

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**  
**EVANDRO RECH**

**SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM LEVMAG NUMA PLATAFORMA GRÁFICA DE  
DESENVOLVIMENTO (LabVIEW)**

**São Paulo**

**2013**

**EVANDRO RECH**

**SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM LEVMAG NUMA PLATAFORMA GRÁFICA DE  
DESENVOLVIMENTO (LabVIEW)**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação Stricto Sensu de Automação e Controle do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Automação e Controle.

Professor Orientador: Dr. Alexandre Brincalepe Campo

Professor Co-orientador: Dr. Eduardo Alves da Costa

**São Paulo**

**2013**

R245 RECH, Evandro.  
Simulação e controle de um LEVMAG numa plataforma gráfica  
de desenvolvimento (LabVIEW) / Evandro Rech. -- 2013.  
70 f.: il.; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Brincalepe Campo  
Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Alves da Costa

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle  
de Processos) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2013.

1. Levitação Magnética 2. LabVIEW 3. Regulador Linear  
Quadrático I. RECH, Evandro II. Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de São Paulo III. Título

CDU 681.0

## ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a) : Evandro Rech

Nome do Orientador: Prof. Dr. Alexandre Brincalepe Campo

Nome do Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Alves da Costa

Título do Trabalho: "SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UM LEVMAG NUMA PLATAFORMA GRÁFICA DE DESENVOLVIMENTO (LabVIEW)"

Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

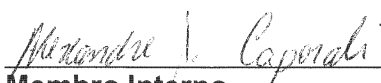
Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Alexandre Brincalepe Campo – Orientador	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Alexandre Simião Caporali	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Anselmo Bittar	POLI – USP-SP	APROVADO
Nome completo do Participante Suplente da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Eduardo Alves da Costa	IFSP – SPO	
Prof. Dr. Ricardo Pires	IFSP – SPO	

Considerando-o: ☒ APROVADO  
[ ] NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 13 de março de 2013

  
Presidente da Banca

  
Membro Interno

  
Membro Externo

Observações:

*Dedico este trabalho aos meus pais, por me incentivarem na infância e me motivar a chegar até este momento, e a minha esposa, por me dar forças e me acompanhar durante toda esta trajetória desde a graduação.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela inspiração e respostas, sempre fornecidas nos momentos certos.

Ao meu orientador, Prof.º Dr. Alexandre Brincalepe Campo, por toda ajuda, paciência e dedicação aplicados no desenvolvimento dos meus projetos ao longo de 8 anos.

Ao Prof.º Dr. Eduardo Alves da Costa, co-orientador deste trabalho, e ao Prof.º Dr. Anselmo Bittar pela experiência que ambos compartilharam comigo principalmente na área de levitação magnética, possibilitando a resolução de problemas técnicos e direcionamento das etapas deste projeto.

Ao Prof.º Dr. Ricardo Pires, pela indicação de referências na criação de algoritmos computacionais.

Aos meus colegas de estudo e trabalho pelas vezes nas quais me ajudaram a resolver os problemas enfrentados no decorrer dos ensaios.

Ao Prof.º Sérgio do SENAI de Jandira, pela construção da base de sustentação do LEVMAG.

Ao IFSP e ao SENAI de Jandira pelas oportunidades de crescimento acadêmico e acesso à diferentes recursos providos nos últimos anos.

E finalmente, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que este meu objetivo fosse alcançado.

*“A mente avança até o ponto onde pode chegar; mas depois passa para uma dimensão superior, sem saber como lá chegou. Todas as grandes descobertas realizaram esse salto.”*

