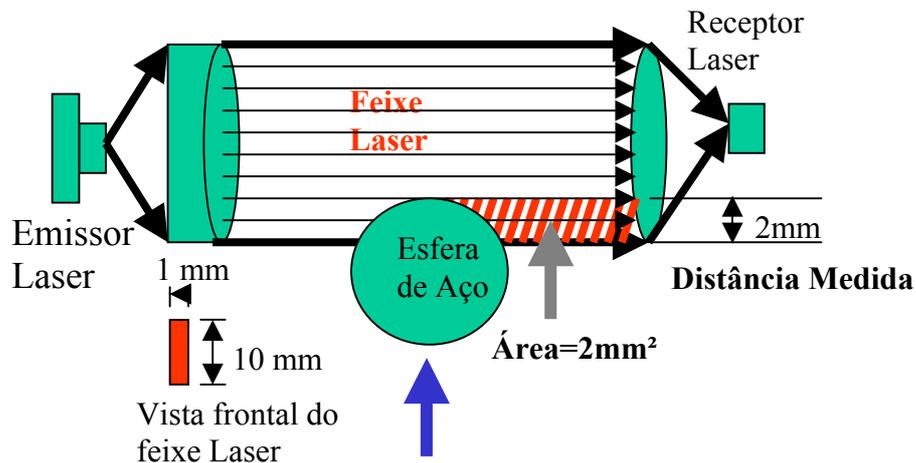


Fig. 4.19. Sistema de Medição do Sensor Laser com Barreira

Conclusivamente o sensor óptico tipo Laser apresenta uma repetibilidade e range de medida significativamente maior que o sensor óptico com fibra óptica, e apesar de seu custo ser cerca de três vezes maior, foi escolhido para a versão final do sistema didático de controle para levitação magnética.

4.5. Descrição do Projeto do Regulador Analógico

4.5.1. Introdução

O projeto do regulador analógico será baseado nas simulações do sistema Maglev realizadas através do programa Simulink e nas posições dos zeros e pólos do compensador que estabiliza a malha de controle.

A figura 4.20 mostra o diagrama em blocos básico do sistema analógico de controle em malha fechada [Ogata. 1997, p544], [12].

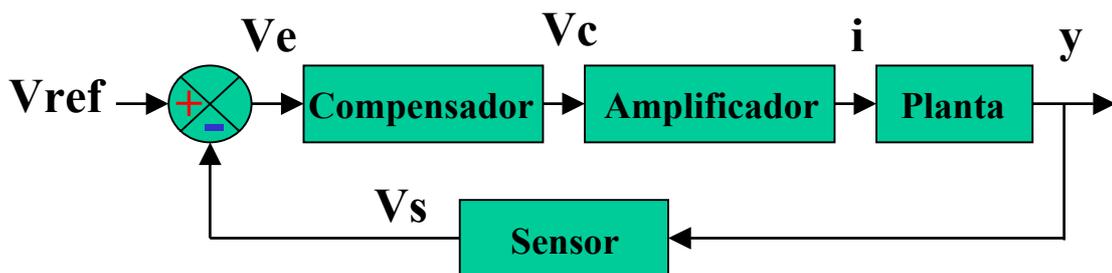


Fig. 4.20. Diagrama de Blocos do Sistema Maglev com Controle Analógico.

De acordo com os resultados das simulações realizadas e apresentadas no capítulo 3, a compensador será um controlador PID analógico, cuja função de transferência é dado por:

$$C(s) = \frac{G_F \cdot s \cdot (s + 42)}{s} \quad (\text{eq. 4.11})$$

onde:

G_F é o ganho do compensador

A implementação do regulador eletrônico analógico do diagrama da figura 4.20 será realizada através do uso de amplificadores operacionais, cujo projeto será descrito a seguir.

4.5.2. Projeto do Circuito Somador

O circuito somador será implementado com o amplificador operacional LM324, o qual possui quatro amplificadores por chip, podendo ser alimentado com fonte simétrica ou fonte simples até o máximo de 32 V. O circuito somador receberá o sinal do sensor óptico analógico, ou seja o sinal de posição da esfera, e o e o sinal de referência, os quais variam de 0 a 5V.

O circuito divisor de tensão que permite o ajuste da tensão de referência é mostrado pela figura 4.21.

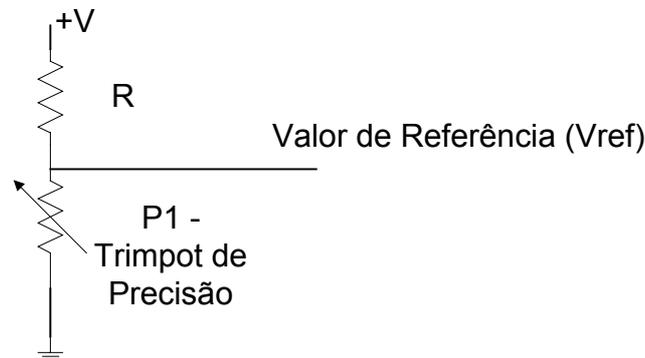


Fig. 4. 21. Circuito Divisor de Tensão para Ajuste da Tensão de Referência

O projeto do divisor de tensão é mostrado a seguir:

$$V_{ref} = V_{cc} \cdot \frac{R_{P1}}{R + R_{P1}} \quad (\text{eq. 4.12})$$

onde :

$$V_{cc} = +V$$

Para $V_{cc} = 24V$, $R = 33K\Omega$ e $P_1 = 10K\Omega$, resulta em $R_{p1} = 8,68k\Omega$ para tensão de referência ajustada em 5 V.

Logo:

$$R_{p1} = 8,68K\Omega$$

O valor de R_{p1} é o valor de resistência que deverá ser ajustado no trimpot de precisão P_1 para obter uma tensão de referência igual de 5 V. A figura 4.22 mostra-se a tabela dos valores de tensão de referência versus a resistência do trimpot e seu gráfico correspondente.

Vref	Trimpot
0,50	0,70
1,00	1,43
1,50	2,20
2,00	3,00
2,50	3,84
3,00	4,71
3,50	5,63
4,00	6,60
4,50	7,62
5,00	8,68

Tabela 4.3. Ajuste do Valor da Referência

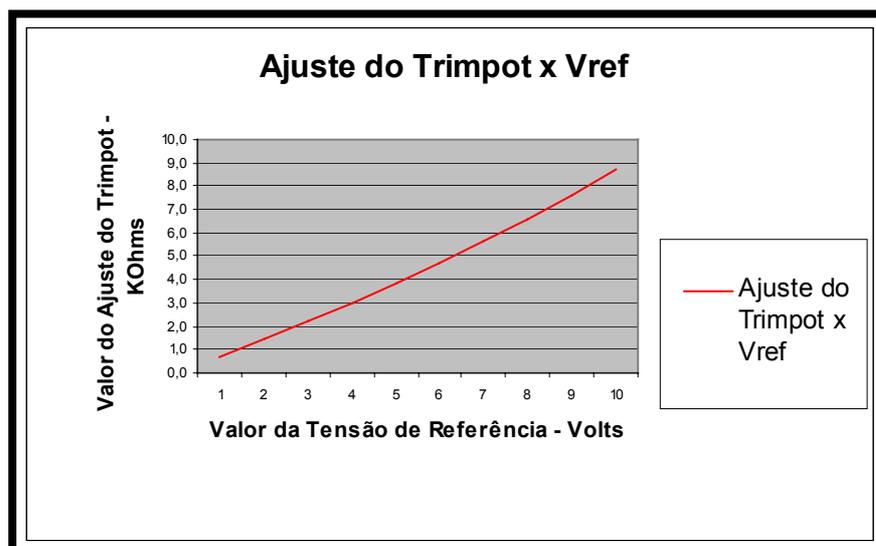


Fig. 4.22. Gráfico do Ajuste da Tensão de Referência x Trimpot de Ajuste de Vref

O sinal fornecido pelo sensor analógico será atenuado por um divisor de tensão com o objetivo de adequar a amplitude do sinal em função dos limites de alimentação a serem utilizados no circuito prático.

A figura 4.23. mostra o circuito correspondente a esta etapa do projeto.

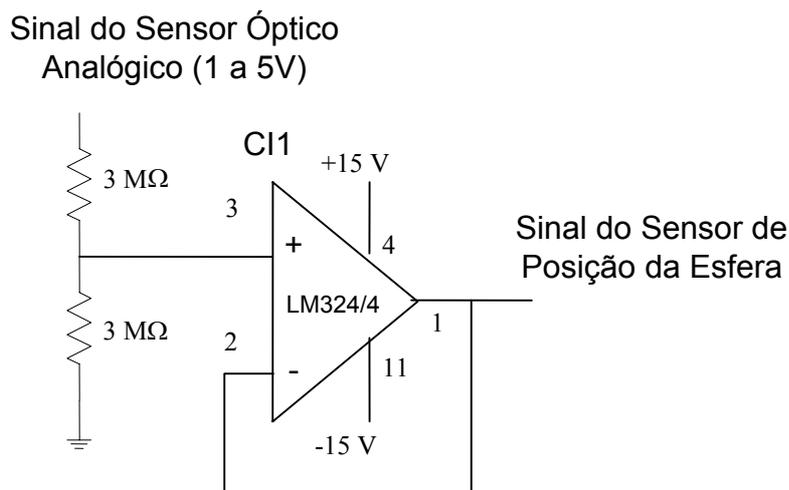


Fig. 4.23. Circuito de Acoplamento do Sinal do Sensor Óptico Analógico

O circuito utiliza um seguidor de tensão que possui alta impedância de entrada e baixa impedância de saída de forma a isolar o sensor do circuito somador, e com isto evitar sobrecarga na saída analógica do sensor Laser.

O circuito somador é mostrado a seguir considerando ganho unitário e todos os resistores iguais a 100kΩ.

A figura 4.24 apresenta o circuito somador completo.

Sinal do Sensor Óptico
Analogico (1 a 5V)

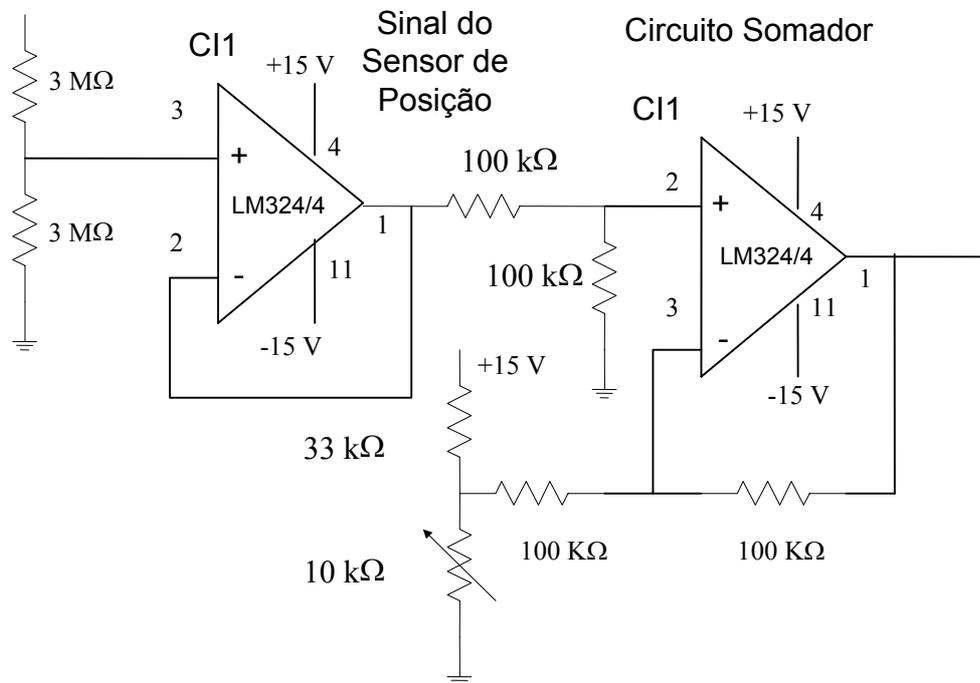


Fig. 4.24. Circuito Prático do Somador

Conforme já mencionado anteriormente foi definido que o ganho do circuito somador é unitário e sua saída é calculada através da equação (4.13).

$$V_{somador} = V_{sensor} - V_{ref} \quad (\text{eq. 4.13})$$

onde:

$V_{somador}$ é a tensão de saída do circuito somador

V_{sensor} é a saída analógica do sensor Laser

V_{ref} é a tensão de referência do sistema

4.5.3. Projeto do Controlador Eletrônico Analógico PID

A figura 4.25 mostra o circuito básico do controlador PID que será projetado e implementado para o sistema didático de controle para Levitação Magnética.

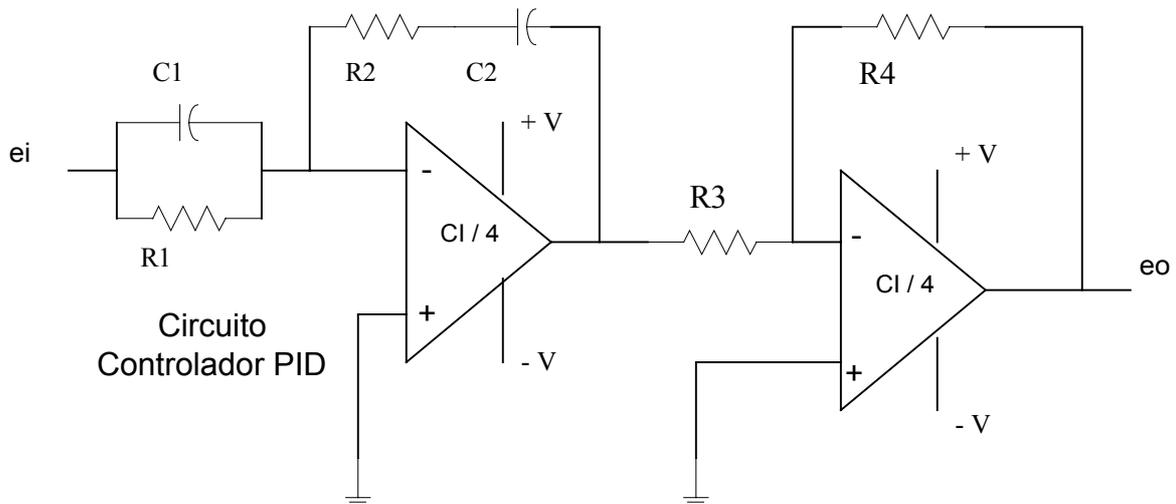


Fig. 4.25. Circuito Básico do Controlador PID

A função de transferência do compensador é dada por:

$$G_{CAAF}(s) = \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{(R_1 \cdot C_1 \cdot s + 1) \cdot (R_2 \cdot C_2 \cdot s + 1)}{R_2 \cdot C_2 \cdot s} \quad (\text{eq. 4.14})$$

onde:

$G_{CAAF}(s)$ é a função de transferência do circuito compensador PID

Os cálculos para o projeto prático do compensador é feito em função dos valores dos pólos e zeros obtidos na simulação, conforme equação (4.11).

As seguintes equações são válidas e conhecidas para o circuito:

$$K_d = \frac{R_4 \cdot R_2 \cdot C_1}{R_3} \quad (\text{eq. 4.14})$$

$$K_i = \frac{R_4}{R_3 \cdot R_1 \cdot C_2} \quad (\text{eq. 4.15})$$

$$K_p = \frac{R_4 \cdot (R_1 \cdot C_1 + 1) \cdot (R_2 \cdot C_2 + 1)}{R_3 \cdot R_1 \cdot C_2} \quad (\text{eq. 4.16})$$

Conforme já obtido na simulação, sabe-se que $K_d = 0.12$, $K_i = 0.001$, $K_p = 4$.
Então, fixando $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 1000\mu F$ e $R_3 = 100k\Omega$, tem-se:

$$R_2 \cdot C_2 = \frac{1}{33,33} \quad (\text{eq. 4.17})$$

$$R_1 \cdot C_1 = \frac{1}{0,00025} \quad (\text{eq. 4.18})$$

A partir da equação (4.17), obtém-se o valor de R_2 :

$$R_2 = \frac{1}{33.33 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 3k\Omega$$

Logo:

$$R_2 = 3k\Omega$$

A partir da equação (4.18) obtém-se o valor de R_1 :

$$R_1 = \frac{1}{0,00025 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} = 4M\Omega$$

Logo:

$$R_1 = 4M\Omega$$

A partir da equação (4.14) obtém-se o valor de R_4 :

$$R_4 = \frac{K_d \cdot R_3}{R_2 \cdot C_1} \quad (\text{eq. 4.19})$$

Substituindo os valores e calculando, vem:

$$R_4 = \frac{0,12 \cdot 100 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 4K\Omega$$

$$R_4 = 4K\Omega$$

O circuito final do compensador é mostrado pela figura 4.26.

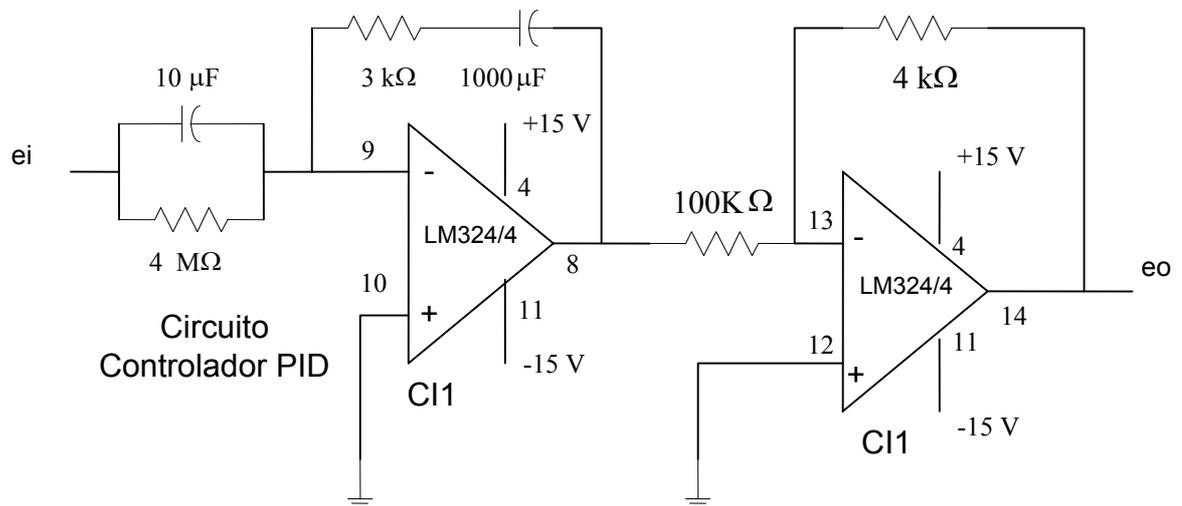


Fig. 4.26. Circuito Prático do Controlador PID

4.5.4. Projeto da Fonte de Corrente Controlada por Tensão

A fonte de corrente controlada por tensão é constituída por um circuito seguidor de tensão para evitar sobrecarga na saída do controlador PID e um amplificador de corrente a transistor. O amplificador operacional utilizado é o LM324, montado na configuração de seguidor de tensão e amplificador de corrente excita um transistor de potência BD677.

Foi adicionado um diodo “free wheeling” em paralelo com a bobina, a fim de evitar que picos negativos provenientes da inversão de polaridade da bobina danifiquem o transistor bipolar. O diodo “free wheeling” é o 1N4001.

O circuito foi projetado para uma excursão de corrente de 0 a 0,9 A, considerando os dois tipos de bobinas utilizadas no protótipo, ou seja, para bobina Siemens modelo 3TH42 que consome no máximo 0,25 A e para bobina Telemecanique modelo LP1D6511, 0,88 A.

Foi inserido entre o controlado PID e o amplificador de corrente um somador que irá compatibilizar a faixa de tensão de operação dos circuito amplificador de forma a evitar que haja saturação positiva ou negativa neste estágio de saída, fato que levaria o sistema a trabalhar de forma similar ao on-off.

Com a atuação do segundo somador a faixa de entrada de tensão no amplificador está entre 0.25 V até 4.85 V. Um divisor de tensão irá compatibilizar esta faixa de tensão com a faixa permitida pelo amplificador, a fim de operar na região linear de amplificação.

O circuito do amplificador de potência é mostrado na figura 4.29.

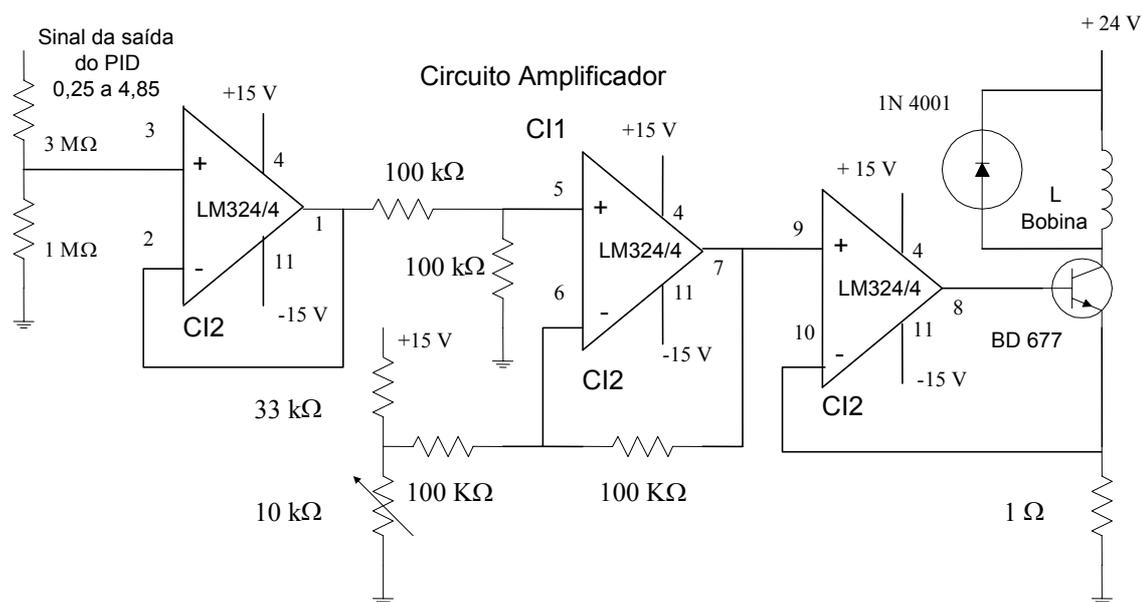


Fig. 4.27. Fonte de Corrente controlada por Tensão – Amplificador do Sistema

Os testes iniciais foram realizados através de uma montagem do circuito em protoboard conforme ilustra a figura 4.28.

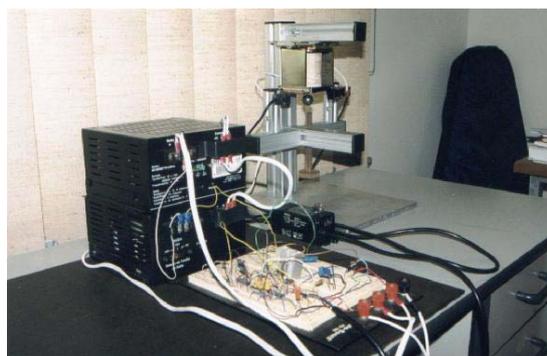
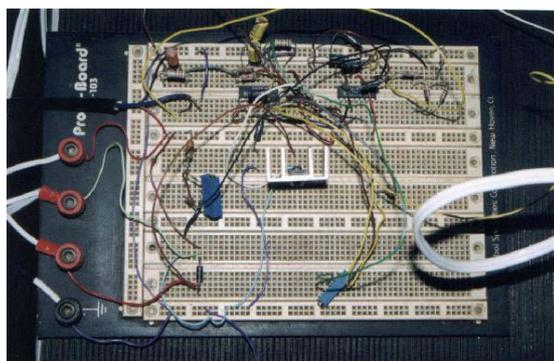


Fig. 4.28. Montagem do Regulador Analógico em Protoboard

4.5.5. Descrição do Circuito Completo do Regulador Analógico

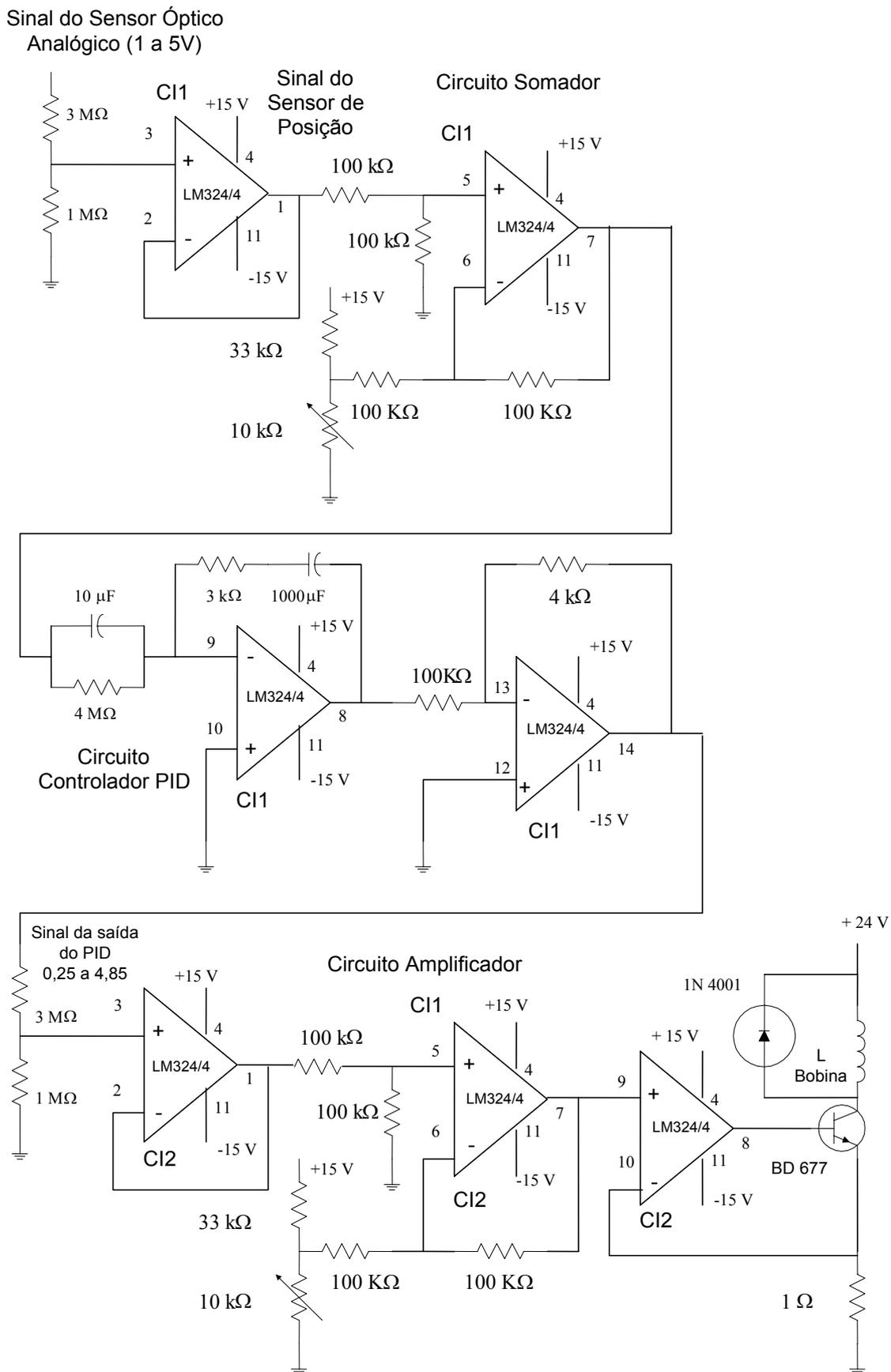


Fig. 4.29. Circuito Completo do Regulador Analógico do Sistema Maglev

O segundo somador foi incluído no circuito com o objetivo de adequar o sinal de saída à entrada do amplificador, evitando que haja saturação ou corte do transistor de saída, e com isto, eliminar a possibilidade do circuito atuar como controlador tipo ON/OFF, fato que anularia a função PID.