Albert Einstein

## RESUMO

Este trabalho apresenta as etapas e critérios adotados para a construção e simulação de um regulador linear quadrático (RLQ) para um LEVMAG (Levitador Magnético) no programa LabVIEW™, assim como sua posterior utilização em um microcontrolador. LEVMAGs se aplicam em situações em que é necessária a eliminação do atrito por contato, das quais se podem citar os motores com mancal magnético e trens LEVMAG de alta velocidade. A instabilidade em malha aberta e as não linearidades presentes neste tipo de planta possibilitam o estudo de uma série de técnicas de controle e sua discretização para uso em microcontroladores. O protótipo LEVMAG construído para este trabalho possui uma estrutura simples, a qual pode ser reproduzida para estudo em outros trabalhos. A etapa potência constitui-se de um circuito de acionamento chaveado, controlado por PWM (Modulação por largura de pulso — Pulse-Width Modulation). A medição dos sinais de posição e corrente elétrica do LEVMAG é feita por sensores de efeito hall dedicados para cada função. A malha de controle é fechada através da placa EK-LM3S8962, a qual possibilita a programação de um microcontrolador através da linguagem gráfica do LabVIEW™. O modelo matemático do LEVMAG é obtido, linearizado e parametrizado para a construção do controlador RLQ, a qual é feita de forma iterativa. Os critérios fixos de projeto do controlador são o limite de operação do circuito de acionamento e resposta sem sobressinal. Para avaliação do controlador, utilizam-se as funções não lineares que descrevem o LEVMAG e elaboram-se blocos configuráveis para sua simulação no módulo *Control Design and Simulation* do LabVIEW™. O simulador é desenvolvido para utilizar o mesmo algoritmo de controle a ser embarcado na placa EK-LM3S8962, dessa forma os recursos da simulação serão os mesmos do ensaio prático. Nas simulações avalia-se a resposta transitória do sistema ao variar a posição de referência. No ensaio prático também se analisa a resposta transitória para validação das simulações realizadas. Os resultados obtidos demonstram que ainda há pequenas diferenças entre a operação no simulador e a prática, entretanto há informações na simulação suficientes para avaliar como será a operação do LEVMAG na prática, como sua faixa efetiva de controle. Ao final do trabalho, apontam-se diversas possibilidades de trabalhos futuros, envolvendo modificações físicas da planta, co-simulação entre os programas Multisim™ e LabVIEW™, utilização de circuitos de acionamento integrados e avaliação de outras técnicas de controle.

Palavras-chave: levitação magnética, EK-LM3S8962, LabVIEW, simulação de sistemas, regulador linear quadrático.



## ABSTRACT

This work presents the steps and criteria adopted for the construction and simulation of a linear quadratic regulator (LQR) for a MAGLEV (Magnetic Levitator) in the software LabVIEW™, as well as its subsequent use in a microcontroller. MAGLEVs are applied in situations where it is necessary to eliminate the contact friction, of which we can cite the motors with magnetic bearings and MAGLEV high speed trains. The open loop instability and non-linearity presents in this kind of plant allow the study of a series of control techniques and its discretization for use in microcontrollers. The MAGLEV prototype built for this work has a simple structure, which can be reproduced for study elsewhere. The output stage consists of a switched-mode drive, controlled by PWM (Pulse Width Modulation). The position and electrical current signals in the MAGLEV are measured by hall effect sensors dedicated for each function. The control loop is closed through the EK-LM3S8962 board, which allows programming a microcontroller through the LabVIEW™ graphical language. The MAGLEV mathematical model is obtained, linearized and parameterized for the construction of the LQR controller, which is performed in an iterative mode. The fixed criteria for the controller design are the operating limit of the drive circuit and response without overshoot. To evaluate the controller, is used the nonlinear function that describe the MAGLEV and are elaborated configurable blocks for its simulation in the toolkit *Control Design and Simulation* of LabVIEW™. The simulator is designed to use the same control algorithm to be embedded in the EK-LM3S8962 board, so the features of the simulation will be the same as the practical test. In the simulation is evaluated the transient response of the system when varying the reference position. In the practical test is also analyzed the transient response for validation of the simulations. The obtained results demonstrate that there are still minor differences between the operation in the simulator and in the practice, however there is sufficient information in the simulation to evaluate the operation of the MAGLEV in practice, as its effective range of control. At the end of the work, are described several possibilities for future works, involving physical modifications in the plant, co-simulation between the software Multisim™ and LabVIEW™, use of integrated drive circuits and evaluation of other control techniques.