O circuito completo do regulador analógico foi montado em placa de circuito impresso conforme mostra a figura 4.30.

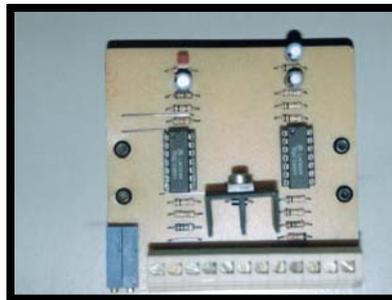
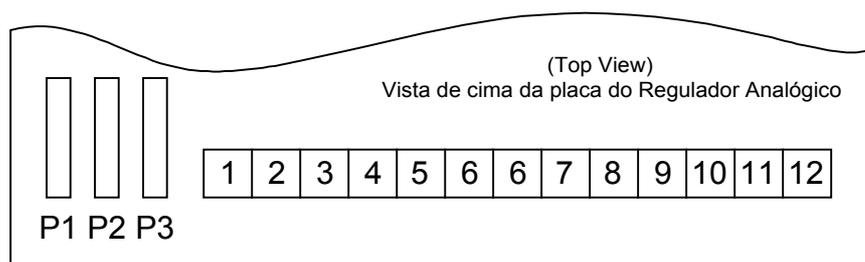


Fig. 4.30. Placa em Circuito Impresso do Regulador Analógico

Na seqüência a figura 4.31. apresenta em detalhe as conexões referente ao conector tipo Conexel e os trimpots utilizados na placa do regulador analógico.



DESCRIÇÃO DO CONECTOR CONEXEL E TRIMPOTS

TRIMPOTS

P1 - Trimpot de Precisão para ajuste da Referência

P2 - Trimpot de Precisão para ajuste de ganho do Compensador.

P3 - Trimpot de Precisão para ajuste de ganho do Amplificador.

CONECTOR CONEXEL:

1 e 2	Jumper JP1 do Compensador
3 e 4	Jumper JP2 do Amplificador
5 e 6	Conexão dos terminais da Bobina
7	Terra
8	Entrada do Sensor Analógico
9	Blindagem do Sensor Analógico
10	Terra
11	Fonte de Alimentação / +V
12	Fonte de Alimentação / -V

Fig. 4.31. Detalhamento do Conector Conexel e Trimpots da placa do Regulador Analógico.

Observa-se que o trimpot de precisão P3 é opcional caso haja necessidade de ajuste de ganho do amplificador.

Adicionalmente o circuito amplificador do sistema foi montado em placa de circuito impresso separada com o objetivo de utilizá-lo posteriormente no fechamento da malha digital.

A figura 4.32. mostra esta montagem, cujo circuito foi ilustrado através da figura 4.27.

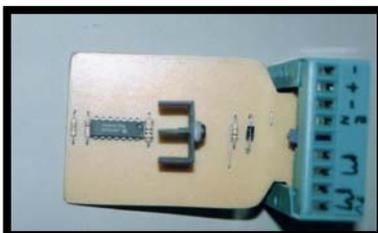


Fig. 4.32. Amplificador de Potência montado separadamente do Regulador Analógico

O detalhamento das conexões do amplificador do sistema Maglev é mostrado pela figura 4.33.

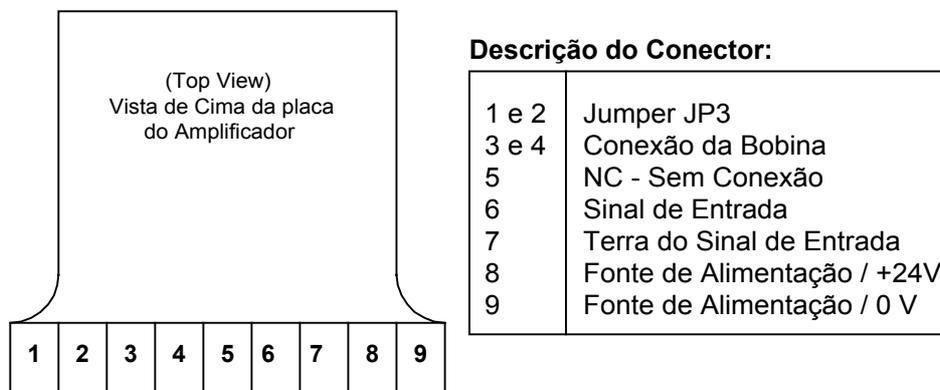


Fig. 4.33. Descrição das Conexões do Circuito Amplificador

4.6. Descrição do Projeto do Sistema em Malha Fechada Digital

4.6.1. Introdução

Até o momento apresentou-se a implementação do sistema Maglev em malha aberta e em malha fechada utilizando-se um controlador e uma malha de realimentação analógica, ou seja, com sinais contínuos no tempo em qualquer ponto da malha. O sistema em malha fechada digital compreende o uso de um microcomputador, conversores A/D e D/A, e outros componentes, como por exemplo, sensores. Esta malha que contém sinais discretos e contínuos no tempo em diferentes pontos desta, a qual é denominada “Sistema de Dados Amostrados”, ou no idioma inglês, por *Sampled Data System* [Franklin & Powell, 1980,p.131].

4.6.2. Descrição do Sistema Básico em Malha Fechada Digital

A figura 4.34 mostra o diagrama em blocos básico deste tipo de sistema.

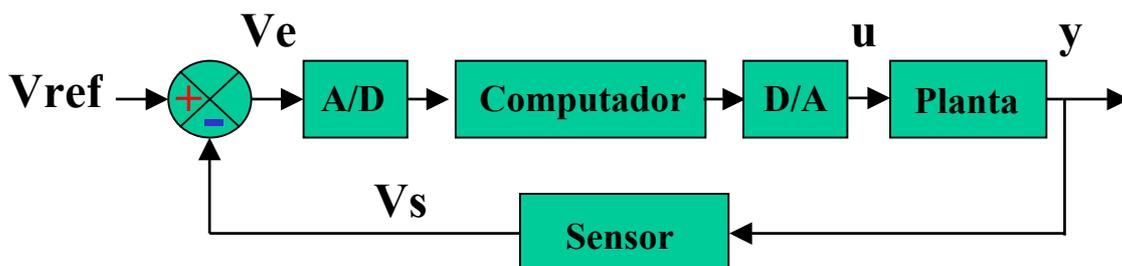


Fig. 4.34. Diagrama de Blocos do Sistema Maglev em Malha Fechada Digital

Onde:

- V_{ref} é a tensão de referência do sistema.
- V_e é a tensão de erro do sistema.
- V_s é a tensão de saída do sensor de posição
- u o sinal de entrada da planta (Amplificador de Corrente)
- y é a posição da esfera.

A idéia básica consiste na conversão do sinal de erro do sistema, ou seja a diferença entre o sinal analógico do sensor de posição e o sinal de referência, para um sinal do tipo digital ou discreto, função executada por um conversor A/D.

Um programa de controle que roda no computador, emula um regulador eletrônico que trata este sinal e resulta em um sinal de saída a ser convertido novamente, porém agora para sinal analógico, função executada por um conversor D/A . O sinal fornecido pelo conversor D/A atuará diretamente na planta, a qual por sua vez responde a esta excitação, realimentando o sistema.

O controlador simulado e implementado por software no computador poderá ser do tipo analógico ou digital. Conforme já ressaltado anteriormente, a técnica de projeto do controlador ou regulador digital não será abordada neste trabalho e o controlador a ser utilizado será do tipo PID.

Para as funções de conversores A/D e D/A será utilizada um placa comercial padrão ISA instalada no slot do computador. O computador será um modelo que possua velocidade suficiente para análise da resposta do sistema Maglev.

O sensor e planta já foram amplamente discutidos neste capítulo e nada altera-se para o sistema em malha fechada digital. Ressalta-se que o amplificador de corrente foi incorporado na planta.

A partir de agora serão descritos os detalhes de projeto, montagem e testes do sistema didático para levitação magnética utilizando malha fechada digital. Após a experiência adquirida com o sistema em malha fechada analógica direcionou-se esforços para viabilizar a malha fechada digital com o objetivo de concluir este trabalho, objetivando a finalização deste com a comparação de resultados entre os sistemas digital, calculado e identificado.

4.6.3. Detalhamento do Projeto do Sistema em Malha Fechada Digital

4.6.3.1. Introdução

Neste tópico serão detalhados os componentes utilizados no sistema real em malha fechada digital, considerando que o sistema deverá ser reproduzido na prática de forma didática.

4.6.3.2. O Computador do Sistema

O computador do sistema é do tipo Pentium III 700 MHz da Intel com 128 Mbytes de RAM, 20 Gbytes de HD, monitor SVGA com resolução de 1024x768. A principal característica a ser rigidamente considerada é a velocidade do computador, pois com um valor menor que o utilizado há risco de não ser possível a captura e registro das respostas do sistema Maglev. O computador deve também disponibilizar slots padrão PCI e ISA para instalação da placa conversora A/D e D/A .

É recomendado o sistema operacional Windows 98 caso utilize o Matlab versão 5.3., e o mínimo de hardware instalado, ou seja sem placas adicionais, como por exemplo, modem, rede, vídeo 3D, etc.

A atuação da placa conversora A/D e D/A é extremamente sensível em termos de ruído e a conflitos de endereço no barramento do computador, logo quanto mais simples e limpa for a configuração, mais chance de sucesso e de evitar travamentos da CPU indesejáveis.

Outra recomendação importante é que a memória RAM seja de boa qualidade e preferencialmente em um único pente, fato que também evita travamentos da CPU.

4.6.3.3. A Programação e Simulação do Sistema

Neste trabalho optou-se pelo uso do Simulink para aquisição, registro de dados e implementação do controlador, assim como o fechamento da malha de controle digital. A idéia básica é desenhar o diagrama de blocos do sistema no Simulink, considerando a placa PCL-711B, implementar um controlador e fechar a malha na prática, ou seja recebendo o sinal de posição na entrada A/D do conversor A/D e retirando o sinal na saída D/A para a entrada do amplificador da planta.

4.6.3.4. O conversor A/D e D/A do Sistema

O conversor A/D e D/A é implementado através de uma placa da marca Advantec modelo PCL-711B / PC Multilab Card, a qual possui fácil configuração e custo benefício bastante aceitável para o projeto, sendo compatível com computadores IBMPC do tipos XT e AT.

A placa PCL-711B exige que o computador tenha slot padrão ISA, apesar da existência de outros modelos de placas no padrão PCI. Esta placa possui resolução de 12 bits na conversão A/D, 8 canais de entradas analógicas e faixas de tensão analógicas de entrada programáveis, como por exemplo, $\pm 5, \pm 2.5, \pm 1.25, \pm 0.625$ e ± 0.3125 .

A placa opera com interrupção, trigger programável ou trigger externo, possui uma saída D/A com 12 bits de resolução e faixas de tensão de saída também programáveis, como por exemplo, $+5V$ ou $0V$ a $+10V$.

A placa também possui entradas e saídas digitais de 16 bits e é versátil em sua programação, permitindo uso do próprio Simulink, Basic, Visual Basic, Visual C, C++, etc.

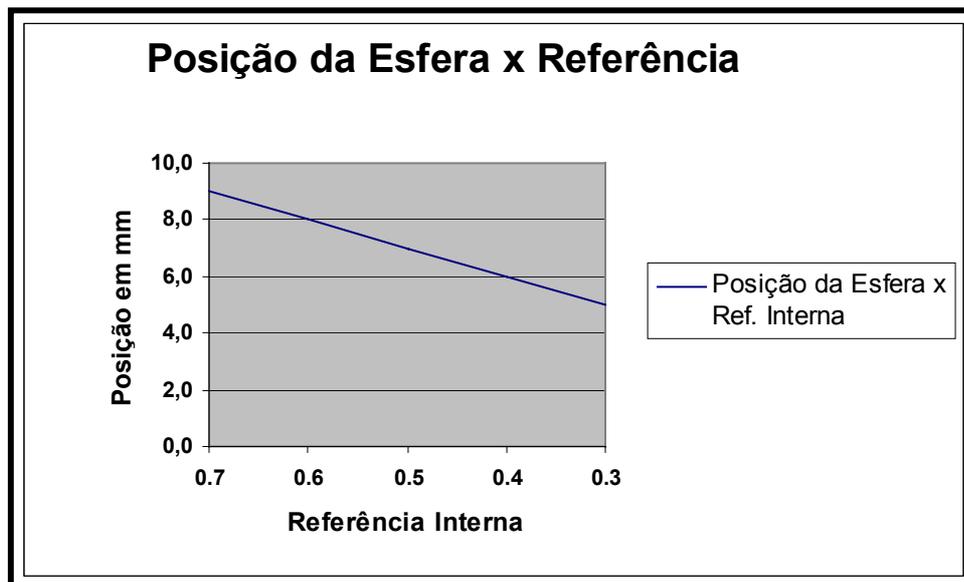
4.6.3.5. O Controlador do Sistema

O controlador escolhido foi do tipo PID e foi ajustado até que o sistema atingisse sua estabilidade. Para isto, ajustou-se $K_p=4$, $K_i=0.001$ e $K_d=0.12$, através do programa Simulink, o qual permite selecionar e configurar o controlador PID sem qualquer dificuldade.

4.6.3.6. A Referência do Sistema

A referência do sistema é um valor constante determinado por um módulo de constante do Simulink e possui uma correspondência direta em tensão de saída do conversor A/D e em posição da esfera em mm. Para o sistema, a referência foi considerada entre 0.3 e 0.7, correspondendo entre 5 e 9 mm respectivamente.

A figura 4.35 mostra o gráfico do comportamento da referência do sistema real em relação ao deslocamento da esfera.



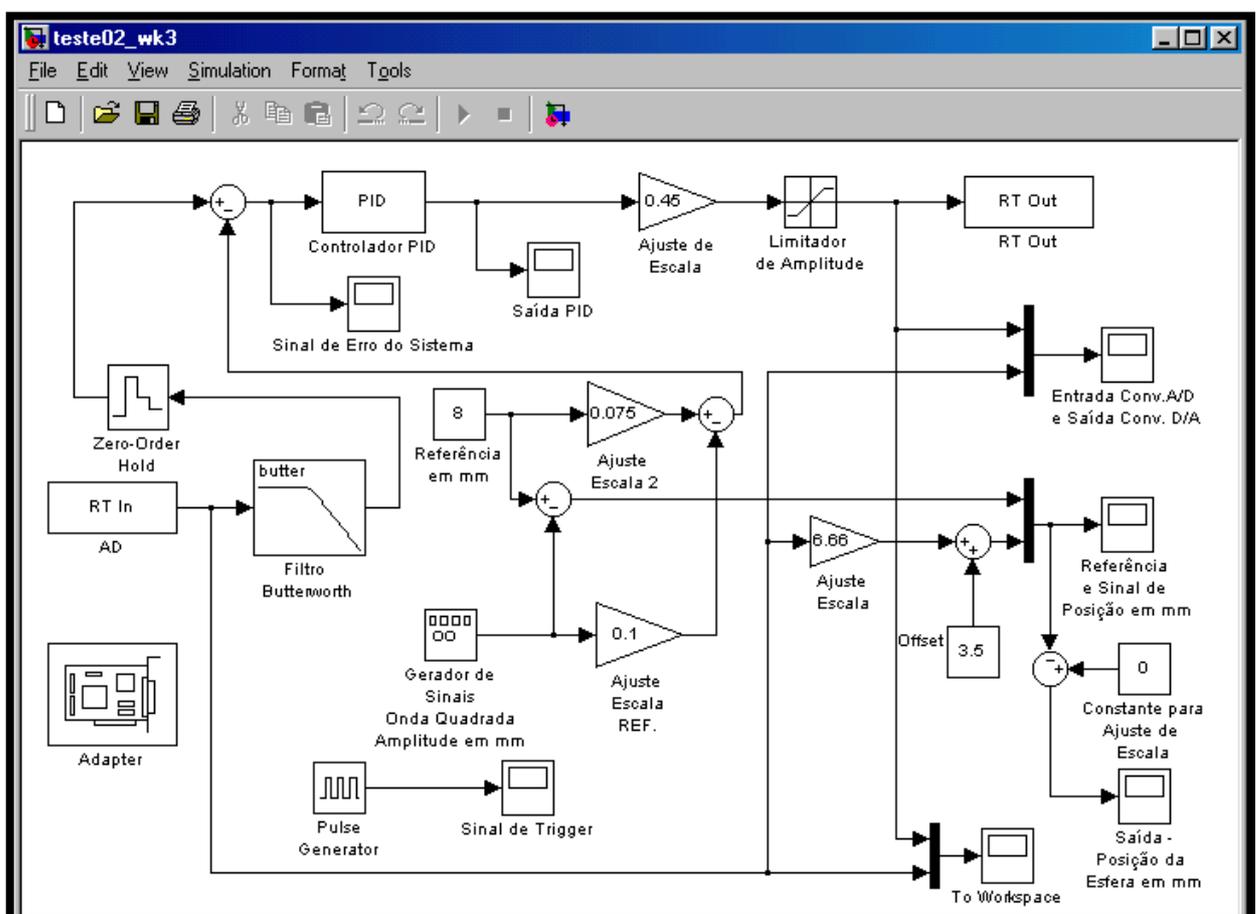
4.35. Relação entre a Referência Interna do Sistema Real e a Posição da Esfera

Com objetivo de variar a posição da esfera e rastreabilidade do sistema, utilizou-se somado ao sinal da referência interna um sinal do módulo gerador de funções do Simulink. A amplitude do sinal foi ajustada em 0.05, a qual corresponde a uma variação de posição da esfera igual a 0.5 mm.

Por ser tratar de um gerador de funções optou-se por diferentes tipos de variações na referência, a fim de verificar o comportamento dinâmico do sistema. Testou-se o sistema com onda quadrada, senoidal, constante e nula. Observa-se que para sinais oscilantes no tempo foi utilizado um duty cycle de 50%, e que esta técnica poderia ter sido igualmente adotada para os testes com o circuito analógico.

4.6.3.7. Diagrama em Blocos do Sistema Maglev em Malha Fechada Digital

A figura 4.36 mostra o diagrama em blocos do sistema Maglev em malha fechada digital exatamente como foi implementado na prática.



4.36. Diagrama em Blocos do Sistema Maglev em Malha Fechada Digital

4.6.3.8. Detalhamento Prático do Projeto e Configuração do Sistema

4.6.3.8.1. Introdução

Esta etapa descreve como a implementação do sistema real foi desenvolvida na prática. Após a montagem do diagrama e das conexões físicas, iniciaram os testes práticos e ajustes dos parâmetros do controlador PID até atingir a estabilidade do sistema. Os resultados da simulação do sistema calculado auxiliaram de forma significativa e serviram como ponto de partida para os ajustes práticos.

4.6.3.8.2. Descrição Geral

Como base na figura 4.36, pode-se afirmar que o módulo chamado Adapter refere-se ao conversor A/D e D/A e deve ser configurado no endereço 300H , bit A8 habilitado, Entrada Digital em Nibble, Saída Digital em Bit, e Adapter selecionado através do Simulink para placa modelo PCL-711B. Se este procedimento for corretamente executado e a placa estiver devidamente instalada no computador já com os softwares instalados, a placa deverá ser reconhecida pelo hardware de imediato e o módulo ativado no diagrama.

Os módulos RT In ou RT Out referem-se aos conversores A/D e D/A respectivamente e devem ser configurados com tempo de amostragem igual a 0.0001 segundos e o canal do adaptador igual a 2 para RT In e igual a 1 para RT Out, lembrando que tais definições dependem e tem relação direta com a conexão física das entradas e saídas da placa ao sistema real, portanto devem ser checadas previamente.

Um ponto prático e importante a relatar é que os módulos RT's apresentam comportamentos distintos em relação aos níveis de tensão externos e internos ao sistema, isto é, $\pm 5V$ aplicado externamente, corresponde a $\pm 1V$ medido internamente na saída do módulo RT In. Da mesma forma, para o módulo RT Out, tem-se que para $\pm 1V$ medido internamente, obtém-se externamente valores entre 0 e $+5V$ correspondentes.

Desta forma, é normal a necessidade de eventuais ajustes internos para compatibilizar ganhos e escalas de tensão.

Como já mencionado anteriormente a placa A/D é muito susceptível a ruídos e para minimizar tais efeitos utilizou-se, além dos cuidados triviais nas conexões físicas, os módulos filtro Butterworth e ZOH - Zero Order Hold para filtragem do sinal de saída do conversor A/D.

Na seqüência o sinal é tratado pelo controlador PID, já configurado para $K_i=0.001$, $K_d=0.12$ e $K_p=4$, cuja saída é direcionada ao conversor D/A, passando por um módulo de ajuste de ganho e escala e um limitador de amplitude.

O limitador de amplitude foi configurado para faixa de $\pm 1V$ para atender as características técnicas do conversor D/A .

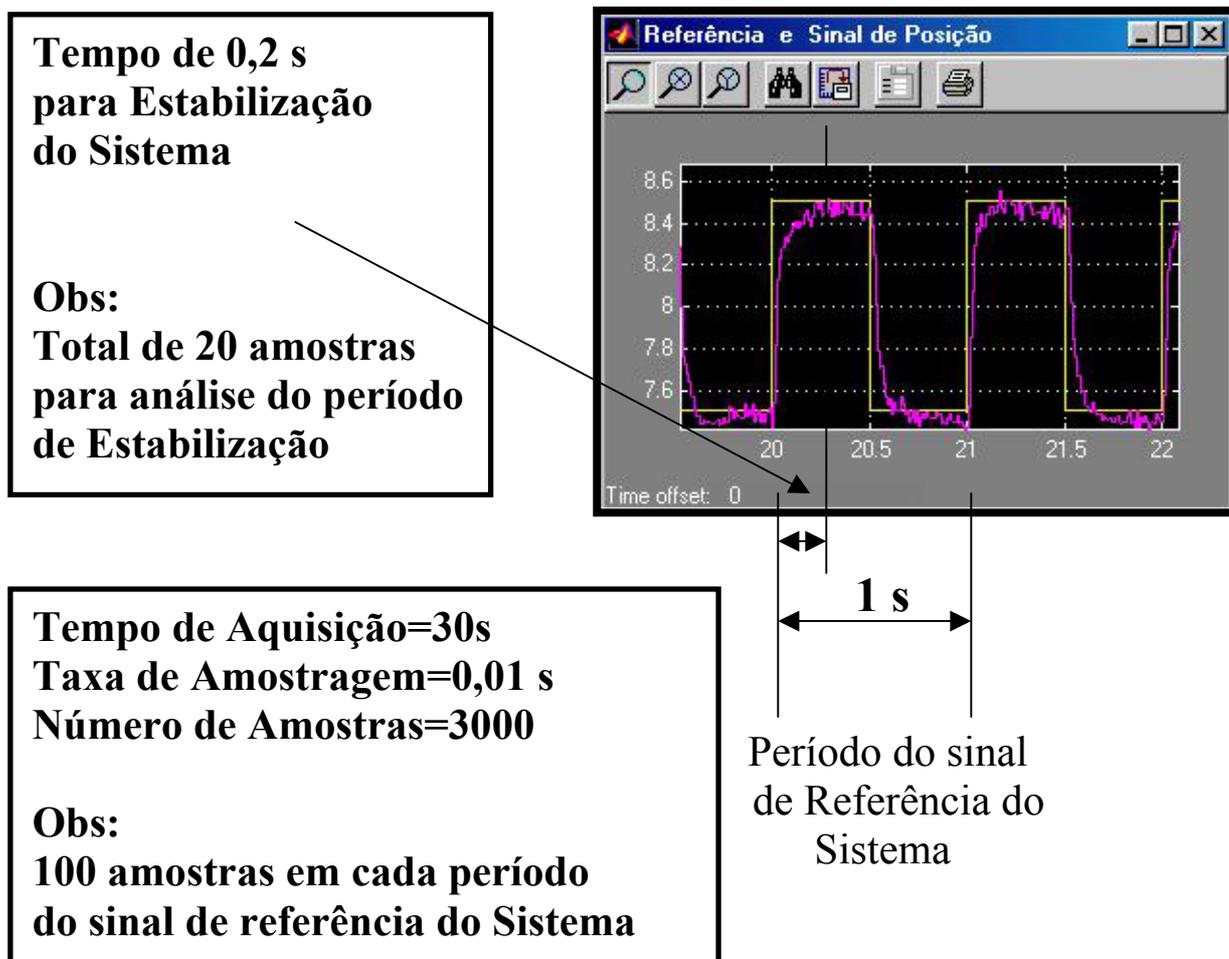
A referência do sistema utiliza um bloco de constante do Simulink e um módulo gerador de funções, ambos unidos por um somador/subtrator. Ajustes de escala são necessários para adequar valores de referência interna e posição da esfera em mm.