Keywords: magnetic levitation, EK-LM3S8962, LabVIEW, systems simulation, linear quadratic regulator.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Foto do LEVMAG. . . . .	24
Figura 2	Circuito de acionamento chaveado. . . . .	25
Figura 3	Placa EK-LM3S8962 utilizada no controle. . . . .	26
Figura 4	Sensor de corrente por efeito hall LTS 6-NP (COSTA, 2009). . . . .	27
Figura 5	Gráfico de saída do LTS 6-NP (COSTA, 2009). . . . .	27
Figura 6	Gráfico da distância do objeto para o sensor x tensão. . . . .	28
Figura 7	Representação do LEVMAG. . . . .	32
Figura 8	Gráfico comparativo da $L(h)$ medido e estimado. . . . .	36
Figura 9	Mapa de polos do LEVMAG em malha aberta . . . . .	38
Figura 10	Mapa de polos com os parâmetros máximos iniciais. . . . .	41
Figura 11	Trajetória dos estados com os parâmetros máximos iniciais. . . . .	41
Figura 12	Mapa de polos na tentativa de impor dois polos dominantes. . . . .	42
Figura 13	Trajetória dos estados na tentativa de impor dois polos dominantes. . . . .	42
Figura 14	Mapa de polos com os parâmetros máximos finais. . . . .	43
Figura 15	Trajetória dos estados com os parâmetros máximos finais. . . . .	43
Figura 16	Diagrama de blocos do LEVMAG em malha fechada . . . . .	44
Figura 17	Diagrama de blocos do sistema com estimador de velocidade . . . . .	46
Figura 18	Diagrama de blocos do LEVMAG em malha fechada com a referência . . . . .	47
Figura 19	Diagrama no LabVIEW <sup>TM</sup> da etapa elétrica do LEVMAG. . . . .	49
Figura 20	Diagrama no LabVIEW <sup>TM</sup> da etapa mecânica do LEVMAG. . . . .	50
Figura 21	Gráfico da distância do objeto para o núcleo (entreferro) x tensão. . . . .	50
Figura 22	Representação dos blocos com os componentes da realimentação. . . . .	51
Figura 23	Diagrama no LabVIEW <sup>TM</sup> do controlador. . . . .	52
Figura 24	Diagrama no LabVIEW <sup>TM</sup> do simulador para o LEVMAG. . . . .	53

Figura 25	Resultado completo da simulação no LEVMAG. . . . .	56
Figura 26	Detalhe da simulação no LEVMAG. . . . .	57
Figura 27	Código completo para embarcar na placa de controle. . . . .	58
Figura 28	Resultado completo do ensaio no LEVMAG. . . . .	60
Figura 29	Detalhe do ensaio no LEVMAG. . . . .	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características físicas do LEVMAG. . . . .	35
Tabela 2	Parâmetros de linearização do LEVMAG. . . . .	36
Tabela 3	Dimensionamento do RLQ. . . . .	40
Tabela 4	Variáveis relacionadas ao simulador. . . . .	54
Tabela 5	Variáveis relacionadas ao algoritmo de controle. . . . .	55
Tabela 6	Valores de referência aplicados ao longo do tempo — simulação. .	55
Tabela 7	Valores de referência aplicados ao longo do tempo — ensaio prático.	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Analógico-digital.
CONCISTEC	Congresso Científico da Semana Tecnológica do IFSP.
DA	Digital-analógico.
DC	Corrente contínua — <i>Direct Current</i> .
DINCON	Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações.
GDL	Grau de liberdade.
LED	Diodo Emissor de Luz — <i>Light Emitting Diode</i> .
LEV MAG	Levitador Magnético.
PD	Proporcional derivativo.
PI	Proporcional integral
PID	Proporcional integral derivativo.
PWM	Modulador por largura de pulso — <i>Pulse Width Modulation</i> .
RC	Resistor-capacitor.
RL	Resistor-indutor.
RLQ	Regulador Linear Quadrático.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$I_{PN}$	corrente nominal do sensor de posição em $[A]$ .
$v(t)$	sinal de tensão aplicado no eletroímã em $[V]$ .
$i(t)$	corrente elétrica no eletroímã em $[A]$ .
$R$	resistência elétrica do eletroímã em $[\Omega]$ .
$VPWR$	tensão ajustada na fonte de alimentação em $[V]$ .
$L(h)$	indutância do eletroímã conforme a posição do objeto em $[H]$ .
$h(t)$	posição do objeto levitado em $[m]$ .
$m$	massa do objeto levitado em $[g]$ .
$F_{peso}$	força peso atuando sobre o objeto levitado em $[N]$ .
$F_{mag}(i, h)$	força magnética gerada pelo eletroímã no objeto levitado em $[N]$ .
$g$	aceleração da gravidade de $9,81 \frac{m}{s \cdot s}$ .
$L_1, L_0$	indutâncias fixa e incremental do eletroímã em $[H]$ .
$a$	constante da função exponencial da indutância em $[m]$ .
$I$	ponto de linearização da corrente elétrica em $[A]$ .
$H$	ponto de linearização da posição do objeto em $[m]$ .
$\Delta i, \Delta h$	variações em torno dos pontos de operação.
$k_i, k_h$	constantes de linearização do sistema.
$V$	ponto de linearização da tensão aplicada no eletroímã em $[V]$ .
$\Delta v$	variação da tensão aplicada em torno de $V$ .
$L$	indutância no ponto da linearização $H$ em $[H]$ .
<b>A, B, C</b>	matrizes de estado, entrada e saída do sistema.
<b>x, <math>x_1, x_2, x_3</math></b>	vetor e estados do sistema.

$u$	entrada do sistema.
$y$	saída do sistema.
$\mathbf{K}, K_{x_1}, K_{x_2}, K_{x_3}$	vetor e ganhos de realimentação do RLQ.
$r$	entrada de referência da realimentação do sistema.
$\mathbf{Q}, \mathbf{R}$	matrizes de penalização de estados e de entradas.
$\max x_i, \max u_j$	valor máximo de projeto para cada estado e entrada do sistema.
$v_i(t)$	tensão de saída do sensor de corrente elétrica em $[V]$ .
$T$	período de amostragem do algoritmo digital em $[s]$ .
$\omega_c$	frequência de corte no estimador de velocidade em $\left[\frac{rad}{s}\right]$ .
$\bar{N}$	ganho para ajuste da entrada de referência no sistema.
$\mathbf{N}_x, N_u$	ganhos individuais para cálculo de $\bar{N}$ .
$g_{DC}$	ganho DC do sistema em malha fechada.
$f$	frequência do sinal PWM no circuito de acionamento em $[Hz]$ .
$h_{inicial}$	posição inicial do objeto para o simulador em $[m]$ .
$i_{inicial}$	corrente elétrica inicial para o simulador em $[A]$ .
$CT$	ciclo de trabalho do PWM no simulador em $[\%]$ .
$ah, bh$	constantes de ajuste do sinal de posição do objeto.
$ai, bi$	constantes de ajuste do sinal de corrente elétrica.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	OBJETIVOS . . . . .	17
1.2	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA . . . . .	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO . . . . .	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1	TÉCNICAS DE CONTROLE CLÁSSICO E MODERNO . . . . .	20
2.2	PROJETO DA PLANTA DE LEVMAG . . . . .	22
2.3	CIRCUITO DE ACIONAMENTO . . . . .	22
2.4	SIMULAÇÃO DE LEVMAGS . . . . .	23
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>24</b>
3.1	MATERIAIS . . . . .	24
3.1.1	<i>A planta LEVMAG</i> . . . . .	24
3.1.2	<i>O circuito eletrônico de acionamento chaveado</i> . . . . .	25
3.1.3	<i>Placa de controle</i> . . . . .	26
3.1.3.1	Sensor de corrente elétrica . . . . .	27
3.1.3.2	Sensor de posição . . . . .	28
3.1.4	<i>Ferramenta de simulação</i> . . . . .	28
3.1.5	<i>Placa de aquisição de sinais</i> . . . . .	29
3.2	MÉTODOS . . . . .	29
<b>4</b>	<b>MODELAGEM DO LEVMAG E PROJETO DO CONTROLADOR</b>	<b>31</b>
4.1	MODELAGEM MATEMÁTICA . . . . .	31
4.1.1	<i>Modelo matemático do sistema elétrico</i> . . . . .	31
4.1.2	<i>Modelo matemático do sistema mecânico</i> . . . . .	32
4.1.2.1	Linearização em torno de pontos de operação . . . . .	33