O registro e monitoramento das variáveis do sistema foram realizados através de scopes (osciloscópios) do Simulink posicionados estrategicamente no diagrama. Foram monitorados os seguintes pontos: sinal de erro do sistema na saída do comparador e entrada do controlador PID, a saída do controlador PID, o sinal de trigger do sistema, o sinal de posição da esfera em mm na saída do sistema ou entrada do conversor A/D e sinais nas saídas dos conversores A/D e D/A e o sinal de referência sincronizado com o sinal de posição.

4.6.3.8.3. Definição do Tempo e Taxa de Amostragem do Sistema Real

O taxa e tempo de amostragem do sistema é um parâmetro muito importante e deve ser definido com critério para que nenhum dado importante seja perdido durante a aquisição de dados. A taxa definida para o scope Workspace foi de 0.01 segundos e o tempo de aquisição de dados igual a 30 segundos, logo um total de 3000 amostras.

A figura 4.37 mostra que tais definições são mais que suficientes para análise detalhada do sistema Maglev, o que é constatado através do comportamento dinâmico do sistema, o qual apresenta um tempo de estabilização entre 0,2 a 0,3 segundos.

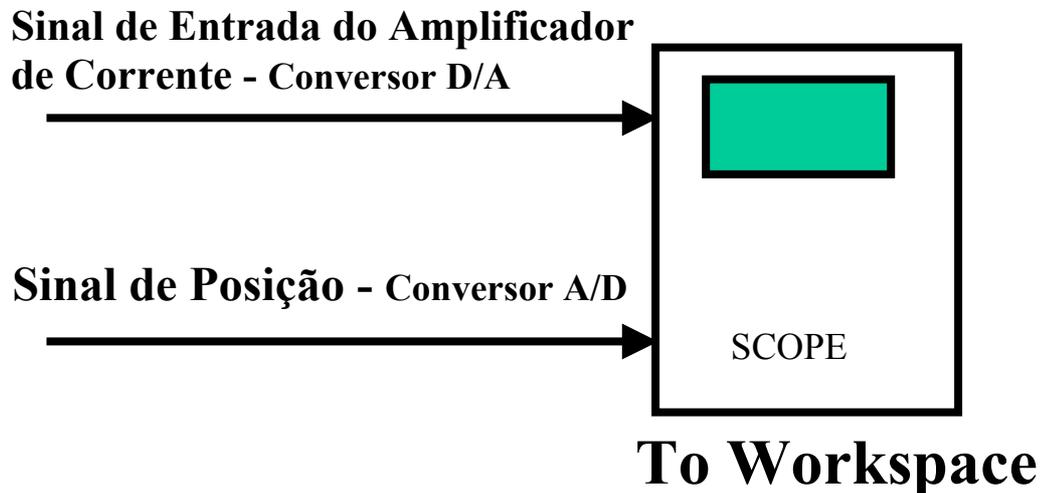


4.37. Definição do Tempo e Taxa de Amostragem para o Sistema Real

4.6.3.8.4. A Aquisição de Dados do Sistema Real

A aquisição de dados é realizada através de um scope específico em que sua configuração define que os dados monitorados são enviados para o workspace do sistema Matlab/Simulink, região alocada em disco para armazenagem dos dados adquiridos, e então tratados posteriormente.

A figura 4.38 ilustra este scope e o processo de aquisição de dados.



4.38. Sistema de Aquisição de Dados - Envio para o Workspace

Os sinais utilizados para aquisição de dados do sistema Maglev referem-se aos sinais de entrada e saída do sistema se o considerarmos como um bloco ou um caixa preta. Tais sinais correspondem ao sinal do sensor de posição da esfera e ao sinal de entrada do amplificador de corrente.

É necessário um tratamento dos dados adquiridos do sistema real através do programa Matlab, de forma a prepará-los e formatá-los organizadamente para utilização posterior na simulação e identificação do sistema..

Com o programa Matlab versão 5.3 ou superior e Simulink versão 3 ou superior já instalados no computador, instala-se o módulo tempo real do Matlab, conhecido por RTW-Real Time Workshop utilizando-se o cdrom de instalação do programa. Após este procedimento, instala-se o programa Watcom que é um compilador e gerador automático de códigos em linguagem C para o Simulink.

Para instalar este compilador cria-se um diretório denominado Watcom no diretório raiz e transfere-se os arquivos respectivos do cdrom ou disquete que acompanha o pacote [The MathWorks Inc, “Control Experiments for the Feedback Magnetic Levitation System using Real Time Linux Target (RTLTL)”, October – 2000] .

Ressalta-se que há necessidade de alterar algumas linhas de configuração dos arquivos autoexec.bat e config.sys de forma a permitir que o sistema operacional reconheça os caminhos necessários para o funcionamento correto do compilador.

Em resumo, a aquisição de dados em tempo real requer o uso do Matlab, Simulink, do módulo tempo real, RTW e do compilador Watcom. O procedimento básico é conectar e iniciar o sistema para aquisição de dados e aguardar 30 segundos para a amostragem e então iniciar a avaliação da dinâmica do sistema [Carnegie Mellon “Control Tutorial for Matlab, University of Michigan, 1997], [The Math Works Inc, “Real Time Windows Target for Use with Real Time Workshop”, 1999].

As rotinas de tratamento dos dados e a complementação deste procedimento prático serão abordadas no capítulo 5, assim como os resultados que estarão no capítulo 6.

A figura 4.38 mostra a montagem completa durante o desenvolvimento do projeto.



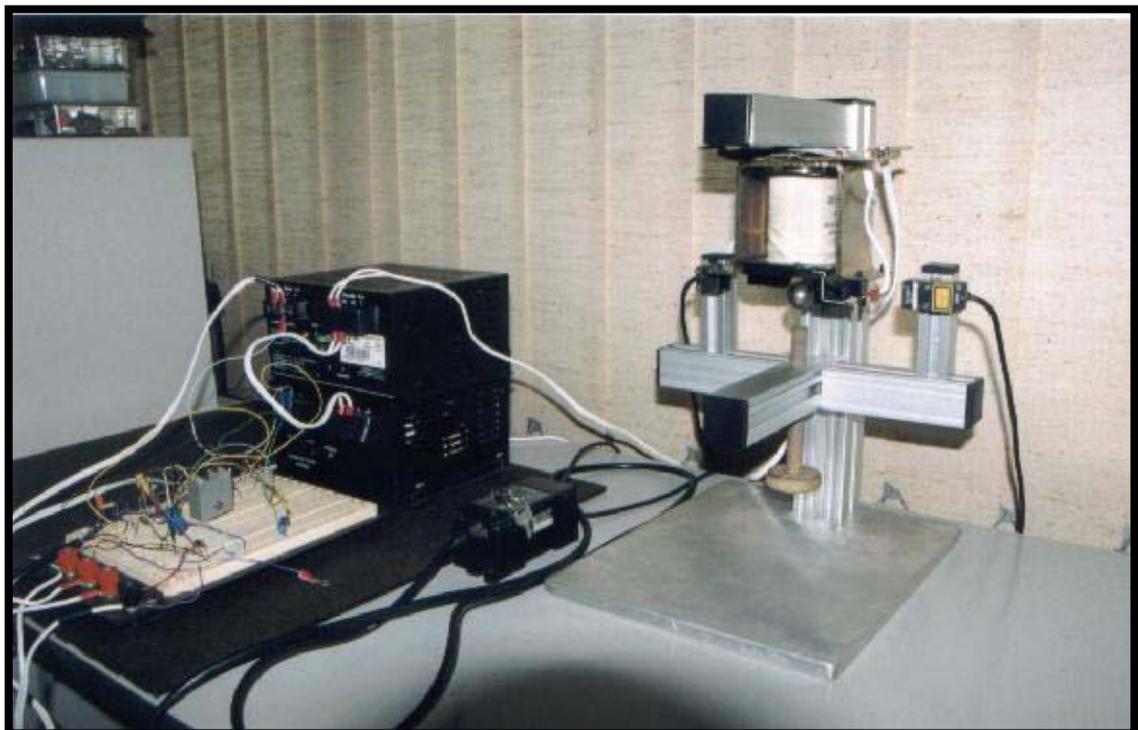
4.39. O Ambiente de Desenvolvimento do Projeto

4.7. Montagem Mecânica do Protótipo

A parte mecânica do sistema didático de controle para levitação magnética foi desenvolvida em função do tipo de sensor escolhido e também do modelo da bobina utilizada.

O protótipo foi montado em duas versões sendo a última selecionada como oficial para o projeto por utilizar itens comerciais de fácil aquisição no mercado.

A estrutura mecânica foi feita com perfis de alumínio com seção quadrada de 35 mm de lado, ilustrado pela figura 4.39, a qual apresenta uma foto que registra o desenvolvimento e o protótipo.



4.40. Protótipo Prático do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética

A figura 4.41 apresenta o desenho mecânico da montagem, cujo arquivo com extensão dwg (AutoCad-R14) estará disponível no CDRom que acompanha este trabalho.

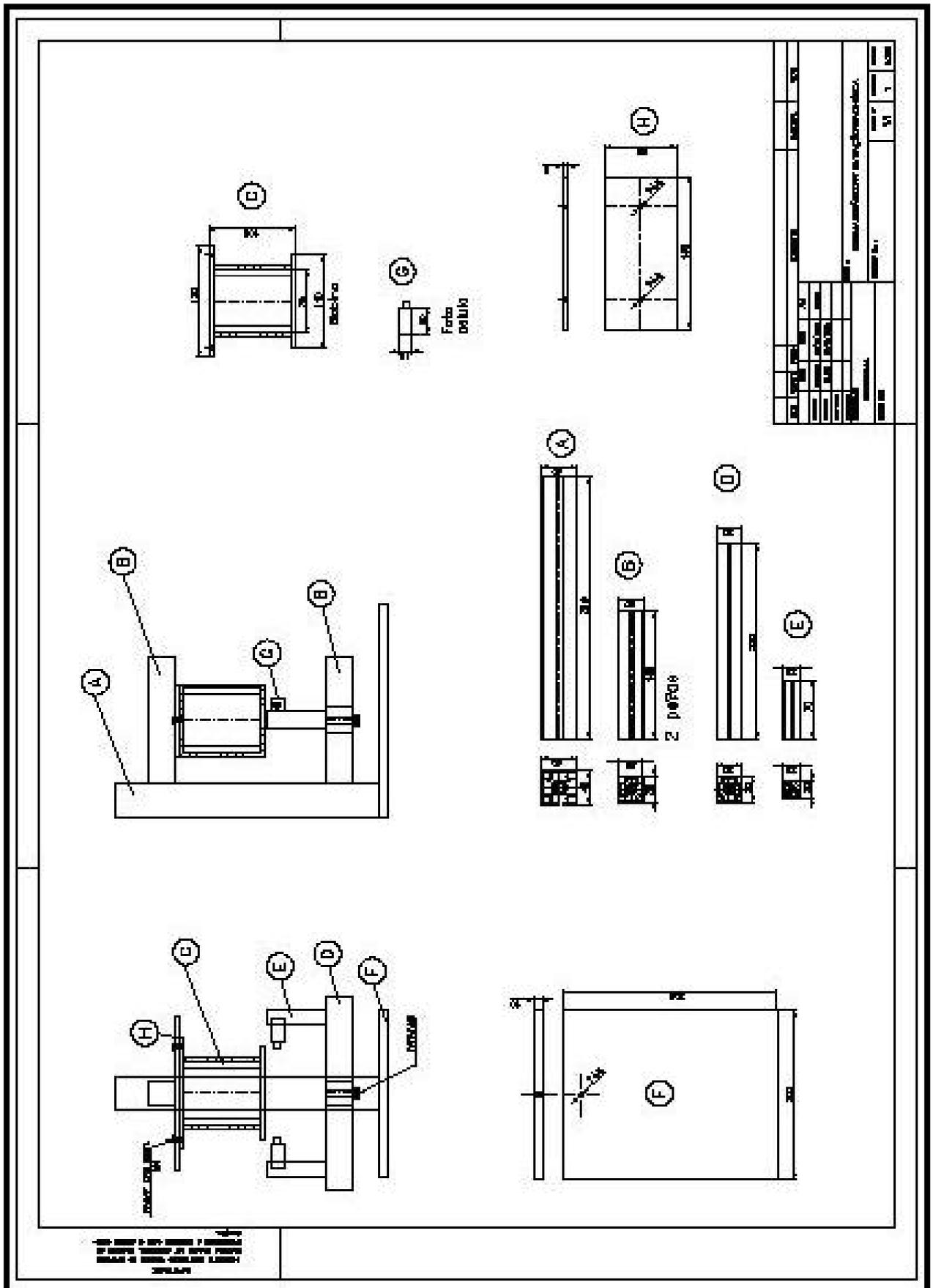


Fig. 4.41. Desenho Mecânico do Protótipo Prático do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética.

4.8. Custo do Protótipo do Sistema Real

Este tópico abrange aspectos de custo do projeto com o objetivo de permitir a reprodução do protótipo prático para expandir os recursos do laboratório de engenharia de controle.

A tabela 4.4. mostra cada item utilizado no protótipo, a quantidade, o custo total.

Descrição do Item	Quantidade	Custo Unitário R\$	Total R\$
Sensor Óptico para Medição da Posição da Esfera Marca Keyence ou Omron.	1	7000	7000
Bobina ou Eletromagneto Marca Siemens ou Telemecanique	1	300	300
Montagem Mecânica para suportar a fixação do sensor e da bobina	1	200	200
Fontes de Alimentação DC Marca Sense ou Equivalente	2	200	400
Amplificador com Conversor Tensão-Corrente	1	50	50
Placa A/D e D/A Marca Advantec	1	2450	2450
CUSTO TOTAL DO PROTÓTIPO		Cotação Dollar 1US\$=R\$ 3,50	10400

Tabela 4.4. Levantamento de Custo do Protótipo Prático

Conclusivamente pode-se afirmar que o custo do protótipo desenvolvido neste trabalho, da ordem US\$ 3000, corresponde a 30% do custo de um sistema similar importado, sendo tal informação fornecida pela empresa Feedback, Inc- USA.

È importante ressaltar que no início do desenvolvimento o câmbio do dólar era 1:1 e o custo do sensor era de R\$ 1500,00. Fica como sugestão a idéia de iniciar uma pesquisa e testes com sensor óptico analógico, linearizando sua saída, cujo custo atual deve ser da ordem de 30% do custo do sensor Laser.

Capítulo 5

Identificação do Sistema Real

Capítulo 5

Identificação do Sistema Real

5.1. Introdução

A representação e modelagem de sistemas é tema de variados estudos ao longo da história da engenharia de controle e tal fato provém do interesse do homem em descrever matematicamente os sistemas reais [Aguirre. 2000. p.30].

A identificação de sistemas é entendida e definida como uma área do conhecimento que estuda maneiras de modelar e analisar sistemas a partir de observações, ou seja, de dados. Mas, como observado, identificação de sistemas e estimação de parâmetros sempre significarão coisas diferentes para pessoas diferentes. [Rake. 1980, p.256]

Este capítulo irá descrever o procedimento de identificação de sistemas aplicado ao sistema didático de controle para Levitação Magnética considerando as rotinas do Matlab e recursos do programa Simulink e comprovação de resultados.

5.2. O Procedimento de Identificação do Sistema Real

5.2.1 Visão Geral da Identificação de Sistemas

Para identificar um sistema pode-se imaginá-lo como uma caixa preta possuindo uma entrada (u), uma saída (y) e um sinal de variação conhecido (e), conforme mostra a figura 5.1.

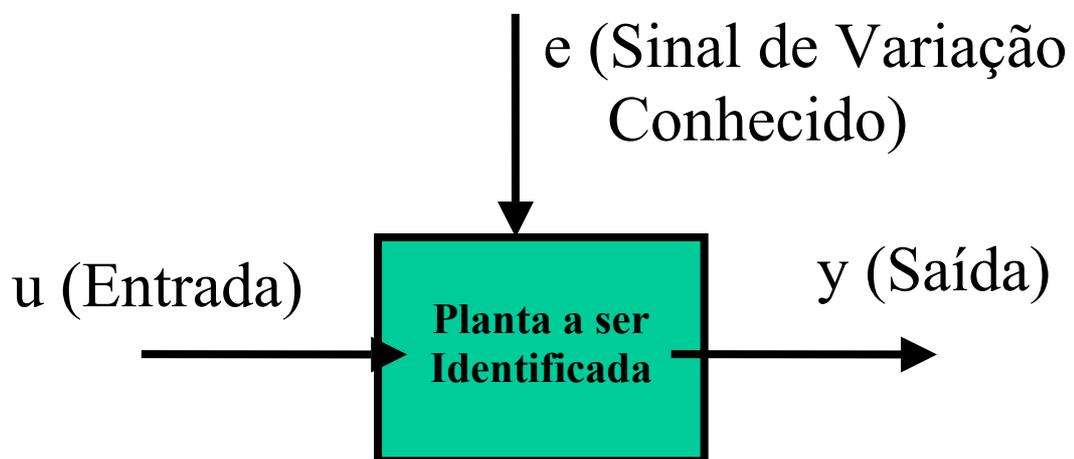


Fig. 5.1. Sinais Básicos para Identificação de um Sistema

A idéia é adquirir dados da entrada e da saída com uma entrada definida (variação) e através das equações de modelos conhecidos, estimar a F.T. do sistema real. Para isto será utilizado um diagrama específico gerado no Simulink em que um scope irá monitorar a entrada e a saída do sistema real e registrar estes dados no workspace. Com isto, os dados serão gravados em um arquivo do tipo ScopeData para então ser trabalhado matematicamente. O Matlab possui um módulo de identificação chamado ident que pode ser utilizado, mas também é possível equacionar o sistema através da edição de arquivos .m em Matlab, e assim atingir os mesmos objetivos [The Mathworks, Matlab Control System Toolbox, , p.1-12, 1992], [Jung. System Identification, pp520-538, 1999], [Jung, “System Identification ToolBox Manual for Use with Matlab, The Math Works, 1988] .

5.2.2 Etapas do Procedimento de Identificação do Sistema Real

Neste trabalho optou-se pelo equacionamento através da edição de arquivos .m no Matlab, apesar do módulo `ident` ter sido utilizado com sucesso durante o desenvolvimento.

Cria-se então, três arquivos básicos para gerar a F.T. do sistema real, e após a aquisição de dados, grava-se os dados em um arquivo do tipo `ScopeData` e roda-se os arquivos denominados `Estimate1.m`, `Estimate2.m` e `FT.m`.

O arquivo `Estimate1.m` prepara e organiza os dados na forma matricial e permite a impressão ou visualização destes individualmente.

O arquivo `Estimate2.m` define e identifica o sistema em função de um modelo de estimação escolhido, no caso o tipo ARX.

O modelo ARX, conhecido como modelo auto-regressivo com entradas externas, do inglês, *autoregressive with exogenous inputs*, foi escolhido dentre outros existentes, como por exemplo ARMAX e Box-Jenkins, por ter apresentado o melhor resultado de estimativa durante os testes.

A seguir descreve-se o procedimento completo para identificação do sistema real.

5.2.2.1 Testes Dinâmicos e Coleta de Dados

Uma vez que a identificação se propõe a obter modelos a partir de dados, é necessário gerar tais dados. Muitas vezes, os únicos dados disponíveis serão os dados de operação normal do sistema. Em outras situações, entretanto, será possível e desejável efetuar testes de forma a extrair a informação dinâmica do sistema.

Em todos os casos, os principais e mais importantes pontos relacionados a esta etapa são: a modelagem (sistema calculado), a escolha dos sinais de excitação, a execução dos testes, a escolha do tempo de amostragem e a simulação propriamente dita.

Tais pontos foram discutidos nos capítulos 2, 3 e 4, quando se explicou que uma onda quadrada é somada à referência para gerar variações na posição da esfera, que os testes são realizados com recursos do Matlab e Simulink, e que o tempo de amostragem é 0,01 s para um tempo total de aquisição de dados de 30 segundos, totalizando então 3000 amostras para compor o arquivo ScopeData.

A figura 5.2 mostra o diagrama gerado no Simulink e utilizado para a aquisição dos dados, assim como os pontos e sinais adquiridos para estimativa e identificação do sistema, em destaque.

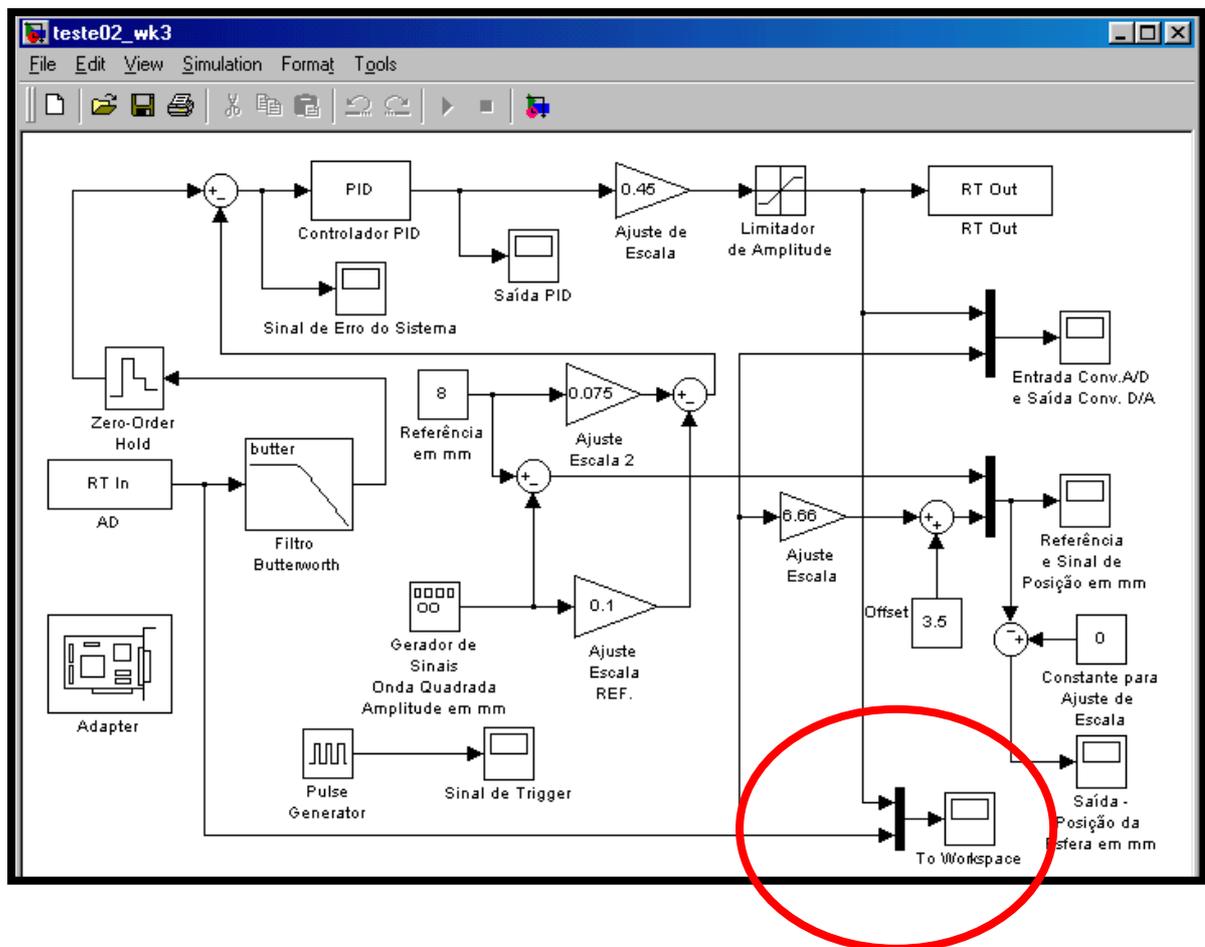


Fig. 5.2. Diagrama utilizado para Aquisição de Dados (Foco no scope Workspace)

Observa-se que a variação na referência é obtida através do sinal de um gerador de funções, configurado para gerar uma onda quadrada, a princípio. Os sinais enviados para o workspace através do scope referem-se a saída do conversor A/D, que corresponde ao sinal de posição da esfera, e o sinal de saída do conversor D/A, que corresponde ao sinal de entrada do amplificador.