4.1.3	<i>Modelo matemático completo no espaço de estados . . . . .</i>	34
4.2	LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DA PLANTA . . . . .	35
4.3	PROJETO DO RLQ . . . . .	37
4.3.1	<i>Cálculo dos ganhos de realimentação do RLQ . . . . .</i>	38
4.3.2	<i>Estimativa do estado não medido . . . . .</i>	44
4.3.3	<i>Inclusão da entrada de referência . . . . .</i>	46
<b>5</b>	<b>ELABORAÇÃO DO SIMULADOR</b>	<b>48</b>
5.1	BLOCO ELÉTRICO . . . . .	48
5.2	BLOCO MECÂNICO . . . . .	49
5.3	BLOCOS AUXILIARES DA REALIMENTAÇÃO . . . . .	49
5.4	BLOCO DO ALGORITMO DE CONTROLE . . . . .	51
5.4.1	<i>Diagrama completo do simulador . . . . .</i>	53
<b>6</b>	<b>SIMULAÇÕES E ENSAIOS</b>	<b>54</b>
6.1	SIMULAÇÃO . . . . .	54
6.2	ENSAIO . . . . .	58
6.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS . . . . .	61
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>62</b>
7.1	CONCLUSÃO . . . . .	62
7.2	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	63
7.2.1	<i>Estrutura do LEVMAG . . . . .</i>	64
7.2.2	<i>Circuito de acionamento . . . . .</i>	64
7.2.3	<i>Placas de controle . . . . .</i>	65
7.2.4	<i>Estruturas e técnicas de controle . . . . .</i>	65
7.2.5	<i>Co-simulação de sistemas . . . . .</i>	65
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE A - Desenho técnico do LEVMAG</b>	<b>69</b>

A.1	ELETROÍMÃ . . . . .	69
A.2	BASES . . . . .	69
A.3	OBJETO LEVITADO . . . . .	69

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas de levitação magnética ou LEVMAG (Levitador Magnético) para estudos de técnicas de controle é comum em muitas universidades (GOMES; STEPHAN, 2004), isto porque esta é uma planta flexível na qual é possível aplicar controladores clássicos e modernos para sua estabilização, relacionar métodos de acionamento eletrônico lineares e chaveados e ainda verificar as diferenças entre resultados de simulações e observações práticas devido a não linearidades não modeladas.

Sistemas LEVMAG são aplicados em situações nas quais é necessário eliminar o atrito por contato, dentre elas os trens LEVMAG de alta velocidade, mancais magnéticos (COSTA, 2009), motores *bearingless* e alguns tipos de ultracentrífugas.

Este trabalho apresenta os resultados da simulação e ensaio realizados em um LEVMAG com 1 GDL (Grau de Liberdade) com um circuito de acionamento chaveado de 2 quadrantes. São descritas as técnicas utilizadas para o controle e estabilização utilizando programação em linguagem gráfica, os principais problemas encontrados, os resultados obtidos e as possibilidades de trabalhos futuros.

### 1.1 OBJETIVOS

LEV MAGs estão presentes na literatura com diferentes técnicas associadas para seu controle. Algumas delas envolvem a linearização em torno de um ponto de operação e a utilização do programa MATLAB<sup>TM</sup> no fechamento da malha de controle, como em (GOMES; SILVA; NETO, 2003; LEMPEL; MICHEL; CARBALAJES, 2006). Também é comum o uso de circuitos de acionamento lineares e controladores analógicos clássicos (HURLEY; WÖLFLE, 1997; GOMES; STEPHAN, 2004).

Considerando os pontos abordados nas principais referências, este projeto tem como objetivos gerais explorar técnicas modernas de controle e acionamento, além de um programa operando com linguagem gráfica. Para atingi-los, têm-se como principais objetivos específicos:

- Estudar os modelos não lineares e lineares que compõem uma planta LEVMAG;
- Parametrizar o LEVMAG construído;

- Elaborar um controlador RLQ para a estabilização do sistema;
- Montar um simulador com a planta não linear;
- Construir o algoritmo gráfico de controle;
- Simular o sistema com o algoritmo de controle construído;
- Fechar a malha de controle e estabilizar o LEVMAG;
- Comparar os resultados teóricos e práticos para avaliar a simulação.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA

Este trabalho dá continuidade a estudos de LEVMAG feitos pelo autor em (RECH, 2010; RECH; CAMPO, 2011a; RECH; CAMPO, 2011b) envolvendo simulações, projeto de circuitos de acionamento chaveados e controladores utilizando técnicas clássicas e modernas. A possibilidade de cruzar os resultados das simulações com os de ensaios práticos permitiram nestes trabalhos avaliar a qualidade das técnicas utilizadas e levantar propostas de melhoria, algumas delas aplicadas neste projeto.

O uso de uma ferramenta que permite a programação de forma gráfica, tem como fundamento averiguar as suas diversas funcionalidades, tais como o intercâmbio do algoritmo usado na simulação com a placa de controle. As observações realizadas servirão como base para futuros trabalhos, tendo em vista que as referências que utilizam este programa são escassas, e.g., como pode ser visto na revisão bibliográfica deste trabalho.