5.2.2.2 Determinação do tipo e estrutura do Modelo

A determinação da estrutura de um modelo significa selecionar regressores matemáticos utilizados para explicar ou ajustar dados. Na identificação de sistemas lineares, a determinação de estrutura consiste basicamente da determinação da ordem do modelo, cuja complexidade aumenta se o sistema for não linear [Aguirre. 2000, p.523].

Conforme já comentado anteriormente o modelo a ser utilizado é o ARX, auto-regressivo com entradas externas, cuja estrutura exige a definição do número de pólos e zeros e do delay.

Para o sistema Maglev tem-se três pólos, zero zeros e será considerado um delay igual a 3. O delay ou atraso do sistema significa o número de amostras do sinal de variação na entrada que são refletidos na saída. A escolha do modelo ARX foi em função de testes executados e comparações com os modelos ARMAX e Box-Jenkins, cujos resultados apresentaram-se melhores e favoráveis ao modelo ARX.

A correta definição do número de pólos, zeros e delay é extremamente importante para o bom desempenho do modelo e conseqüentemente para a identificação, contudo nem sempre o projetista terá estes dados disponíveis com facilidade. Neste caso, o número de pólos e zeros são conhecidos, contudo há necessidade de testes com variados delays para melhor ajuste do modelo.

5.2.2.3 Tratamento dos dados adquiridos do Sistema Real

Nesta etapa será apresentada a listagem dos programas Estimate1, Estimate2 e FT comentados anteriormente, os quais possibilitaram a identificação do sistema.

Estimate1	–	Organiza os dados na forma matricial
Estimate2	–	Estima o Sistema, gera vetor no formato Theta e as Matrizes do Modelo ARX
FT	–	Gera a Função de Transferência do Sistema Estimado ou Identificado

LISTAGENS DOS ARQUIVOS

ARQUIVO ESTIMATE1 :

% PROCEDIMENTO

```
% 1. Exportar dados do sistema real para Workspace com o nome ScopeData.
% Esta matriz contém as variáveis TEMPO, ENTRADA, SAÍDA.
% Obs1: Total aproximado de 3000 amostras, ta=0,01 s e taq=30 s .
% Obs2: Arquivar no arquivo ScopeData
```

```
% 2. Criar os vetores de entrada e saída:
```

```
u2=ScopeData (: , 2)
y2=ScopeData (: , 3)
```

```
% 3. Criar a matriz z2, que contém entrada e saída:
```

```
z2=[y2 u2]
```

```
% 4. Seleção de amostras para estimar o sistema:
```

```
size (ScopeData)
```

```
z3=[y2 (1 : ans (: , 1) - 1) u2 (1 : ans (: , 1) - 1) ]
```

```
% 5. Plotar a entrada e saída, através de z2 e comando idplot:
```

```
idplot (z3)
```

ARQUIVO ESTIMATE2 :

% PROCEDIMENTO

% 6. Remover os níveis constantes e realizar a média zero dos dados:

```
z2=dtrend(z2)
```

% 7. Gera e Estima o modelo ARX, considerando 3 pólos, 0 Zeros e 3 delays, com tempo de amostragem igual a 0,01.

```
th=arx(z2,[3 1 3],[],0.01)
```

% 8. Mostra a informações em matriz Theta. O comando present(th) mostra os polinômios do modelo th (ARX) juntamente com dos desvios padrões, funções de perda e informações de como o modelo foi gerado.

```
present(th)
```

% 9. Selecionar uma faixa de dados diferentes para simular no sistema estimado e checar a saída para verificar se o comportamento é semelhante e se comprova a equação do sistema estimado.

```
u=dtrend(u2(1:ans(:,1)));
```

```
y=dtrend(y2(1:ans(:,1)));
```

% 10. Simula o sistema com novos dados de entrada e saída, para efeitos de comparação:

```
ysim=idsim(u,th);
```

% 11. Plota a saída estimada e simulada para efeitos de comparação.

```
plot([y(50:ans(:,1))-1] ysim(50:ans(:,1))-1]);
```

ARQUIVO FT :

% PROCEDIMENTO

% FT gera a Função de Transferência do Sistema Estimado

% 12. O comando th2arx extrai os parâmetros do modelo Theta e os mostra na forma matricial. Theta é uma matriz que contém informações da estrutura do modelo, parâmetros estimados e precisão estimada.

[A,B]=th2arx(th)

% 13. Gera matrizes que definem o numerador e denominador da FT no domínio Z a partir do modelo:

[num,den]=th2tf(th)

% 14. Gera matrizes que definem o numerador e denominador da FT no domínio S a partir do domínio Z. O comando d2cm converte sistemas LTI discretos para sistemas contínuos no tempo.

[numc,denc]=d2cm(num,den,0.01,'matched')

% 15. Gera a Função de Transferência no domínio S.

sys=tf(numc,denc)

Após estas etapas tem-se a função de transferência e então poder-se-á executar uma simulação para fins de comparação com os sistemas calculado e real. Neste trabalho foram realizados quinze testes de aquisição de dados e geração da FT. O melhor resultado foi escolhido para a simulação.

A seguir, mostra-se a função de transferência obtida para o sistema identificado.

$$G(s) = \frac{-5,177 \cdot 10^4}{s^3 + 223,8s^2 + 8112s - 1,733 \cdot 10^4} \quad (\text{eq. 5.1})$$

Comparando a eq. 5.1 com a equação do sistema calculado, observa-se grande aproximação, com exceção de um pólo em +2,02 comparado com um pólo em +49,52 do sistema calculado, fato explicado pelas aproximações utilizadas no desenvolvimento. Anexo a este trabalho será fornecido um cdrom com todos os arquivos gerados durante o projeto.

5.2.2.4 Simulação do Sistema Identificado

A simulação do sistema identificado requer a elaboração do diagrama em blocos deste sistema considerando a função de transferência obtida no processo de identificação e então utilizar recursos do Simulink para executar simulação, gerar os resultados e compará-los com os obtidos para os sistemas calculado e real.

A figura 5.3 mostra o diagrama em blocos elaborado para esta simulação.

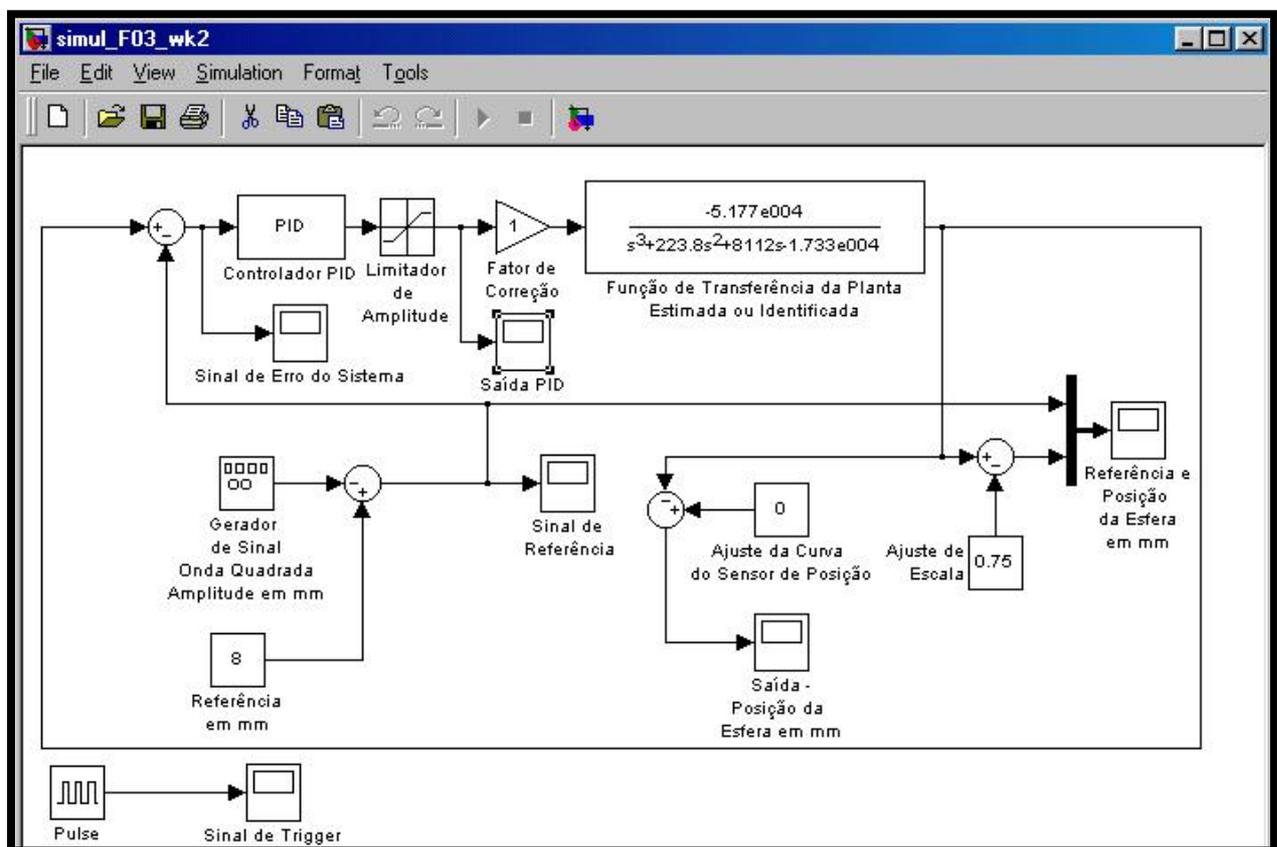


Fig. 5.3. Diagrama em Blocos para Simulação do Sistema Identificado

Os resultados da simulação serão apresentados no capítulo 6.

Capítulo 6

Resultados

Capítulo 6

Resultados

6.1. Introdução

Este capítulo apresentará detalhadamente os resultados da simulação do sistema calculado e identificado, os resultados práticos do protótipo real com malha fechada digital e um comparativo entre todos com objetivo de validar a função de transferência do sistema didático de controle para levitação magnética.

A validação da função de transferência do sistema tem grande importância neste trabalho, pois será utilizada em outras dissertações que darão continuidade ao assunto e que certamente utilizarão o protótipo prático e didático como base de desenvolvimento.

6.2. Histórico dos Testes

O desenvolvimento do trabalho iniciou-se basicamente com o estudo teórico do assunto, o equacionamento matemático, o projeto e a montagem prática do sistema com controle em malha fechada analógica, utilizando-se um controlador PID analógico.

Os testes deste sistema foram muito úteis para o entendimento do sistema e sintonia do controlador PID, o que viabilizou posteriormente a implementação da malha fechada digital.

A seqüência dos testes foi iniciada pelo sistema com malha fechada analógica, depois pelo sistema calculado, depois pelo sistema em malha fechada digital e por último pela simulação e testes do sistema identificado. O trabalho prevê um comparativo entre tais resultados e propõe a função de transferência.

Os principais pontos de análise comparativa são :

- ✓ Tempo de Resposta
- ✓ Dinâmica do Sistema
- ✓ Ponto de Equilíbrio
- ✓ Lugar das Raízes

Para viabilizar a comparação os diagramas gerados no Simulink contemplam o monitoramento dos seguintes sinais: sinal de erro do sistema, o sinal da saída do controlador PID, os sinais das saídas dos conversores A/D e D/A, os sinais de referência e posição da esfera e o sinal de posição da esfera considerando o posicionamento físico da bobina.

Em todos os casos, os testes são iniciados com aquisição de dados por um tempo determinado, 30 segundos para o sistema real e 10 segundos para os sistemas calculado e identificado, cujos dados obtidos são enviados para o workspace. Após o término da simulação e aquisição de dados, ajusta-se as escalas dos scopes e grava-se os resultados de cada um com o objetivo de documentar os testes.

Desta forma, será apresentado o diagrama em blocos implementado no Simulink e as formas de onda geradas na simulação e teste de cada sistema.

6.3. Resultados do Sistema Calculado

6.3.1. Diagrama em Blocos para Simulação do Sistema Calculado

O sistema calculado foi testado a partir da implementação do diagrama em blocos mostrado na figura 6.1., lembrando que a função de transferência utilizada foi desenvolvida teórica e matematicamente e apresentada no capítulo 2.

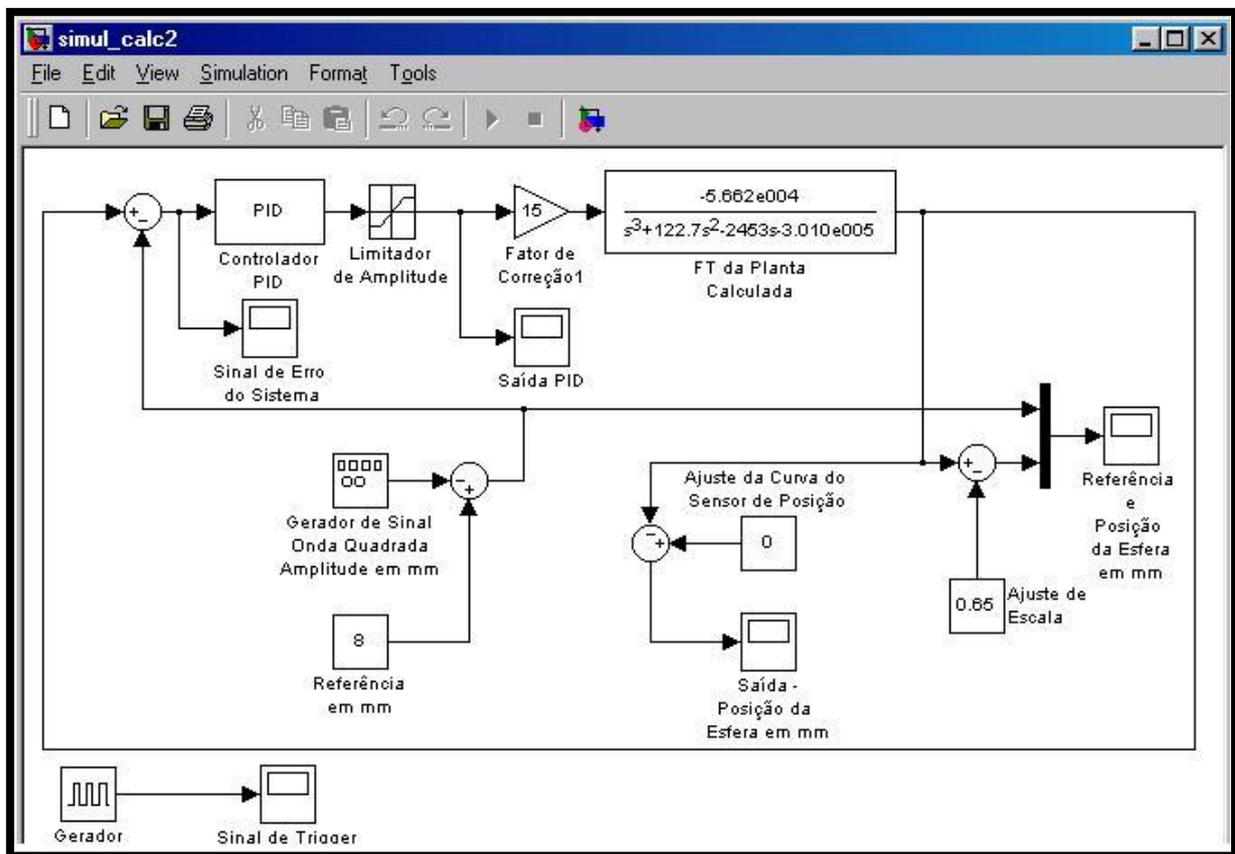


Fig. 6.1. Diagrama em Blocos do Sistema Calculado utilizado na Simulação do Sistema Calculado

A seguir serão mostradas as formas de onda de cada scope presente no diagrama.

6.3.2. Formas de Onda obtidas na Simulação do Sistema Calculado

As figuras 6.2. e 6.3. mostram as formas de onda do sinal de posição da esfera em mm e em relação ao tempo.

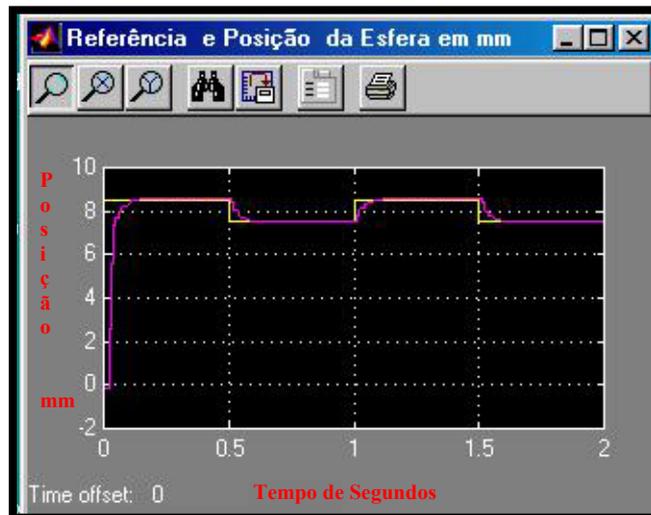


Fig. 6.2. Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela) Sistema Calculado

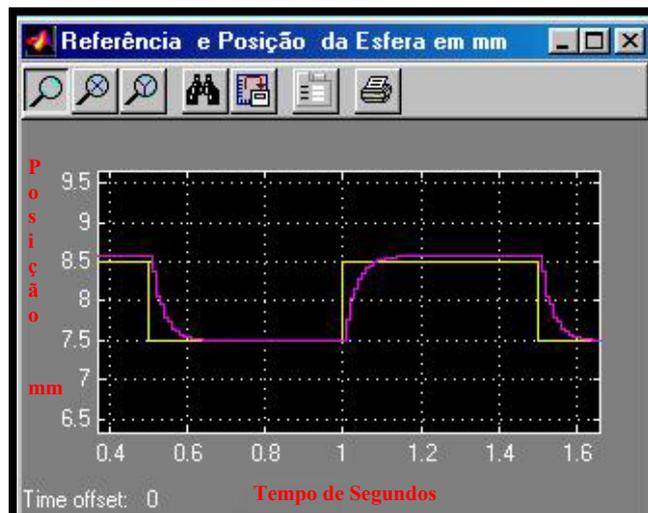


Fig. 6.3. Ampliação do Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela) Sistema Calculado

As figuras 6.4., 6.5 e 6.6. mostram igualmente as formas de onda do sinal de posição da esfera em mm e em relação ao tempo, contudo na forma ampliada. Pode-se ver a resposta do sistema na subida e na descida da esfera, lembrando que a subida do sinal de referência corresponde a descida da esfera e analogamente para a descida..

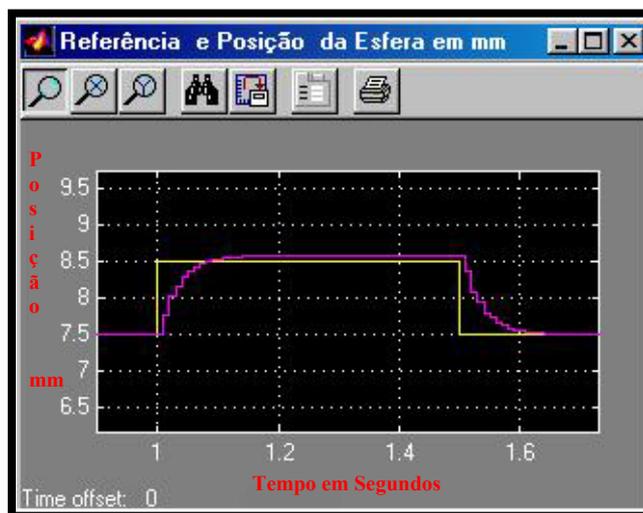


Fig. 6.4. Ampliação do Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela) com foco na subida e descida da esfera.

Sistema Calculado

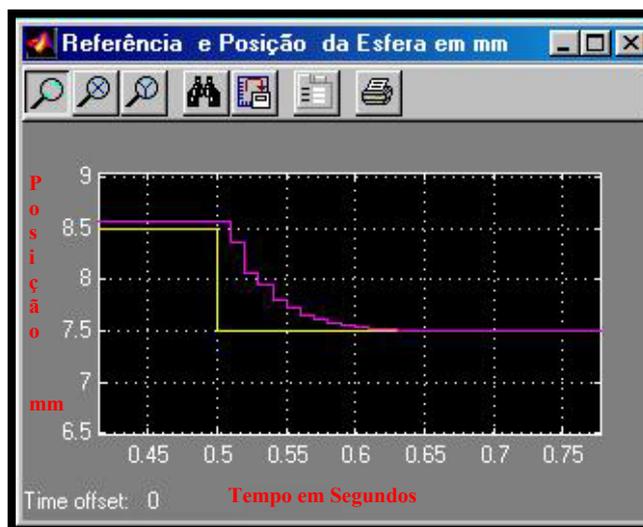


Fig. 6.5. Detalhe da subida da Esfera

Sistema Calculado

Sinal de Posição (Cor Magenta) e Sinal de Referência (Cor Amarela)

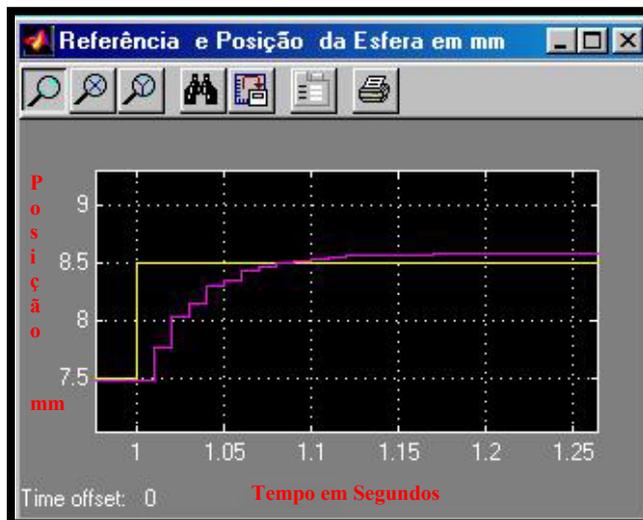


Fig. 6.6. Detalhe da descida da Esfera
Sistema Calculado
 Sinal de Posição (Cor Magenta) e
 Sinal de Referência (Cor Amarela)

A figura 6.7. mostra a forma de onda de posição com referência ao posicionamento físico da bobina, ou seja o quanto a esfera desloca abaixo da bobina. O eixo das abcissas corresponde a base do núcleo a bobina que atrai ou repele a esfera, e deste ponto para baixo corresponde ao deslocamento desta.

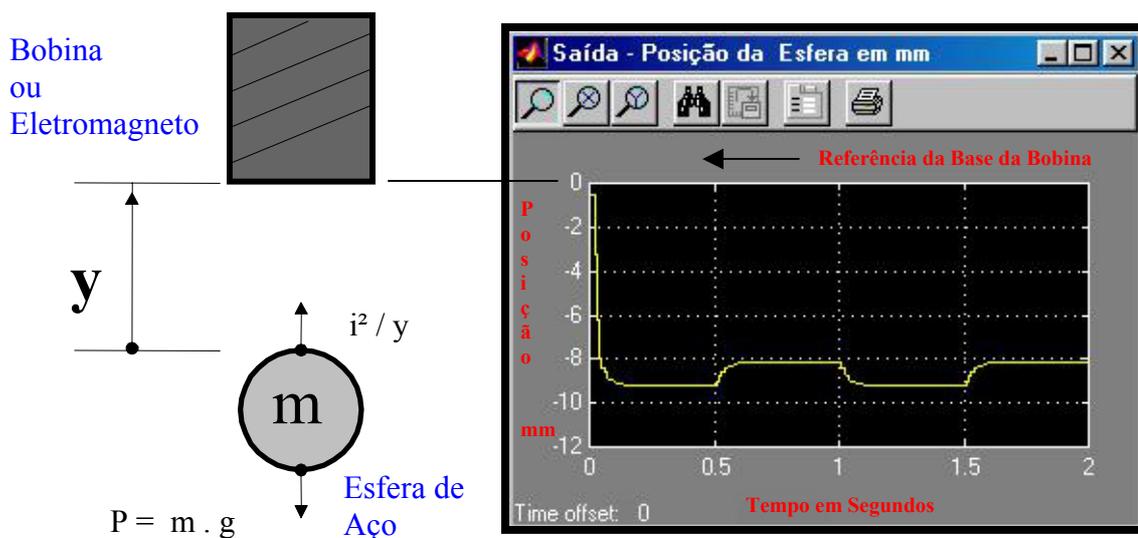


Fig. 6.7. Posição da Esfera em relação ao posicionamento físico da bobina para o Sistema Calculado

A figura 6.8 mostra a forma de onda do sinal de erro do sistema e a figura 6.9 o sinal de saída do controlador PID.