Será feito o dimensionamento de um controlador RLQ para atender a necessidade apresentada. O algoritmo gráfico para tal controlador é desenvolvido, detalhado e apresentado. Além disso, são usados recursos com a finalidade de otimizar a velocidade de resposta destes algoritmos na placa de controle para atender os requisitos mínimos do LEVMAG.

Finalmente, com o funcionamento do algoritmo na placa de controle, demonstra-se a proximidade entre o virtual e o real. Isto permite não apenas validar o modelo matemático obtido para o LEVMAG, mas avaliar a simulação e a ferramenta usada, possibilitando seu uso no projeto, simulação e aplicação de sistemas de controle.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Os próximos capítulos deste trabalho descrevem os recursos e técnicas elaborados e aplicados, os problemas encontrados e os resultados obtidos nas simulações e ensaios. As principais linhas de pesquisa que seguem este tema são abordadas no decorrer do texto, dentre elas a modelagem dinâmica do sistema, o circuito eletrônico chaveado, simulação de modelos não lineares e programação gráfica embarcada.

No capítulo 2 é apresentada uma análise sucinta das referências abordadas no trabalho e a ideia principal de cada uma. O capítulo é dividido em seções em relação a cada tópico abordado.

No capítulo 3 são descritos os recursos que compõem o LEVMAG em todas as suas etapas de desenvolvimento, desde o projeto e simulação até a sua realização física. Também são brevemente apresentados os trabalhos anteriores desenvolvidos pelo autor para a concepção do trabalho atual.

O capítulo 4 inicia a análise matemática do LEVMAG através de suas funções de transferência no domínio do tempo. As funções são linearizadas e apresenta-se seu modelo no espaço de estados. É feita a parametrização deste modelo e o cálculo dos ganhos para um RLQ utilizando realimentação de estados. Por fim, calcula-se o ganho DC do sistema, utilizado para a aplicação do sinal de referência.

No capítulo 5, os modelos dinâmicos do capítulo anterior são introduzidos no ambiente de simulação junto às suas principais não linearidades e características de funcionamento. Elabora-se o algoritmo de controle gráfico para execução no ambiente de simulação e na placa de controle.

No capítulo 6, realiza-se a simulação do sistema modelado utilizando o algoritmo de controle e aplicando um sinal de referência variante no tempo. No ensaio feito em seguida, utiliza-se o mesmo algoritmo de controle na placa EK-LM3S8962 e é feita a aquisição dos sinais com um sistema de aquisição de sinais USB NI myDAQ. Os resultados obtidos em ambas implementações são analisados e comparados.

No capítulo 7, apresenta-se os principais pontos abordados no trabalho, os resultados, conclusões e os trabalhos futuros que podem ser realizados com base no sistema, técnicas de controle, simulações e demais tópicos analisados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo relaciona as referências utilizadas na elaboração do trabalho, seus métodos e principais resultados. O texto foi dividido de acordo com a abordagem principal de cada referência.

### 2.1 TÉCNICAS DE CONTROLE CLÁSSICO E MODERNO

É necessária uma atenção especial na resolução dos números usados quando trata-se de algoritmos computacionais. Goldberg (1991) descreve os principais cuidados na utilização de números em ponto flutuante em operações matemáticas computacionais para diminuir o erro dos resultados. Apesar de se referir apenas ao ponto flutuante, as técnicas apresentadas são transpostas para uso com os números inteiros nos algoritmos embarcados deste trabalho.

Em (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2002) explora-se de forma abrangente o controle de sistemas dinâmicos utilizando teorias clássicas e modernas. Este trabalho utilizou como referências principais desse livro o projeto no espaço de estados, que engloba a realimentação de estados e inclusão da entrada nesse tipo de sistema, e o controle digital, no qual o autor também explica alguns dos problemas numéricos do projeto de um algoritmo de controle.

É abordada por Ogata (2003) e Leonardi e Maya (2011) a teoria de controle para a modelagem de sistemas e elaboração de controladores clássicos e modernos. Especificamente por Leonardi e Maya (2011), são tratados os conceitos de sistemas no espaço de estado e discretos, além do controle por realimentação de estados e equações de diferenças. Já Ogata (2003), além de abordar a teoria de controle no espaço de estados, explora também o controle ótimo através do regulador linear quadrático.

Gomes, Silva e Neto (2003) desenvolve um controlador para seu LEVMAG utilizando o módulo *Real-Time Workshop* do programa MATLAB™ em um computador. É demonstrado que, com uma boa taxa de aquisição, o controlador digital apresenta uma grande flexibilidade em relação ao uso de circuitos analógicos.

Também utilizando a técnica de linearização em torno de um ponto de operação, Gomes e Stephan (2004) apresentam um LEVMAG modelado para operação com pequenas variações do sinal da corrente controlada. Os tipos de levitação magnética:

eletrodinâmica, supercondutora e eletromagnética são descritos. Os circuitos eletrônicos para o controle PD (proporcional derivativo), o ajuste dos termos do controlador e o circuito de potência também são apresentados. O resultado demonstra a não linearidade em um LEVMAG.

Em (COSTA, 2004), são aplicados diferentes modelos matemáticos e técnicas de controle moderno no estudo de uma suspensão eletromagnética de um veículo MAGLEV. O autor desenvolve três modelos dinâmicos do sistema em análise e dois controladores baseados em técnicas modernas (RLQ e  $H_2/H_\infty$ ), comparando as diferentes respostas do sistema em cada combinação. No final, verifica-se o melhor desempenho no controlador RLQ aplicado no modelo de corpo não rígido.

Demonstra-se em (LEMPEL; MICHEL; CARBALAJES, 2006) um LEVMAG e são desenvolvidas técnicas para seu controle através do módulo *Real-Time Workshop* do programa MATLAB<sup>TM</sup>. O sistema baseia-se em uma bobina que faz levitar uma esfera metálica com posição detectada por LEDs (Diodos Emissores de Luz — *Light Emitting Diodes*) infravermelhos. A função de transferência é obtida identificando-se o sistema real em diferentes valores de corrente elétrica e aproximando a curva a um polinômio. São projetados um controlador por linearização exata (com um bloco não linear), um linear (linearizado em torno de um ponto de operação<sup>1</sup>) e um discreto. Foram obtidos através do lugar das raízes controladores do tipo PID (proporcional integral derivativo) com a ação integral separada do restante do controlador para evitar o efeito conhecido como *wind-up*. Verificou-se que o objeto levitou em uma faixa de cerca de 6mm tanto com o controlador por linearização exata quanto com o discreto.

Costa (2009) projeta e constrói, para um motor de indução linear tubular, um mancal magnético ativo controlado por uma placa com dispositivo FPGA. Para a realimentação de corrente elétrica no sistema em malha fechada, é utilizado o sensor de corrente elétrica LTS-6 NP. A programação do controlador na placa de controle é feita no programa LabVIEW<sup>TM</sup>.

É desenvolvido um exemplo de LEVMAG em (MESSNER; TILBURY, 2011) para apresentar as ferramentas de controle no espaço de estados disponíveis no programa MATLAB<sup>TM</sup>. O modelo do sistema é estimado e linearizado para a construção de sua representação no espaço de estados. São utilizados comandos para verificar a controlabilidade do sistema obtido e dimensionar o seu controlador por alocação de

---

<sup>1</sup>Também presente em (GOMES; SILVA; NETO, 2003; GOMES; STEPHAN, 2004; CUTIN; MACHADO; MATTOS, 2001)

polos. É feito o procedimento para a inclusão da referência e efetuadas simulações demonstrando a trajetória e estabilização de todos os estados.

## 2.2 PROJETO DA PLANTA DE LEVMAG

Hurley e Wölfle (1997) fazem um estudo do dimensionamento ideal para a bobina de um LEVMAG de acordo com o peso do objeto a ser levantado. Este estudo possibilitou o aprofundamento na teoria que envolve a modelagem eletromagnética do sistema e uma maior eficiência no seu funcionamento, reduzindo perdas por efeito joule.

## 2.3 CIRCUITO DE ACIONAMENTO

Mohan, Undeland e Robins (1995) descrevem as topologias de reguladores chaveados no domínio da frequência, tanto em malha aberta como em malha fechada. Também apresentam o método para o projeto dos controladores em malha fechada e as formas de inserir um controle em cascata para a corrente elétrica dentro do laço de controle de tensão do regulador principal.