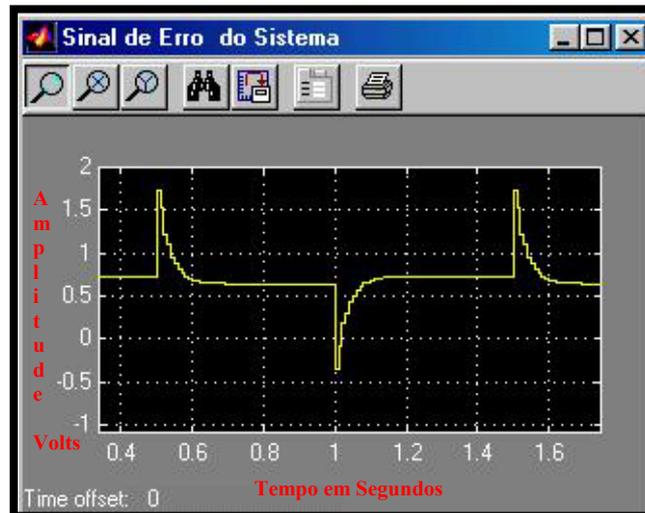


Fig. 6.8. Sinal de Erro do Sistema Calculado

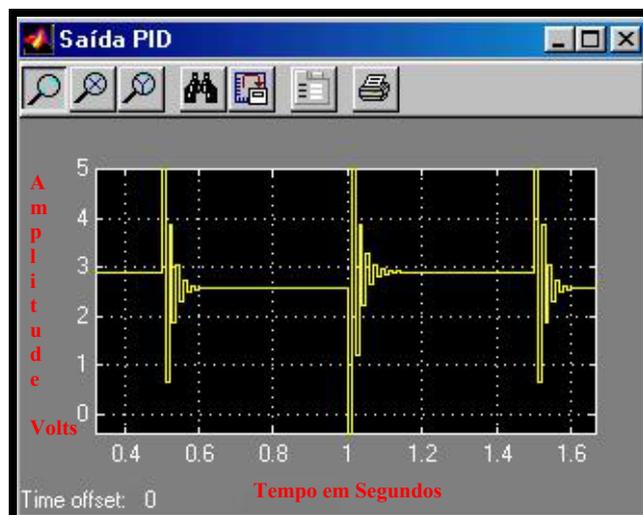


Fig. 6.9. Sinal de Saída do Controlador PID do Sistema Calculado

A figura 6.10 apresenta o lugar das raízes para a FT do sistema calculado.

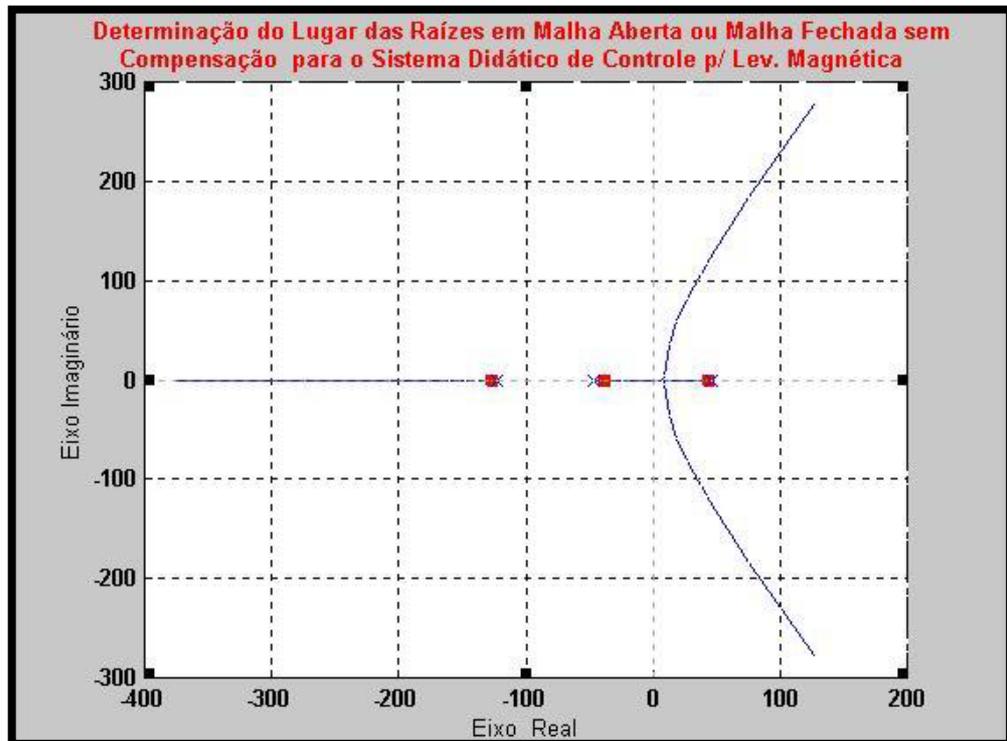


Fig. 6.10 - Lugar das Raízes do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética – Sistema Calculado

Conclusivamente pode-se afirmar que:

- O tempo de resposta do sistema é de 0,15 segundos na descida da esfera e 0,15 segundos na subida da esfera.
- O Sistema não apresenta overshoot nem na subida e nem na descida da esfera.
- O Sistema apresenta 3 pólos, sendo dois em $\pm 46,69$ e outro em $-122,73$.
- O Sistema não possui zeros.

6.4. Resultados do Sistema Real

6.4.1. Diagrama em Blocos para Implementação do Sistema Real

O sistema real foi testado e medido a partir da implementação do diagrama em blocos mostrado na figura 6.11, de acordo com a montagem prática descrita no capítulo 4.

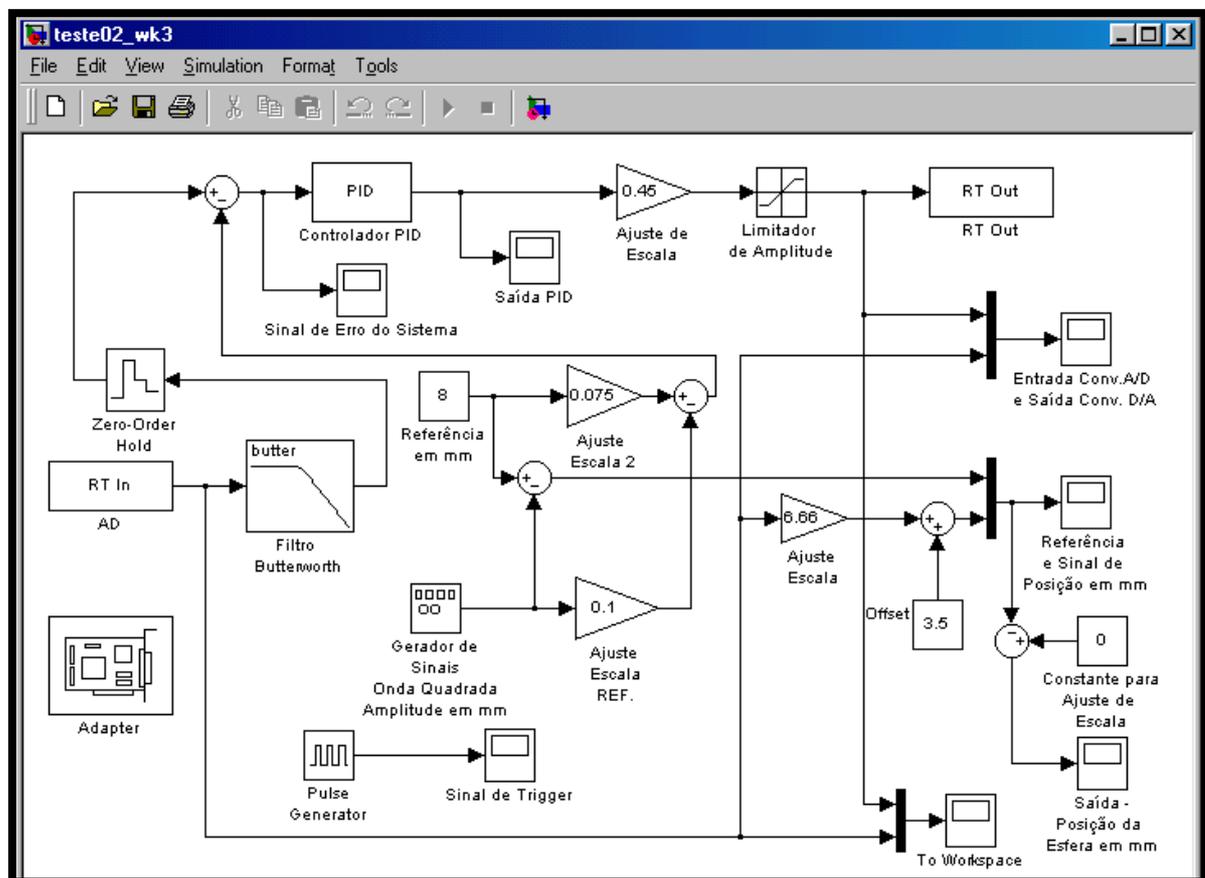


Fig. 6.11. Diagrama em Blocos do Sistema Real – Protótipo Prático do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética.

A seguir apresentam-se as formas de ondas monitoradas pelos scopes no diagrama da figura 6.11.

6.4.2. Formas de Onda obtidas na Simulação do Sistema Real

6.4.2.1. Resultados usando Referência somada com Onda Quadrada

As figuras 6.12 e 6.13 mostram as formas de onda do sinal de posição da esfera em mm e em relação ao tempo, sendo a última ampliada.

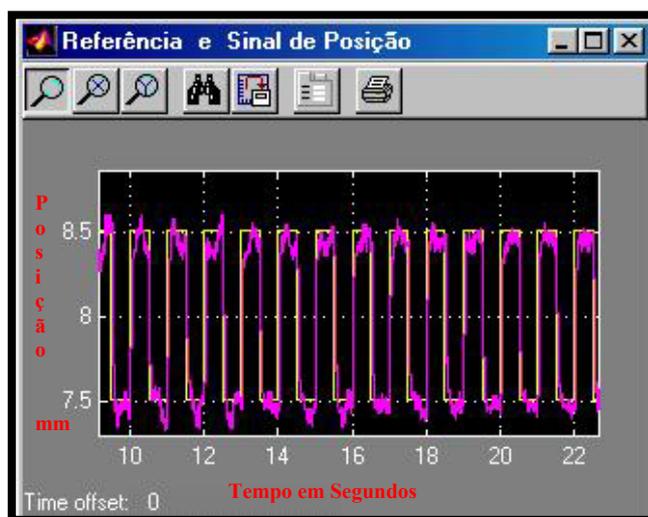


Fig. 6.12. Sinal de Posição da Esfera e Sinal de Referência
 Sinal de Posição (Cor Magenta)
 Sinal de Referência (Cor Amarela)

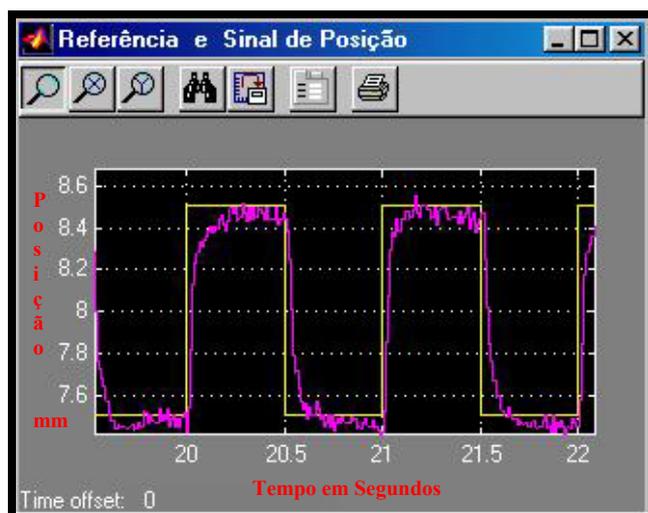


Fig. 6.13. Sinal de Posição da Esfera e Sinal de Referência –
 Ampliação / Visualização de 2T
 Sinal de Posição (Cor Magenta)
 Sinal de Referência (Cor Amarela)

As figuras 6.14, 6.15 e 6.16 mostram os sinais de posição e da referência de forma ampliada e com foco na descida e subida da esfera.

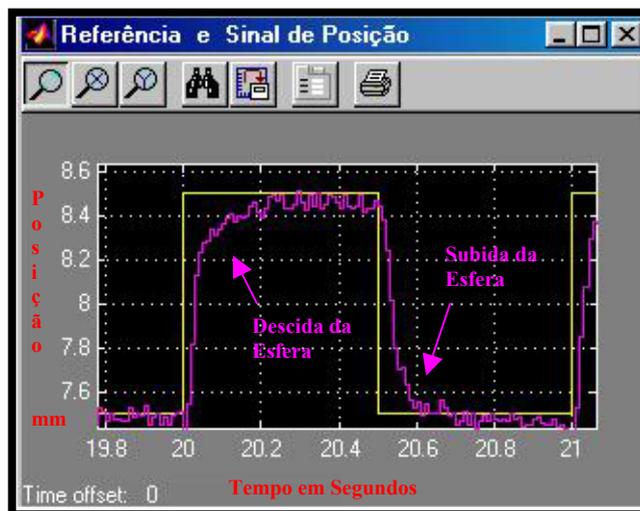


Fig. 6.14. Sinal de Posição da Esfera e Sinal de Referência
Ampliação com foco na Descida e Subida da Esfera
Sinal de Posição (Cor Magenta)
Sinal de Referência (Cor Amarela)

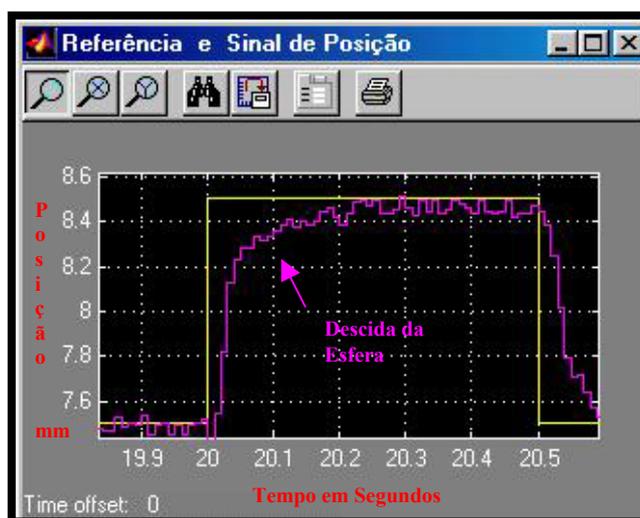


Fig. 6.15. Sinal de Posição da Esfera e Sinal de Referência
Ampliação – Visualização 1T
Sinal de Posição (Cor Magenta)
Sinal de Referência (Cor Amarela)

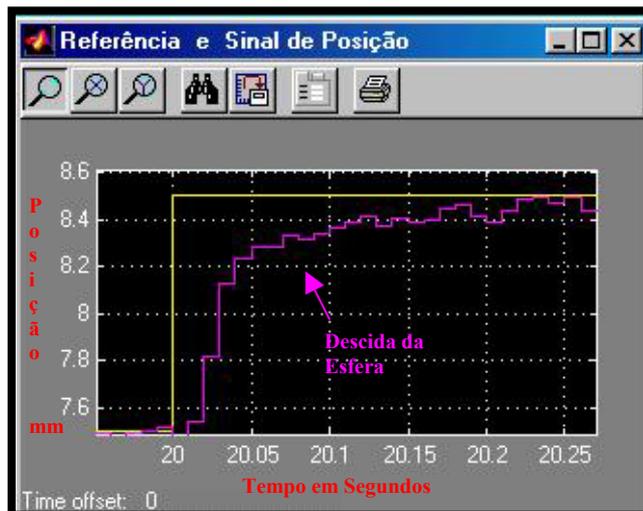


Fig. 6.16. Sinal de Posição da Esfera e Sinal de Referência
 Ampliação – Visualização 1/2T
 Sinal de Posição (Cor Magenta)
 Sinal de Referência (Cor Amarela)

A figura 6.17. mostra a forma de onda de posição da esfera com referência ao posicionamento físico da bobina, analogamente ao que já foi feito para o sistema calculado.

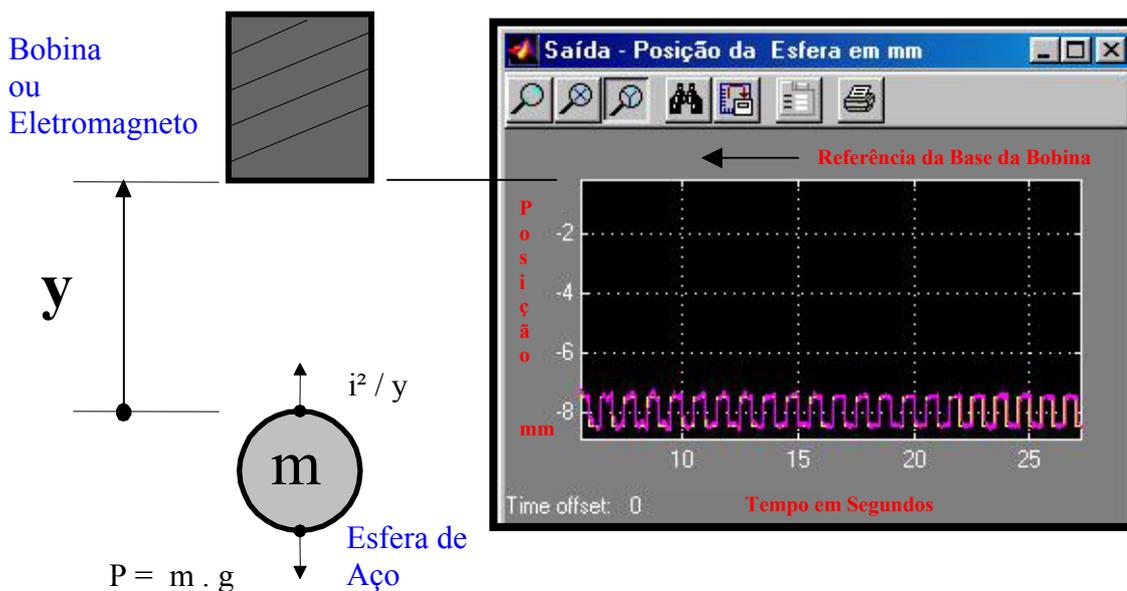


Fig. 6.17. Posição da Esfera em relação ao posicionamento físico da bobina para o Sistema Real.

A figura 6.18 mostra a forma de onda do sinal de erro do sistema e a figura 6.19 o sinal de saída do controlador PID.

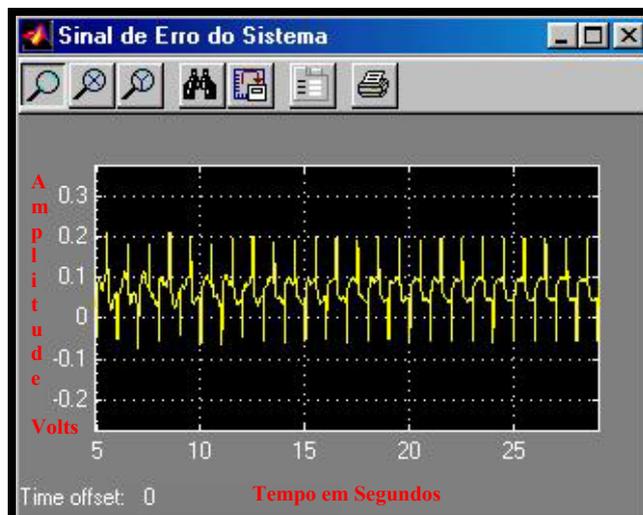


Fig. 6.18. Forma de Onda do Sinal de Erro do Sistema Real

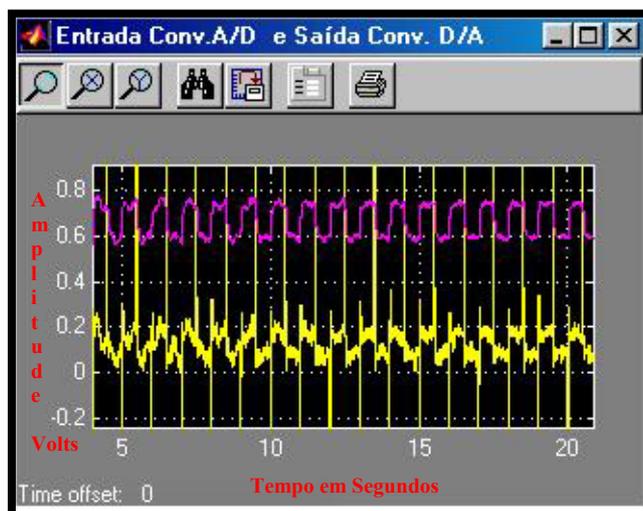


Fig. 6.19. Forma da Saída do Controlador PID (Amarelo) e Forma de Onda do Sinal de Posição (Cor Magenta)

Conclusivamente pode-se afirmar sobre os resultados do sistema real que:

- O tempo de resposta do sistema é de 0,20 segundos na descida da esfera e 0,15 segundos na subida da esfera.
- O Sistema não apresenta overshoot nem na subida e nem na descida da esfera.
- Os pólos e zeros do sistema e o lugar das raízes serão determinados no processo de identificação.

6.4.2.2. Resultados usando Referência somada com Onda Senoidal

As figuras 6.20, 6.21 e 6.22 mostram o sinal de posição da esfera com variação senoidal, considerando diferentes níveis de ampliação das figuras que apresentam os resultados.

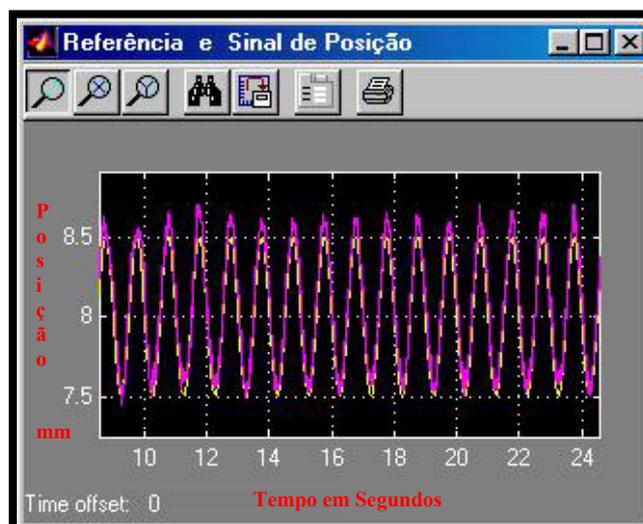


Fig. 6.20. Forma da Posição da Esfera (Cor Magenta) e Referência Senoidal (Cor Amarela)

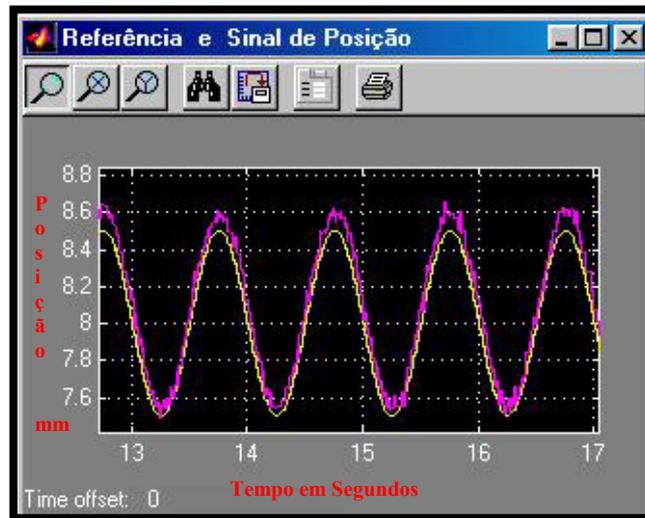


Fig. 6.21. Forma da Posição da Esfera (Cor Magenta) e Referência Senoidal (Cor Amarela) Ampliação 4T

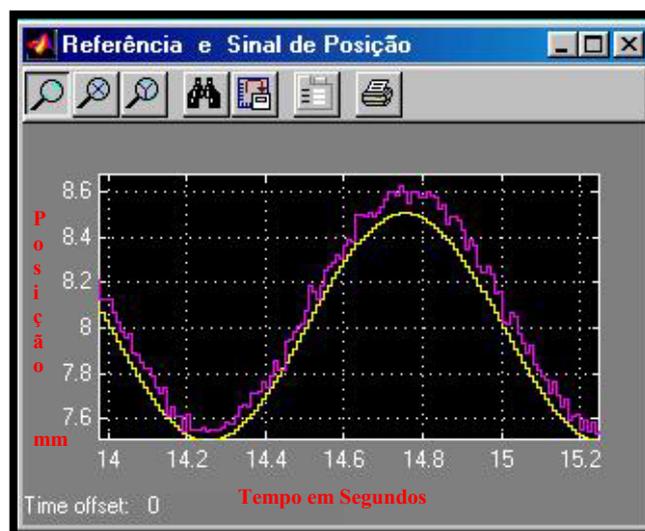


Fig. 6.22. Forma da Posição da Esfera (Cor Magenta) e Referência Senoidal (Cor Amarela) Ampliação 1T

A figura 6.23. mostra a forma de onda de posição da esfera com referência ao posicionamento físico da bobina, analogamente ao que já foi feito para o sistema calculado.

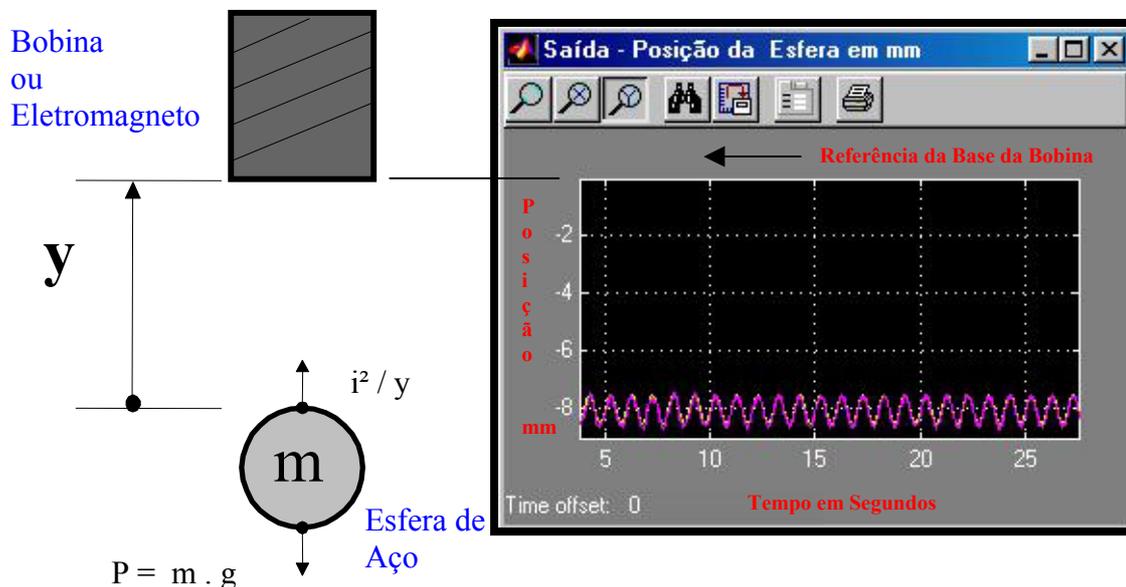


Fig. 6.23. Posição da Esfera em relação ao posicionamento físico da bobina para o Sistema Real com Perturbação Senoidal

A figura 6.24 mostra a forma de onda do sinal de saída do controlador PID e do Sinal de posição da esfera.

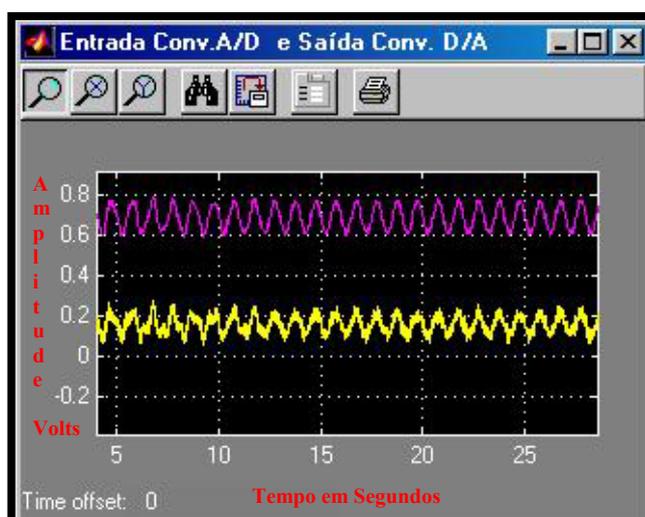


Fig. 6.24. Posição da Esfera em mm e Saída do Controlador PID para o Sistema Real com Variação Senoidal

6.4.2.3. Resultados com Referência Constante

A figura 6.25 mostra o sinal de posição da esfera sem variação, ou seja com referência constante, estabilizado em 8 mm.

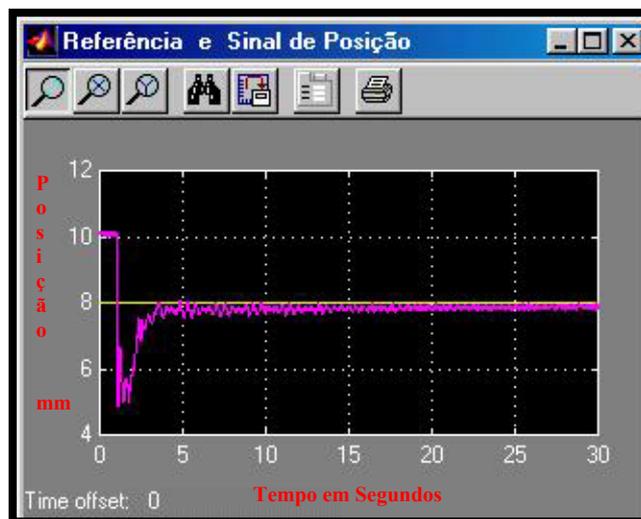


Fig. 6.25. Posição da Esfera em mm e Sinal de Referência Constante para o Sistema Real

A figura 6.26 mostra o sinal de posição da esfera sem variação e o sinal na saída do controlador PID nas mesmas condições anteriores.

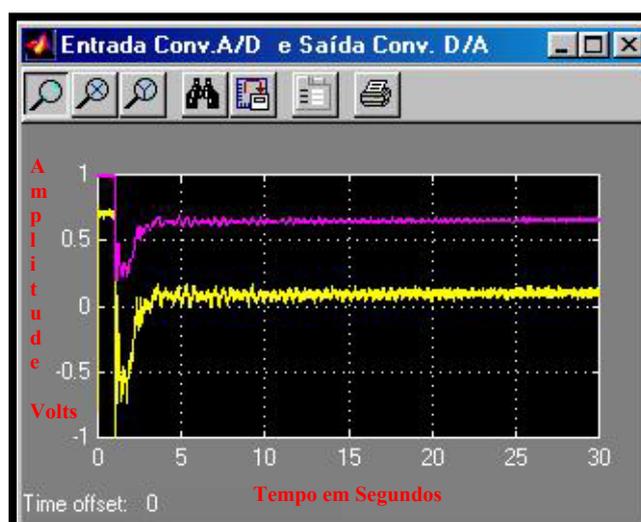


Fig. 6.26. Posição da Esfera com Sinal de Referência Constante e Saída do Controlador PID para o Sistema Real

A figura 6.27. mostra a forma de onda de posição da esfera com referência ao posicionamento físico da bobina, analogamente ao que já foi feito para o sistema calculado.

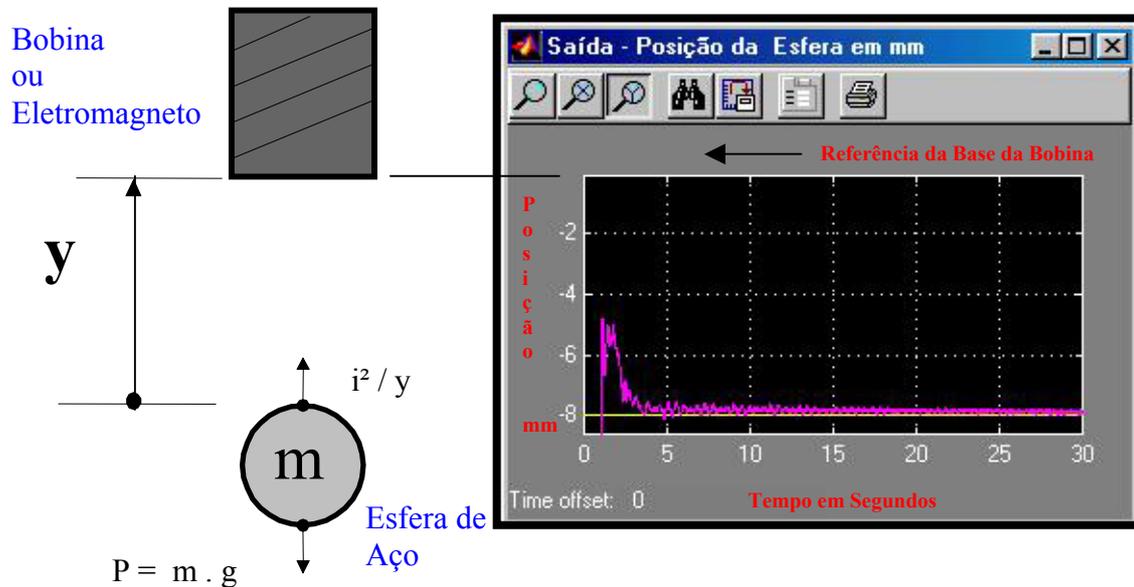


Fig. 6.27. Posição da Esfera em relação ao posicionamento físico da bobina para o Sistema Real com Referência Constante.

6.5. Resultados do Sistema Identificado

6.5.1. Diagrama em Blocos para Simulação do Sistema Identificado

O capítulo 5 abordou os conceitos básicos da identificação de sistemas e o procedimento adotado neste trabalho, cujos resultados são obtidos a partir da simulação do sistema a partir da função de transferência obtida nos testes e aquisição de dados do sistema real. A figura 6.28 apresenta o diagrama em blocos do sistema identificado, lembrando que a função de transferência utilizada foi o melhor resultado entre 15 ensaios práticos com o sistema real.

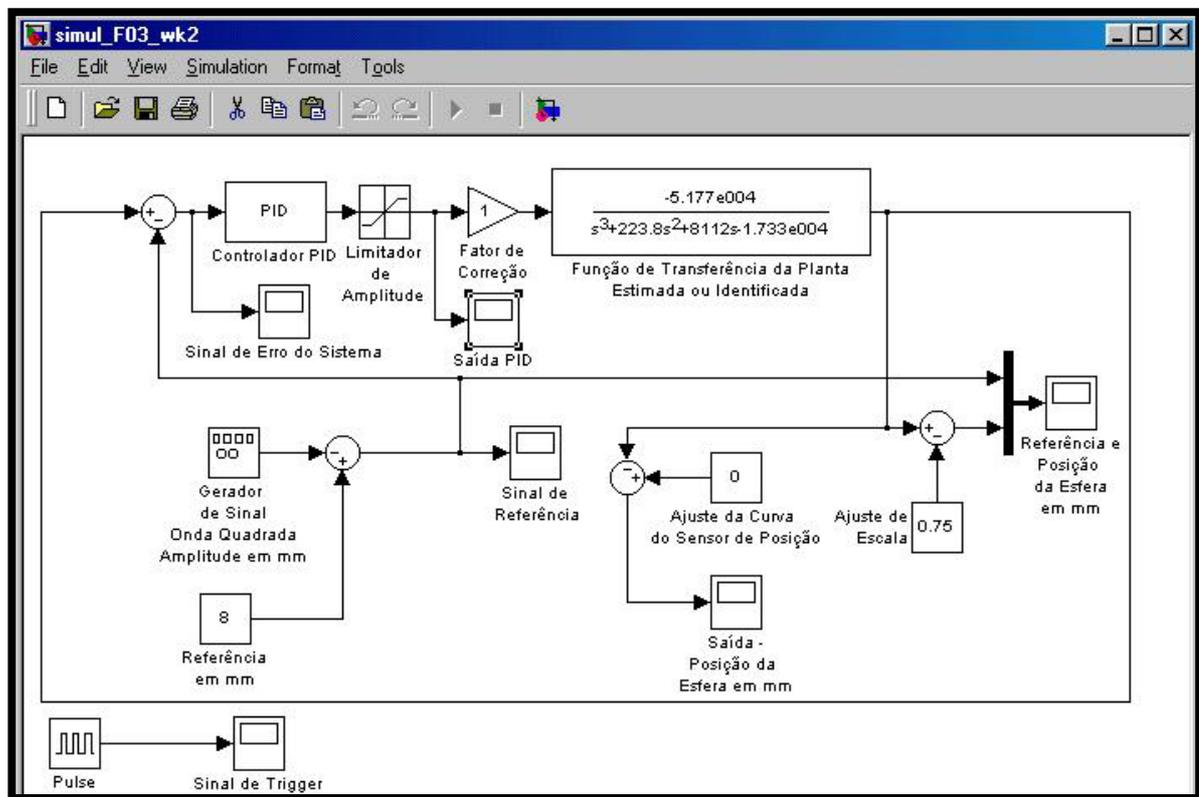


Fig. 6.28. Diagrama em Blocos para Simulação do Sistema Identificado

6.5.2. Formas de Onda obtidas na Simulação do Sistema Identificado

As figuras 6.29 e 6.30 mostram as formas de onda do sinal de posição da esfera em mm e em relação ao tempo, sendo a última ampliada.

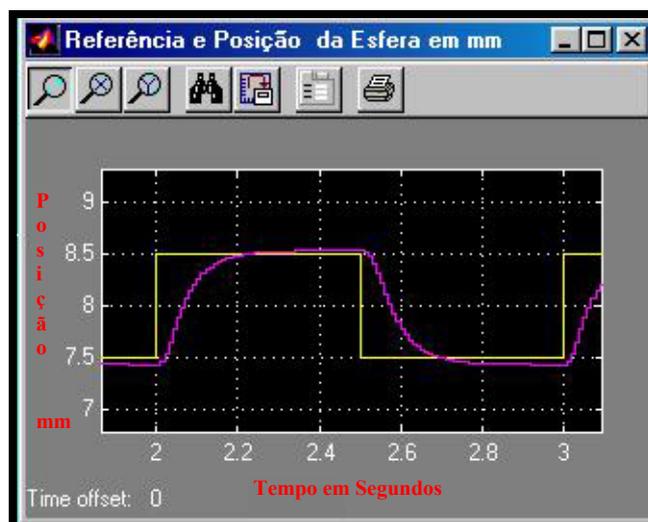


Fig. 6.29. Forma de Onda da Posição da Esfera em mm e o Sinal de Referência para o Sistema Identificado

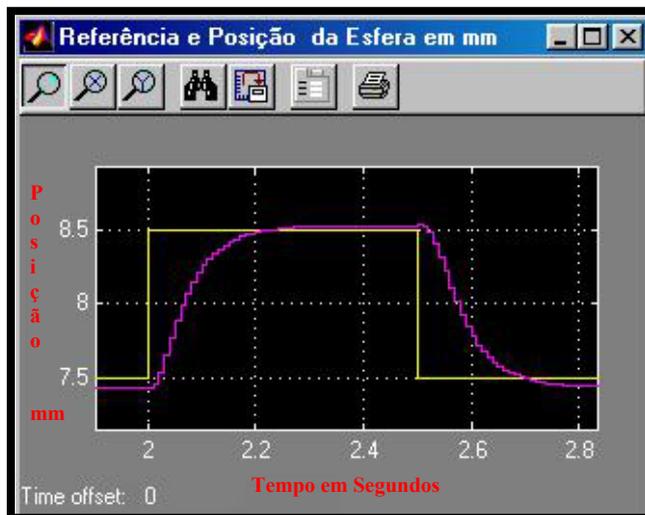


Fig. 6.30. Forma de Onda da Posição da Esfera em mm e o Sinal de Referência para o Sistema Identificado – Ampliação 1T

As figuras 6.31 e 6.32 mostram as formas de onda do sinal de posição da esfera em mm e em relação ao tempo e o sinal de referência com foco na subida e descida da esfera.

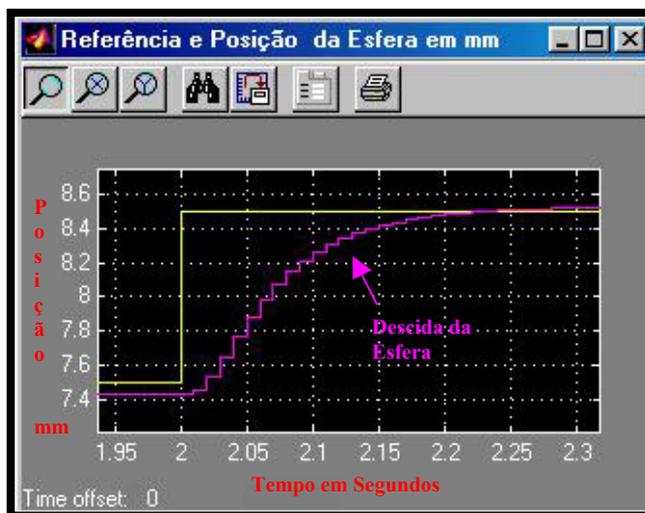


Fig. 6.31. Forma de Onda da Posição da Esfera em mm e o Sinal de Referência para o Sistema Identificado – Foco na Descida da Esfera

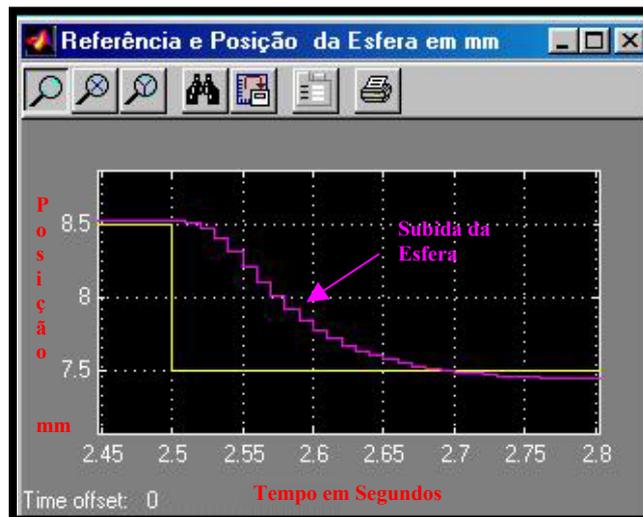


Fig. 6.32. Forma de Onda da Posição da Esfera em mm e o Sinal de Referência para o Sistema Identificado – Foco na Subida da Esfera.

A figura 6.33 apresenta o lugar das raízes para o sistema identificado a partir da função de transferência obtida.

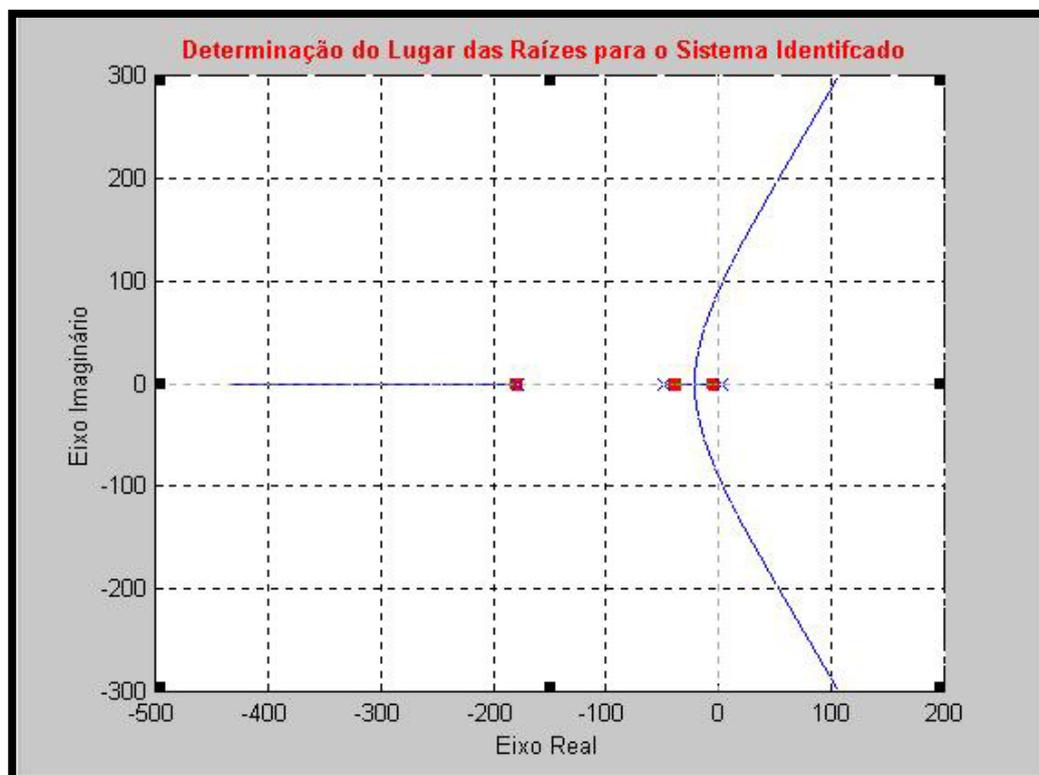


Fig. 6.33. Lugar das Raízes do Sistema Identificado

Conclusivamente pode-se afirmar sobre os resultados do sistema identificado que:

- O tempo de resposta do sistema é de 0,20 segundos na descida da esfera e 0,20 segundos na subida da esfera.
- O Sistema não apresenta overshoot nem na subida e nem na descida da esfera.
- O Sistema possui três pólos sendo localizados em -178 , $-48,3$ e 2.02 .
- O Sistema não possui zeros.

6.6. Comparação Final de Resultados

Para finalizar este capítulo e facilitar a visualização e comparação dos resultados apresenta-se uma tabela com os dados de cada sistema analisado.

RESULTADOS SISTEMAS	TEMPO DE SUBIDA Segundos	TEMPO DE DESCIDA Segundos	Nº DE PÓLOS E POSIÇÃO	Nº DE ZEROS E POSIÇÃO	OVERSHOOT E DINÂMICA
CALCULADO	0,20	0,20	3 +49,52 -49,52 -122,23	0	Sem Overshoot
REAL	0,15	0,20	3	0	Sem Overshoot
IDENTIFICADO	0,20	0,20	3 - 178 - 48,3 + 2.02.	0	Sem Overshoot

Tabela 6.1. Quadro Comparativo de Resultados dos Sistema Calculado, Real e Identificado

Capítulo 7

Conclusões e Observações Finais

Capítulo 7

Conclusões e Observações Finais

7.1. Introdução

Este capítulo visa sintetizar na forma de tópicos a experiência adquirida durante o desenvolvimento deste trabalho.

As conclusões e observações finais são práticas e oriundas dos testes executados com o sistema real, das simulações com os sistemas calculado e identificado, das definições tecnológicas e das dificuldades enfrentadas durante o desenvolvimento.

7.2. Conclusões e Observações Finais

A seguir serão descritas as conclusões e observações finais na forma de tópicos.

- ❖ O sensor de ultra-som não apresentou boa repetibilidade para medição de posição o sistema.
- ❖ O sensor óptico Analógico com fibra óptica da Omron não se mostrou uma boa opção por difundir excessivamente a luz na esfera e não apresentar boa repetibilidade no processo de medida.

- ❖ O tamanho da bobina não define sua eficiência, ou seja, muitas vezes uma bobina é fisicamente pequena, mas a qualidade do material do núcleo é tão boa que a intensidade de campo é maior para um mesmo valor de corrente, quando comparado com uma bobina fisicamente maior com núcleo de qualidade inferior.
- ❖ O sistema com sensor óptico com Fibra óptica requer a utilização de uma guia de vidro para que a esfera mantenha um deslocamento retilíneo, fato que dificulta o posicionamento e manuseio desta.
- ❖ O sistema pode apresentar efeito de magnetismo residual nas esferas e na bobina, o que pode causar a atração de esferas de baixo peso mesmo sem energização.
- ❖ Apesar do equacionamento matemático considerar a massa da esfera com um dado fundamental, o sistema provou ser robusto para grandes variações de peso, desde que atuando dentro dos limites da faixa de operação do sensor Laser do sistema.
- ❖ O uso de programadores lógicos programáveis com placas A/D e D/A não é adequado para controle deste tipo de sistema, devido ao tempo de resposta dos PLC's ser maior ou igual ao tempo de resposta do sistema.
- ❖ O formato do corpo de prova não é relevante para o sistema de controle, ou seja, se a esfera for substituída por um cilindro ou uma porca, por exemplo, o referido corpo continuará levitando, desde que seja compatível com a faixa de operação do sensor de posição.
- ❖ O projeto do amplificador deve levar em consideração a impedância de entrada para não sobrecarregar a saída do conversor D/A .

- ❖ O sensor de posição deve ter uma saída linearizada para melhor e correto funcionamento do sistema.
- ❖ O conversor A/D é bastante susceptível a ruído, sendo aconselhável o uso de filtros, sejam por software ou hardware.
- ❖ A galvanização e polimento das esferas melhoram significativamente o funcionamento do sistema com sensor óptico analógico com fibra óptica.
- ❖ A montagem mecânica com perfis padrões de alumínio é rápida, leve e de baixo custo para o protótipo.
- ❖ Os resultados de testes e simulações dos sistemas real, calculado e identificado são considerados aceitáveis e equivalentes por apresentarem variações pequenas e dentro das tolerâncias e aproximações práticas .
- ❖ Fica a sugestão para que um próximo trabalho de dissertação trate o assunto com controladores digitais do tipo Dead Beat, e desenvolva outra técnica de sensoriamento de posição, como por exemplo, um sistema óptico infravermelho por barreira e com saída analógica linear.
- ❖ O computador deve estar estável e com o mínimo de periféricos ou softwares instalados, caso contrário, há risco de travamentos freqüentes.
- ❖ Uma memória RAM de alta qualidade no computador evita travamentos freqüentes.
- ❖ É recomendado o uso do Windows 98 com Matlab 5.3 ou superior para desenvolvimento do sistema.
- ❖ A montagem do sistema é reproduzível a qualquer momento e está totalmente documentada.

- ❖ Tanto no desenvolvimento do amplificador como no circuito analógico de controle deve-se atentar para o ponto de operação do transistor que excita a bobina e evitar que haja comutação, tanto em corte como na saturação, fato que transformaria o circuito em um controle on-off. Em resumo, o transistor deve operar na região ativa.
- ❖ O custo do protótipo prático nacional é cerca de 30 a 40% do custo do similar importado.
- ❖ As fontes de Alimentação DC devem possuir baixo ripple, excelente regulação e baixo efeito de carga.
- ❖ A boa qualidade do núcleo da bobina representa boa relação entre intensidade de campo, tamanho físico desta e menor consumo de corrente, fato que evita aquecimento excessivo da bobina ao longo do tempo. Muitos sistemas similares não podem permanecer energizados por mais de 15 ou 20 minutos devido ao aquecimento da bobina. Este sistema não apresenta este problema.
- ❖ O bom funcionamento do sistema requer uma calibração do sensor de posição, o qual deve apresentar uma tensão analógica de saída entre 1 e 5 Volts.
- ❖ Maiores distâncias de levitação poderão ser obtidas com ajustes na posição de montagem do sensor óptico em relação à bobina, contudo deve-se respeitar a capacidade de atração do campo magnético da bobina.

“Uma simulação bem feita implica em grande eficiência e eficácia no trabalho prático, contudo a força de vontade e perseverança são fundamentais na conquista dos bons resultados.”

Eng. Helder José Celani de Souza

ANEXO

GUIA DE LABORATÓRIO

ANEXO

GUIA DE LABORATÓRIO

1. Introdução

Este guia de laboratório visa a orientação dos alunos de engenharia de controle que utilizarão o sistema didático de controle para levitação magnética em experiências práticas.

2. Estrutura dos Ensaios

Os ensaios seguirão a seguinte seqüência básica:

- Objetivos
- Leituras Recomendadas
- Lista de Materiais
- Procedimento Experimental
- Tomada de Dados
- Análise de Dados
- Relatório do Experimento
- Conclusões e Observações Finais

3. Ensaio de Laboratório N° 1

TÍTULO DO ENSAIO:	Familiarização com o Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética e Estudo do Comportamento do Sensor de Posição
--------------------------	--

Nome do Aluno	Número de Matrícula

Nome de Docente:	
Nome do Curso:	

3.1. Objetivos

Este ensaio visa o conhecimento dos recursos do sistema didático de controle para levitação magnética e de seus principais componentes. O aluno deverá também executar as etapas de preparação para utilização do sistema.

3.2. Leituras Recomendadas

- ✓ Dissertação do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética, Páginas 1 até 112 com Foco no capítulo 4.
- ✓ Manual do Sensor LX2 da Keyence (Disponível no site www.keyence.com)

3.3. Lista de Materiais

- ✓ Montagem Mecânica do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética.
- ✓ Conjunto de Esferas de Aço
- ✓ Sensor Óptico tipo Laser por Barreira modelo LX2 da Marca Keyence
- ✓ 2 Fontes de Alimentação 24 VDC
- ✓ 1 Placa A/D e D/A da marca Advantech
- ✓ 1 Módulo de Conexão com Flat Cable
- ✓ 1 Módulo Amplificador com Conversor Tensão-Corrente
- ✓ 1 Computador PIII com 128 Mbytes de RAM, 20GB de HD e Slots ISA/PCI com Windows 98 e Matlab 5.3 instalados.

3.4. Procedimento Experimental

3.4.1. Familiarização com o Sistema Didático

- ✓ Identificar a montagem mecânica já com a bobina e o sensor de óptico de posição já fixados na estrutura mecânica.
- ✓ Localizar as Fontes de Alimentação DC
- ✓ Localizar o Amplificador com Conversor Tensão-Corrente
- ✓ Localizar o conjunto de esferas de aço.
- ✓ Abrir a carcaça do computador e localizar a placa de aquisição de dados, conversor A/D e D/A .
- ✓ Ligar o computador e checar se o Windows 98 e o Matlab 5.3 estão rodando adequadamente.

3.4.2. Preparação para uso da Montagem

- ✓ Organizar a bancada com a montagem mecânica, fontes e os módulos amplificador e de conexão da placa A/D e D/A .
- ✓ Alimentar o amplificado do sensor com +24 VDC
- ✓ Dispor de uma esfera de aço de 55 g.

3.4.3. Levantamento da Curva do Sensor de Posição

- ✓ Usando uma esfera de aço interromper o feixe de luz do sensor óptico mm a mm e anotar o sinal analógico de saída. Para facilitar o posicionamento da esfera no feixe de luz do sensor, utilizar o parafuso de posicionamento localizado abaixo do sensor.
- ✓ Para deslocamento de 1 mm ou menos, registrar a tensão de saída do sensor.
- ✓ Finaliza o procedimento traçar a curva do sensor.

3.4.4. Aquisição e Análise de Dados

- ✓ Preencher a tabela a seguir para registrar as diferentes medidas de posição da esfera e o comportamento do sensor óptico.

Área do Feixe Laser em mm ²	Distância da Esfera em mm	Tensão de Saída do Sensor em Volts

- ✓ Com base nos dados obtidos, traçar o gráfico correspondente à curva do sensor de posição.

4. Ensaio de Laboratório N° 2

TÍTULO DO ENSAIO:	Conhecendo o comportamento da bobina
--------------------------	---

Nome do Aluno	Número de Matrícula

Nome de Docente:	
Nome do Curso:	

4.1. Objetivos

Este ensaio visa o conhecimento da capacidade do campo magnético da bobina em função da corrente que circula por ela, considerando a posição da esfera.

4.2. Leituras Recomendadas

- ✓ Dissertação do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética, Páginas 1 até 112 com Foco no capítulo 4.

4.3. Lista de Materiais

- ✓ Montagem Mecânica do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética com a bobina já fixada na estrutura.
- ✓ Conjunto de Esferas de Aço
- ✓ 1 Fonte de Alimentação regulável de 0 a +24 VDC, 1 A .

4.4. Procedimento Experimental

4.4.1. Preparação da Montagem

- ✓ Organizar a bancada com a montagem mecânica, a fonte regulável e outros componentes disponíveis.
- ✓ Conectar a fonte regulável diretamente na bobina. A fonte deverá fornecer máximo de +24 VDC e mínimo 1 A .
- ✓ Dispor de uma esfera de aço de 55 g.

4.4.2. Levantamento do Comportamento da Bobina

- ✓ Após conectar a fonte regulável nos terminais da bobina, ajustar a tensão de saída variando de 0,5 e 0,5 V e determinar o ponto de início ou eminência de atração da esfera, então mediar a distância entre esfera e bobina. Há uma régua graduada na montagem que auxiliará neste procedimento.
- ✓ Registrar os dados em uma tabela.
- ✓ Finalizar o procedimento traçar a curva de comportamento da bobina.

4.4.3. Aquisição e Análise de Dados

- ✓ Preencher a tabela a seguir para registrar as diferentes medidas de tensão aplicada nos terminais da bobina seu comportamento físico.

Tensão em Volts Aplicada nos terminais da Bobina	Corrente pela Bobina em mA	Distância entre Bobina e Esfera – Ponto Inicial de Atração

Corrente na Bobina em mA



Distância de Atração Inicial em mm



5. Ensaio de Laboratório N° 3

TÍTULO DO ENSAIO:	Conhecendo o comportamento do amplificador
--------------------------	---

Nome do Aluno	Número de Matrícula

Nome de Docente:	
Nome do Curso:	

5.1. Objetivos

Este ensaio visa conhecer o comportamento e funcionamento do amplificador com conversor tensão-corrente.

5.2. Leituras Recomendadas

- ✓ Dissertação do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética, Páginas 1 até 112 com Foco no capítulo 4.

5.3. Lista de Materiais

- ✓ Montagem Mecânica do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética com a bobina já fixada na estrutura.
- ✓ Conjunto de Esferas de Aço
- ✓ 2 Fontes de Alimentação +24 VDC
- ✓ 1 Fonte de Alimentação Regulável de 0 a 24VDC, 1 A .
- ✓ 1 Módulo Amplificador com conversor Tensão-Corrente

5.4. Procedimento Experimental

5.4.1. Preparação da Montagem

- ✓ Organizar a bancada com a montagem mecânica, a fonte regulável e outros componentes disponíveis.
- ✓ Conectar a alimentação DC, +24VDC, ao amplificador.
- ✓ Conectar a bobina ao amplificador.
- ✓ Conectar a fonte regulável à entrada de sinal do amplificador.
- ✓ Dispor de uma esfera de aço de 55 g.

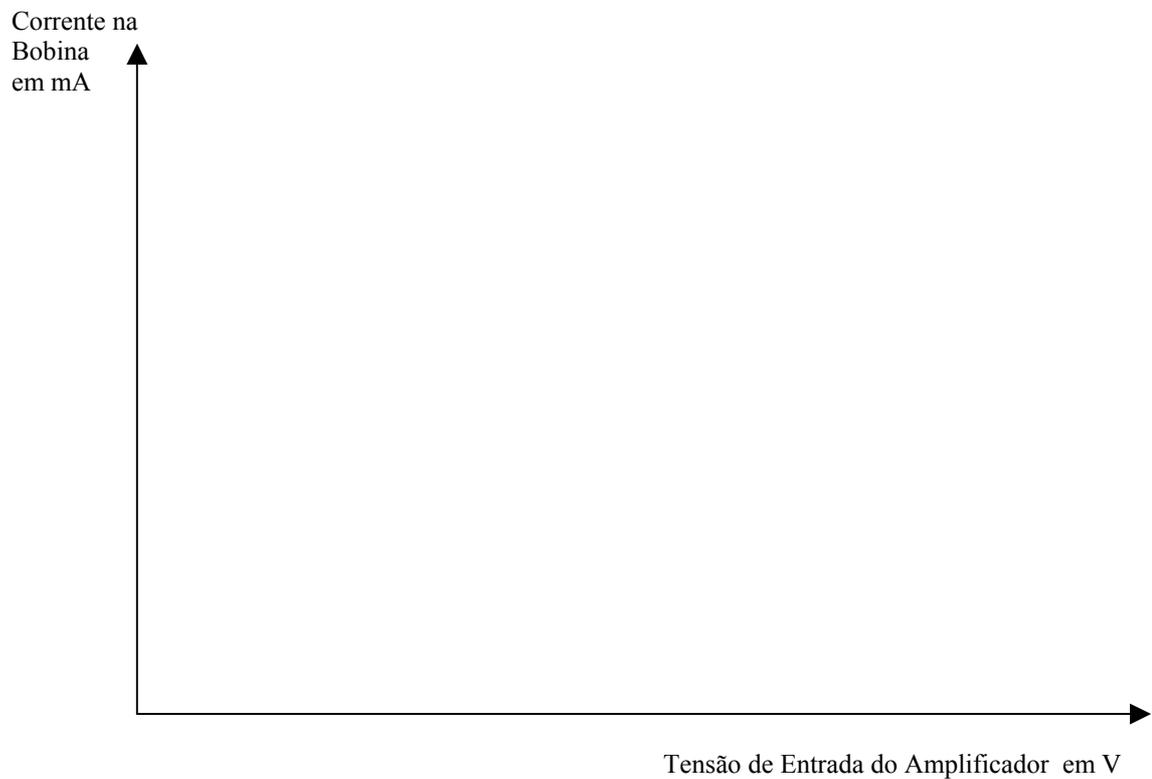
5.4.2. Levantamento do Comportamento do Amplificador

- ✓ Após conectar a fonte regulável nos terminais de entrada de sinal do amplificador, ajustar esta tensão, variando de 0,5 e 0,5 V, e medir a tensão de saída do amplificador. Determinar também o ponto de início ou eminência de atração da esfera em função de cada ponto de operação do amplificador.
- ✓ Registrar os dados em uma tabela.
- ✓ Finalizar o procedimento traçar a curva de comportamento do amplificador.

5.4.3. Aquisição e Análise de Dados

- ✓ Preencher a tabela a seguir para registrar as diferentes medidas de tensão de saída do amplificador e seu comportamento.

Tensão em Volts Aplicada na entrada do Amplificador	Tensão em Volts na Saída do Amplificador	Corrente pela Bobina em mA	Distância entre Bobina e Esfera – Ponto Inicial de Atração



6. Ensaio de Laboratório N° 4

TÍTULO DO ENSAIO:	Estudo do Sistema em Malha Fechada Analógica
--------------------------	---

Nome do Aluno	Número de Matrícula

Nome de Docente:	
Nome do Curso:	

6.1. Objetivos

Este ensaio visa conhecer o comportamento, funcionamento e dinâmica do sistema de levitação magnética em malha fechada analógica, ou seja utilizando um circuito discreto de controle com controlador PID analógico.

6.2. Leituras Recomendadas

- ✓ Dissertação do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética, Páginas 1 até 112.

6.3. Lista de Materiais

- ✓ Montagem Mecânica do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética com a bobina já fixada na estrutura.
- ✓ Conjunto de Esferas de Aço
- ✓ 2 Fontes de Alimentação +24 VDC
- ✓ 1 Protoboard
- ✓ Componentes Eletrônicos para montagem do circuito analógico (Vide Esquema Elétrico)
- ✓ 1 Módulo Amplificador com conversor Tensão-Corrente

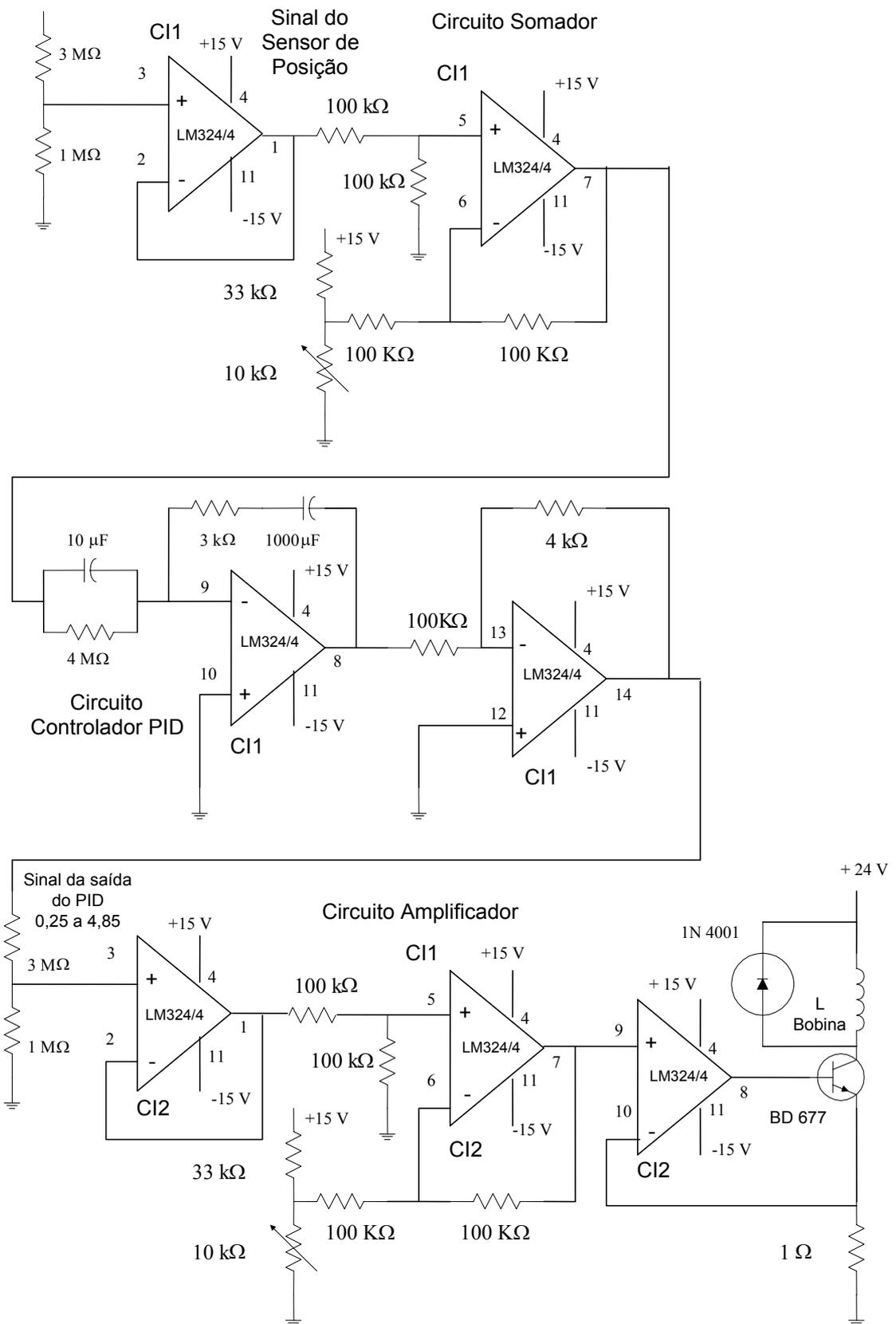
6.4. Procedimento Experimental

6.4.1. Preparação da Montagem

- ✓ Organizar a bancada com a montagem mecânica, a fonte regulável e outros componentes disponíveis.
- ✓ Conectar a alimentação DC, +24VDC, ao amplificador.
- ✓ Conectar a bobina ao amplificador.
- ✓ Montar o circuito analógico em protoboard (Vide Esquema Elétrico).
- ✓ Conectar sensor à entrada do circuito analógico (Consultar capítulo 4 da dissertação).
- ✓ Conectar a saída do circuito analógico à entrada do amplificador.
- ✓ Dispor de uma esfera de aço de 55 g.

6.4.2. Esquema Elétrico do Sistema em Malha Fechada Analógica

Sinal do Sensor Óptico Analógico (1 a 5V)



Circuito Completo do Regulador Analógico do Sistema Maglev

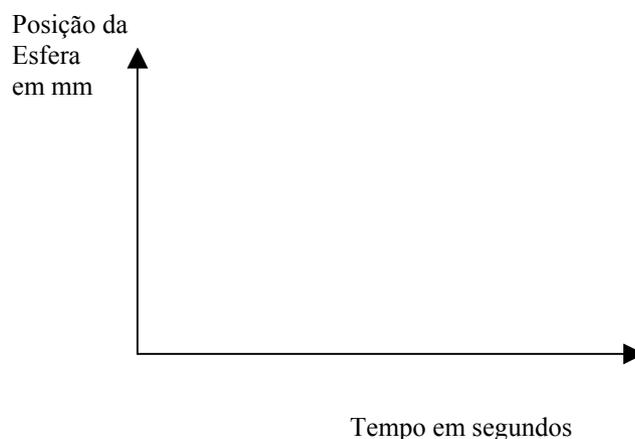
6.4.3. Levantamento da Dinâmica e Comportamento do Sistema

- ✓ Após finalizadas as conexões físicas dos circuitos e componentes do sistema, energizá-lo e aproximar a esfera à bobina cuidando para que a mesma esteja dentro do feixe do sensor laser. Observar o que ocorre. Se a esfera estiver sendo atraída direto, ou batendo em movimento tipo sobe e desce, no núcleo da bobina, significa que há necessidade de ajuste de ganho. Proceder o ajuste no circuito analógico através de trimpots.
- ✓ Uma vez estabilizado o sistema, checar a distância entre bobina e esfera para avaliar o erro em relação à referência.
- ✓ Registrar as formas de ondas da saída do sensor de posição, entrada do amplificador (Saída do PID), e sinal de erro em relação à referência.
- ✓ Finalizar o procedimento traçando os gráficos obtidos do comportamento do sistema.

6.4.4. Aquisição e Análise de Dados

- ✓ No ponto de equilíbrio do sistema, preencher a tabela a seguir.

Medida	Valor Obtido durante o Ensaio
Tensão em Volts na Saída do Amplificador	
Corrente na Bobina em mA	
Posição da Esfera em mm	
Tempo de Resposta do Sistema	



7. Ensaio de Laboratório N° 5

TÍTULO DO ENSAIO:	Estudo do Sistema em Malha Fechada Digital
--------------------------	---

Nome do Aluno	Número de Matrícula

Nome de Docente:	
Nome do Curso:	

7.1. Objetivos

Este ensaio visa conhecer o comportamento, funcionamento e dinâmica do sistema de levitação magnética em malha fechada digital, a qual utiliza um computador com um conversor A/D e D/A na malha e um controlador PID analógico implementado por software.

7.2. Leituras Recomendadas

- ✓ Dissertação do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética, Páginas 112 até 147.
- ✓ Manual da Placa A/D e D/A Advantech PCL-711B.

7.3. Lista de Materiais

- ✓ Montagem Mecânica do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética.
- ✓ Conjunto de Esferas de Aço
- ✓ Sensor Óptico tipo Laser por Barreira modelo LX2 da Marca Keyence
- ✓ 2 Fontes de Alimentação 24 VDC
- ✓ 1 Placa A/D e D/A da marca Advantech
- ✓ 1 Módulo de Conexão com Flat Cable
- ✓ 1 Módulo Amplificador com Conversor Tensão-Corrente
- ✓ 1 Computador PIII com 128 Mbytes de RAM, 20GB de HD e Slots ISA/PCI com Windows 98 e Matlab 5.3 instalados.

7.4. Procedimento Experimental

7.4.1. Preparação da Montagem

- ✓ Organizar a bancada com a montagem mecânica, as fontes de alimentação, computador e outros componentes disponíveis.
- ✓ Conectar a alimentação DC, +24VDC, ao amplificador.
- ✓ Conectar a bobina ao amplificador.
- ✓ Instalar a placa A/D e D/A no slot do computador.
- ✓ Executar as conexões do flat cable e conversor A/D e D/A .
- ✓ Executar conexões do módulo com flat cable à saída do sensor de posição entrada do amplificador.
- ✓ Ligar o micro, rodar Windows 98 e Matlab versão 5.3.
- ✓ Dispor de uma esfera de aço de 55 g.

7.4.2. Diagrama Básico do Sistema em Malha Fechada Digital

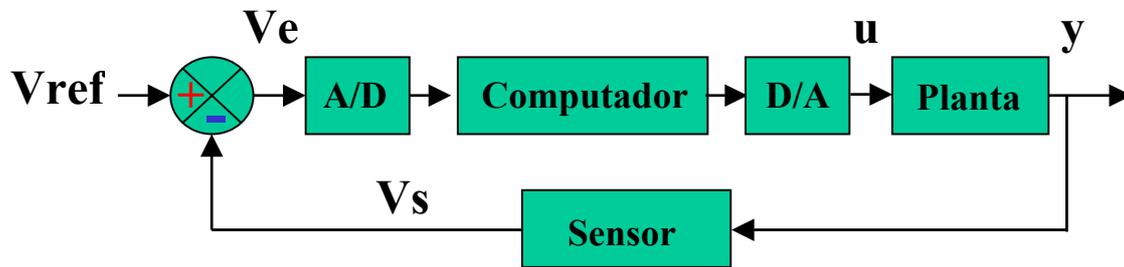


Diagrama de Blocos do Sistema Maglev em Malha Fechada Digital

7.4.3 Implementação do Diagrama no Simulink

- ✓ Implementar o diagrama mostrado a seguir.

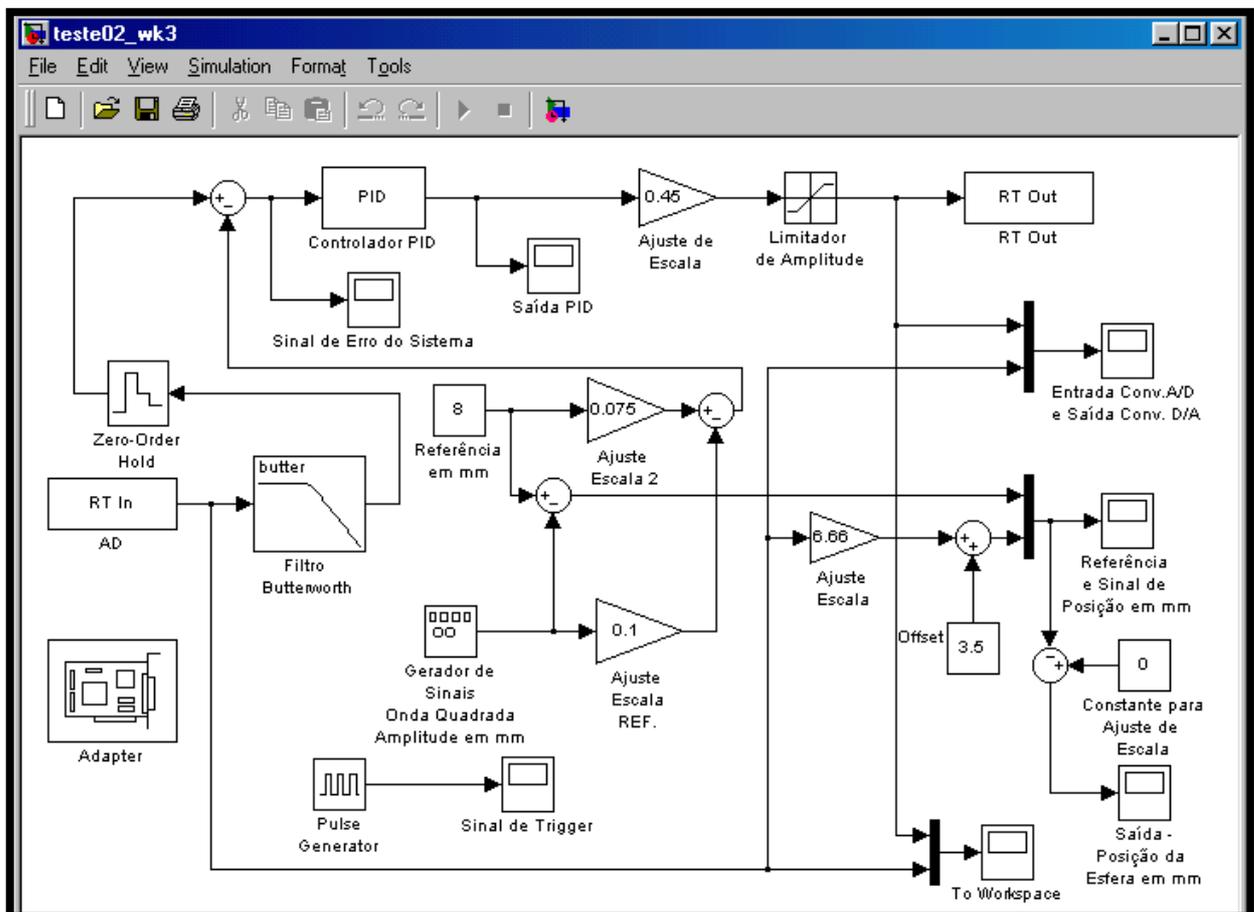


Diagrama do Sistema Maglev em Malha Fechada Digital

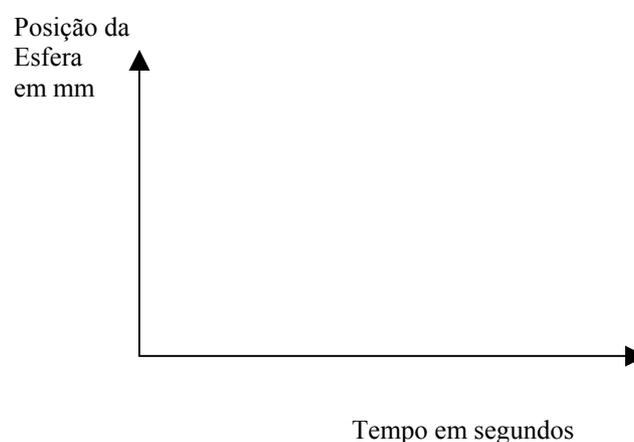
7.4.4. Levantamento da Dinâmica e Comportamento do Sistema

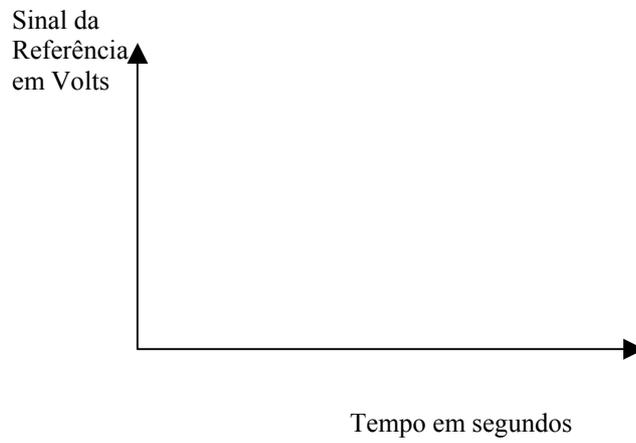
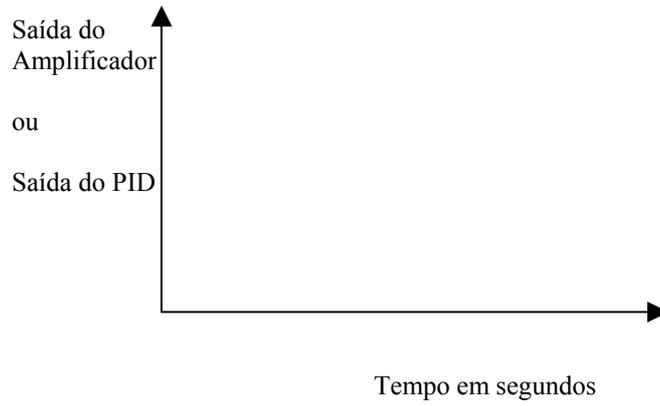
- ✓ Após finalizado o diagrama, compilar.
- ✓ Considerar tempo de amostragem igual 0,0001 segundos.
- ✓ Ajustar um valor inicial para K_p , K_i e K_d do controlador PID.
- ✓ Após finalizadas as conexões físicas dos circuitos e componentes do sistema, energizá-lo.
- ✓ Aproximar a esfera à bobina cuidando para que a mesma esteja dentro do feixe do sensor laser. Observar o que ocorre. Se a esfera estiver sendo atraída direto, ou batendo em movimento tipo sobe e desce, no núcleo da bobina, significa que há necessidade de ajuste de ganho. Proceder o ajuste nos parâmetros do controlador PID.
- ✓ Uma vez estabilizado o sistema, checar a distância entre bobina e esfera para avaliar o erro em relação à referência.
- ✓ Registrar as formas de ondas da saída do sensor de posição, entrada do amplificador (Saída do PID), e sinal de erro em relação à referência.
- ✓ Finalizar o procedimento traçando os gráficos obtidos do comportamento do sistema.

7.4.5. Aquisição e Análise de Dados

- ✓ No ponto de equilíbrio do sistema, preencher a tabela a seguir.

Medida	Valor Obtido durante o Ensaio
Tensão em Volts na Saída do Amplificador	
Corrente na Bobina em mA	
Posição da Esfera em mm	
Tempo de Resposta do Sistema	





7.4.6. Relatório do Ensaio

7.4.6.1. O que foi realizado?

8. Ensaio de Laboratório N° 6

TÍTULO DO ENSAIO:	Identificação do Sistema em Malha Fechada Digital
--------------------------	--

Nome do Aluno	Número de Matrícula

Nome de Docente:	
Nome do Curso:	

8.1. Objetivos

Este ensaio visa identificar o sistema através dos recursos do Matlab e Simulink, de modo a determinar sua função de transferência e conhecer seu comportamento, funcionamento e dinâmica. Para isto será utilizado o protótipo do sistema de levitação magnética em malha fechada digital, o computador com conversor A/D e D/A e o controlador PID introduzido na malha .

8.1. Leituras Recomendadas

- ✓ Dissertação do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética,
- ✓ Manual da Placa A/D e D/A Advantech PCL-711B.
- ✓ System Identification Toolbox for use with Matlab – The Math Works Inc.
- ✓ Introdução à Identificação de Sistemas – UFMG/ Luis A. Aguirre

8.2. Lista de Materiais

- ✓ Montagem Mecânica do Sistema Didático de Controle para Levitação Magnética.
- ✓ Conjunto de Esferas de Aço
- ✓ Sensor Óptico tipo Laser por Barreira modelo LX2 da Marca Keyence
- ✓ 2 Fontes de Alimentação 24 VDC
- ✓ 1 Placa A/D e D/A da marca Advantech
- ✓ 1 Módulo de Conexão com Flat Cable
- ✓ 1 Módulo Amplificador com Conversor Tensão-Corrente
- ✓ 1 Computador PIII com 128 Mbytes de RAM, 20GB de HD e Slots ISA/PCI com Windows 98 e Matlab 5.3 instalados.

8.3. Procedimento Experimental

8.3.1. Preparação da Montagem

- ✓ Organizar a bancada com a montagem mecânica, as fontes de alimentação, computador e outros componentes disponíveis.
- ✓ Conectar a alimentação DC, +24VDC, ao amplificador.
- ✓ Conectar a bobina ao amplificador.
- ✓ Instalar a placa A/D e D/A no slot do computador.
- ✓ Executar as conexões do flat cable e conversor A/D e D/A .
- ✓ Executar conexões do módulo com flat cable à saída do sensor de posição entrada do amplificador.
- ✓ Ligar o micro, rodar Windows 98 e Matlab versão 5.3.
- ✓ Dispor de uma esfera de aço de 55 g.

8.3.2. Diagrama Básico do Sistema em Malha Fechada Digital

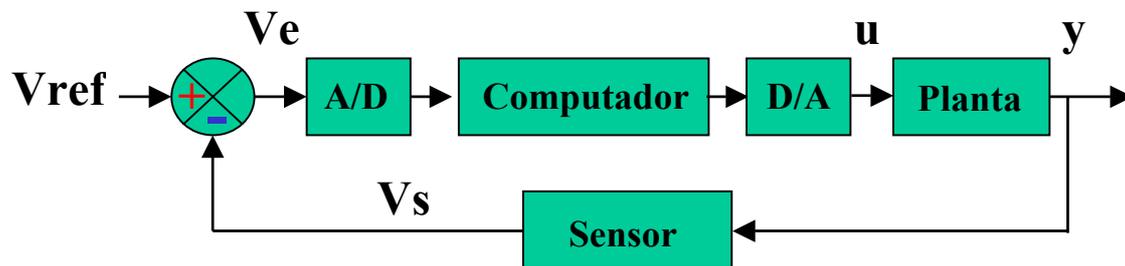


Diagrama de Blocos do Sistema Maglev em Malha Fechada Digital

8.3.3. Implementação do Diagrama no Simulink

✓ Implementar o diagrama mostrado a seguir.

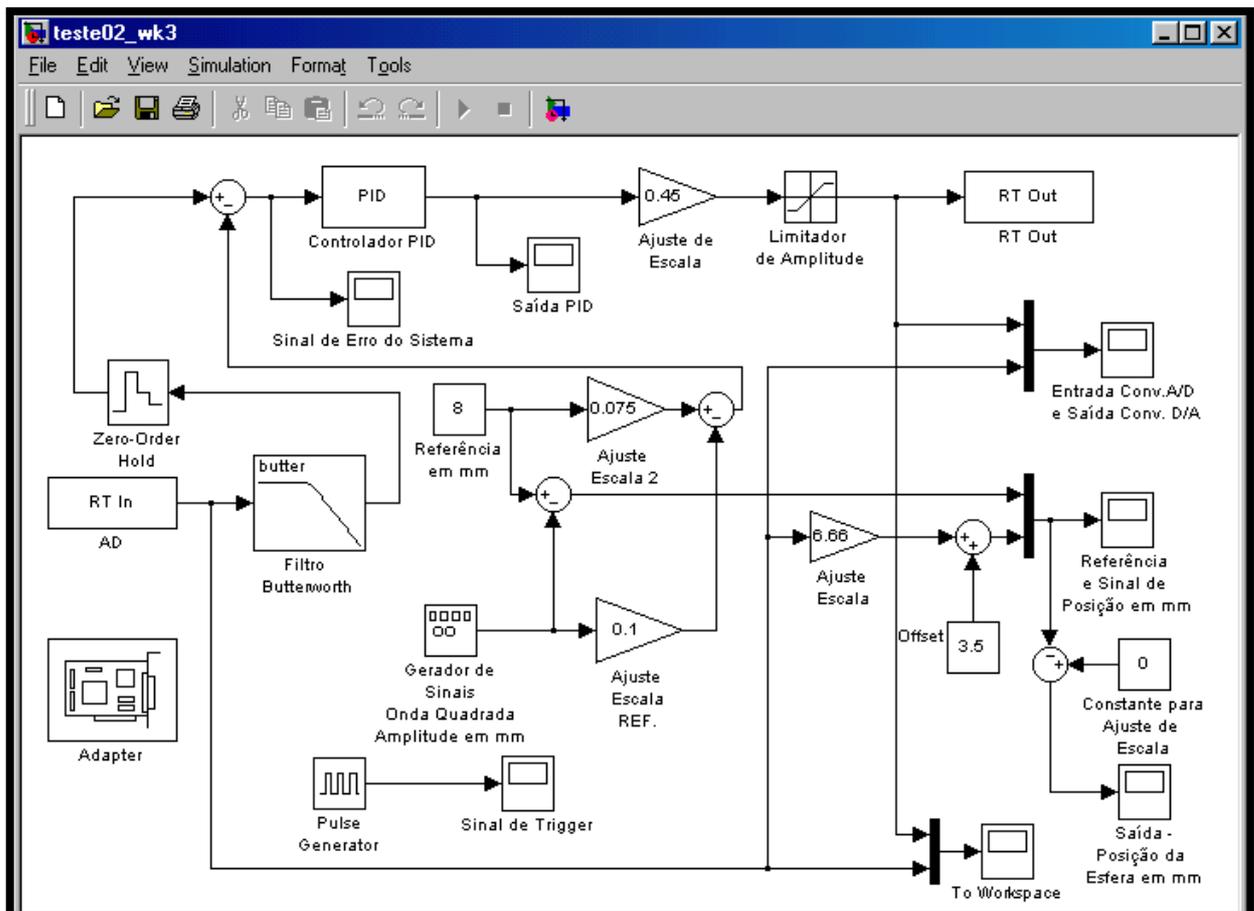
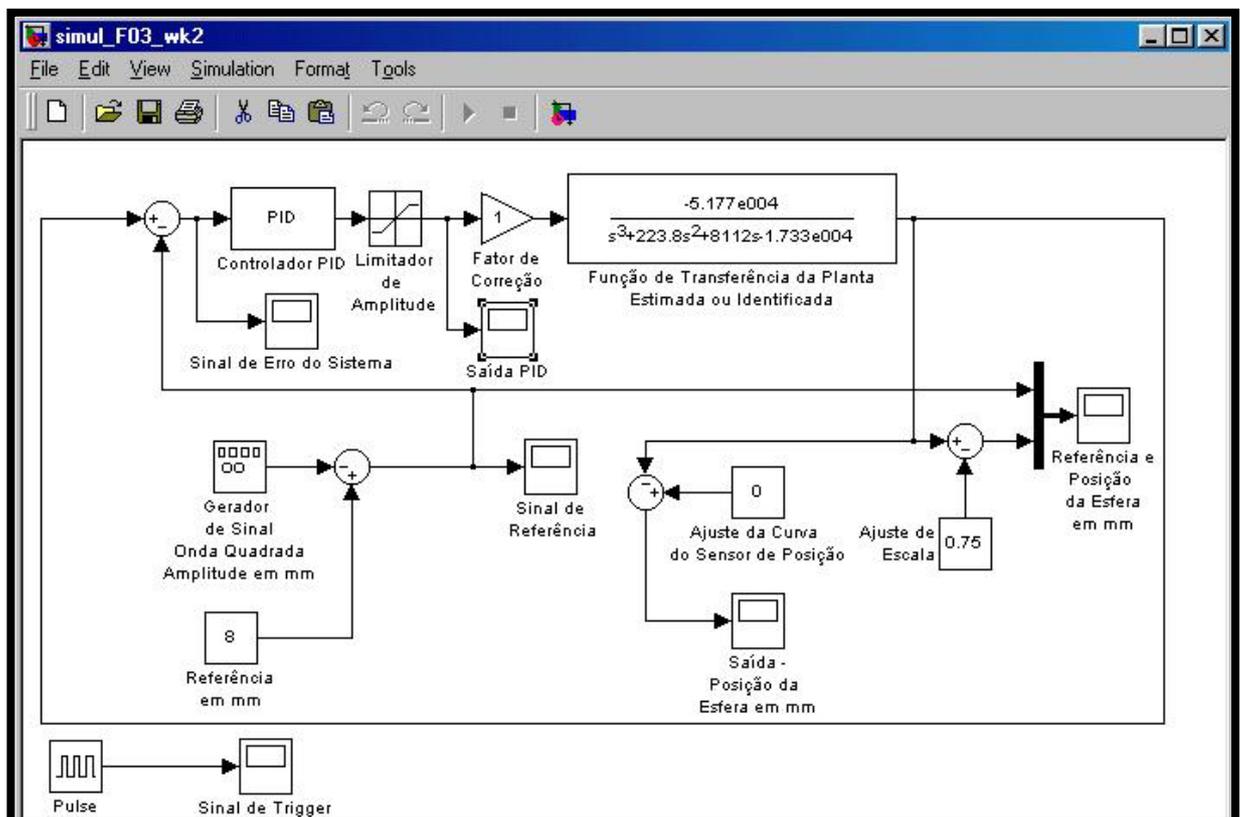


Diagrama do Sistema Maglev em Malha Fechada Digital

8.3.4. Levantamento da Dinâmica e Comportamento do Sistema

- ✓ Executar o procedimento completo do ensaio número 5, item 1.6.4.3..
- ✓ Após ensaio e aquisição de dados, checar os dados obtidos através do comando Workspace no command do Matlab.
- ✓ Executar a rotina Estimate 1, descrita no trabalho de dissertação do sistema.
- ✓ Executar a rotina Estimate 2, descrita no trabalho de dissertação do sistema.
- ✓ Executar a rotina FT, descrita no trabalho de dissertação do sistema.
- ✓ Uma vez obtida a FT, levantar a dinâmica do sistema, seguindo os seguintes passos:

- Implementar o seguinte diagrama.



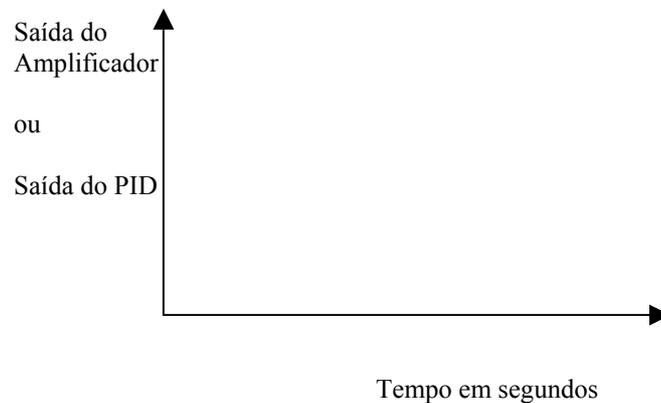
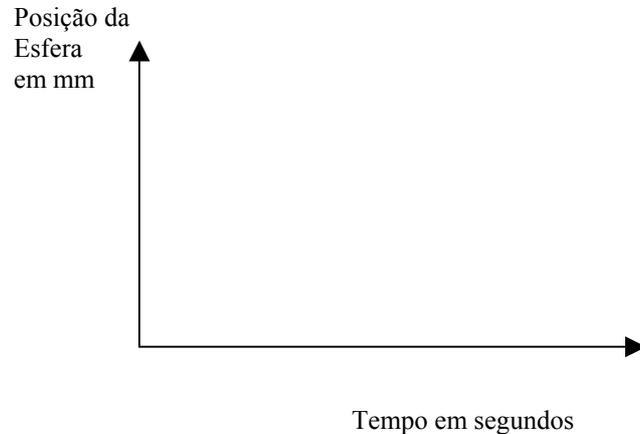
- Simular o sistema implementado com a FT estimada.
- Aproximar a esfera à bobina cuidando para que a mesma esteja dentro do feixe do sensor laser. Observar o que ocorre. Se a esfera estiver sendo atraída direto, ou batendo em movimento tipo sobe e desce, no núcleo da bobina, significa que há necessidade de ajuste de ganho. Proceder o ajuste nos parâmetros do controlador PID.

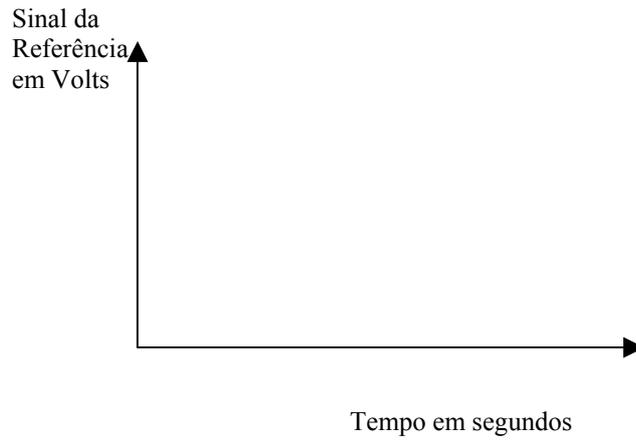
- Uma vez estabilizado o sistema, checar a distância entre bobina e esfera para avaliar o erro em relação à referência.
- Registrar as formas de ondas da saída do sensor de posição, entrada do amplificador (Saída do PID), e sinal de erro em relação à referência.
- Finalizar o procedimento traçando os gráficos obtidos do comportamento do sistema.

8.3.5. Aquisição e Análise de Dados

- ✓ No ponto de equilíbrio do sistema, preencher a tabela a seguir.

Medida	Valor Obtido durante o Ensaio
Tensão em Volts na Saída do Amplificador	
Corrente na Bobina em mA	
Posição da Esfera em mm	
Tempo de Resposta do Sistema	





8.3.6. Relatório do Ensaio

8.3.6.1. O que foi realizado?

8.3.6.2. Quais os benefícios do ensaio realizado?

8.3.6.5. Sugestões e Melhorias

REFERÊNCIAS

1. Referências Bibliográficas:

Gene F. Franklin and J. David Powell, "Digital Control of Dynamic Systems", pp. 131-171, 1980.

Benjamin C. Kuo, "Automatic Control System", 7th Edition, Prentice Hall, pp. 183-333, 1995.

Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering", 3rd Edition, Prentice Hall, pp. 48-83, pp.544-571, pp. 642-734, 1997.

Charles L. Philips and H. Troy Nagle – “Digital Control System – Analysis and Design”, 2nd Edition, Prentice Hall, pp. 265-306, 1990.

Bahram Shahian and Michael Hassul – “Control System Design using Matlab”, Prentice Hall, pp. 455-484, 1993.

Luiz Antônio Aguirre, “Introdução a Identificação de Sistemas”, Editora UFMG, pp. 387-408, 2000.

Paul Katz, “Digital Control using Microprocessors”, Prentice Hall, pp. 38-64, 1981.

Rolf Isermann, “Digital Control Systems – Fundamentals and Deterministic Control”, Volume 1, 2nd Edition, Springer Verlag, pp. 97-156, 1989.

Raymond G. Jacquot, “Modern Digital Control Systems”, 2nd Edition, pp. 235-269, pp. 367-384, 1995.

Lennart Ljung, “Systems Identification – Theory for the User”, 2nd Edition, Prentice Hall, pp. 520-538, 1999.

N. K. Sinha and B. Kuszta, “Modeling and Identification of Dynamic Systems”, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 51-75, pp. 121-131, 1983.

Richard C. Dorf, “Modern Control System”, 2nd Edition, Addison Wesley Publishing Company, pp. 326-370, xxxx.

George J. Thaler and Robert G. Brown, “Analysis & Design of Feedback Control Systems”, International Student Edition, pp. 251-287, 1960.

Constantine H. Houppis and Gary B. Lamont, “Digital Control Systems – Theory, Hardware and Software”, McGraw Hill, 2nd Edition, pp. 473-500, 1987.

Lennart, Ljung, “System Identification Toolbox Manual for use with Matlab”, The MathWorks, pp. 3.1- 3.72, 1988.

Rake, H., Step response and Frequency response methods. Automatica, pp. 519-526, 1980.

Matlab Control System Toolbox, The MathWorks, pp. 1-12, 1992.

Fabício Reis Caldeira, “Trabalho de Pesquisa em Levitação Magnética”, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

Omron Semiconductors and Sensors, “Digital Fiber Amplifier E3X-DA Manual”, Cat. No.E305-E3-1, 1999.

Keyence Corporation, “General Catalog of Measuring Instruments”, N. KA-ME-04, November, 1991.

Carnegie Mellon, “Control Tutorial for Matlab”, University of Michigan, 1997.

Plínio Benedicto Lauro Castrucci e Rino Curti, “Sistemas Lineares e Não Lineares”, Editora Edgard Blucher, pp. 82-93, pp. 118-123, 1981.

B. Demidovitch, “Problemas e Exercícios de Análise Matemática”, pp. 328-368, 1977.

Ceslau L. Barczak, “Análise de Sistemas Lineares”, pp.109-114, 1977.

The MathWorks Inc, “Real Time Windows Target – User’s Guide”, version 1, 1999.

The MathWorks Inc, “Control Experiments for the Feedback Magnetic Levitation System using Real Time Linux Target (RTLTL)”, October - 2000.

2. Referências da Internet

- [01] Technical Paper, “Magnetic Levitation- Baldea, N ew Ways: Tiltrotor Aircraft and Magnetic Levitating Vehicles”, 1991.
<http://www.infoplease.com/ce6/sci/A0831156.html>
- [02] Technical Paper, “Magnetic Bearings”, 2002.
<http://www.mmsb.com/maginfo.shtml>
- [03] Antônio José Silva Oliveira, “Motor Eólico em Levitação Magnética”, 2002.
<http://www.inventabrasil.hpg.ig.com.br/eolevit.htm>
- [04] Clarissa Thomé, “País pode ter trem que levita sobre trilho em dez anos”, Junho - 2000.
http://www.geocities.com/baja/cliffs/5086/noticias/trem_levita.htm
- [05] Syllabus Course, “System Dynamics”, 2001.
<http://www.peshkin.mech.nwu.edu/ea3/book01/toc.html>
- [06] Robert Anderson, “Some Thoughts on State Variables”, Iowa State University, BE310/EE201, 2000.
<http://www.Class.ee.iastate.edu/rmander/ee201/StateVariables.htm>
- [07] Marc T. Thompson and Richard Thornton, “Scale Model Flux Canceling ElectroDynamic Magnetic Suspension (EDS) – Design and Modeling”, 2001
http://www.members.aol.com/marett/CV/Abstract/ieec_m1a.htm
- [08] Technical Paper, “Introduction to Simulink”, 2000.
<http://www.ece.wpi.edu/courses/es3011/sim/started.html>

- [09] Technical Paper, “Simplified Analytical Model of a Six Degree of Freedom Large Gap Magnetic Suspension System”, 2001.
<http://www.nasa.com>
- [10] Nelson J. Groom and Colin P. Britcher, “Open Loop Characteristics of Magnetic Suspension Systems using Electromagnets Mounted in a Planar Array”, NASA Technical Paper 3229, September - 1992.
<http://www.nasa.com>
- [11] Nelson J. Groom and D. E. Cox, “Implementation of a decoupled controller for a magnetic suspension system using electromagnets mounted in a planar array”, 1997.
<http://www.nasa.com>
- [12] Bariet, Walter and Chiasson, John, “Linear and Nonlinear State-Space Controllers for Magnetic Levitation”, International Journal of System Science, 1996, volume 27, páginas 1153-1 163.
<http://www.powerelec.ece.utk.edu/pubs/chiassonIJSS1996.pdf>
- [13] Paschall , Stephen and Kim, Won-Jong, “Design, Fabrication, and Control of a Single Actuator Maglev Test Bed”, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University, 2000
<http://www.mengr.tamu.edu:70/mechanics-system/wkim/pdf/ACC03c1.pdf>