Em (AHMED, 2000), apresenta-se as diferentes topologias de reguladores chaveados e faz-se o desenvolvimento das equações relativas à modulação por largura de pulso e ondulação. Também é mostrada a diferença entre as operações em modo contínuo e descontínuo e o valor limite das constantes que levam o sistema a mudar seu modo de operação.

Em (HURLEY; HYNES; WÖLFLE, 2004), novamente o sistema de Hurley e Wölfle (1997) é usado e é proposta uma modelagem de um circuito de acionamento chaveado utilizando a técnica de PWM, que é não linear. Desenvolve-se um controlador analógico do tipo PD e estuda-se o circuito de acionamento PWM. O estudo demonstrou que o bloco PWM não linear pode ser aproximado a um bloco linear. Dessa forma, aumenta-se a eficiência no acionamento e a necessidade de dissipação de calor é reduzida.

Chiba *et al.* (2005) trata do desenvolvimento de sistemas de mancais eletromagnéticos, sua construção, modelagem e controle. São expostas as diferentes topologias de circuito de acionamento lineares e chaveados comumente utilizadas neste tipo de sistema, suas vantagens e desvantagens, além da forma de utilização.

Diferentes topologias de circuitos chaveados podem ser utilizadas para efetuar o



controle do eletroímã, em (BANERJEE; BHADURI; PRASAD, 2008) tais topologias são apresentadas e uma análise relaciona as vantagens e desvantagens do uso de pontes H simétricas e assimétricas em relação ao acionamento utilizando apenas uma chave e um circuito RC (resistor capacitor) como amortecedor. Os resultados demonstram que o acionamento através de apenas uma chave só é vantajoso em sistemas de baixo custo e que necessita de baixa emissão de interferência eletromagnética.

De forma a subsidiar a parametrização de projetos na área de levitação magnética, Rech e Campo (2011b) elaboram o algoritmo gráfico para um controlador PI (proporcional integral) de corrente elétrica para um eletroímã acionado de forma chaveada. O algoritmo é simulado e depois embarcado em uma placa microcontrolada modelo EK-LM3S8962 da Texas Instruments. Os resultados da simulação e do ensaio real foram praticamente os mesmos, excetuando o ruído na leitura do sensor de corrente elétrica. Os requisitos estipulados para o projeto do controlador PI foram alcançados tanto na simulação quanto nos ensaios na região em torno do ponto de operação do sistema e abaixo dela, acima verificou-se a ocorrência de um maior tempo para estabilização.

## 2.4 SIMULAÇÃO DE LEVMAGS

Um estudo feito em (RECH, 2010) demonstra através de simulações no programa LabVIEW™ os efeitos da frequência de um regulador chaveado no controle do sistema. Foi elaborado um modelo de LEVMAG não linear que serve como referência para os testes. Através deste sistema, foram elaborados os controladores PD e PI para uma malha em cascata e levantados os efeitos da frequência do acionamento no controle. De forma a subsidiar futuros estudos, são apresentadas algumas características como a frequência mínima para operação contínua do regulador e a relação entre a ondulação da corrente elétrica, frequência e o ciclo de trabalho do PWM.

Rech e Campo (2011a) obtiveram os modelos dinâmicos de um LEVMAG e elaboraram blocos não lineares para sua simulação no programa LabVIEW™. O modelo foi linearizado e simulado nas mesmas condições do não linear. As respostas demonstraram a estabilização do sistema linearizado e a desestabilização do sistema não linear. Verificou-se que com a inclusão das características não lineares, a simulação representou de forma mais aproximada a realidade, permitindo prever problemas antes de sua efetiva implementação física.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

O sistema em malha fechada é composto pelo LEVMAG, circuito de acionamento e placa de controle. Tanto o LEVMAG quanto o circuito de acionamento foram construídos para atender os requisitos propostos no trabalho. A placa de controle apresenta os periféricos necessários para o fechamento da malha. Junto à placa de controle estão acoplados os sensores de corrente elétrica e posição, ambos de efeito Hall.

##### 3.1.1 A planta LEVMAG

Construiu-se um LEVMAG com 1 grau de liberdade (GDL) na vertical para a realização dos ensaios práticos. Ele é composto de 3 partes básicas: eletroímã, bases e objeto levitado. A figura 1 apresenta uma foto da planta e no apêndice A sua estrutura e dimensões são detalhados.

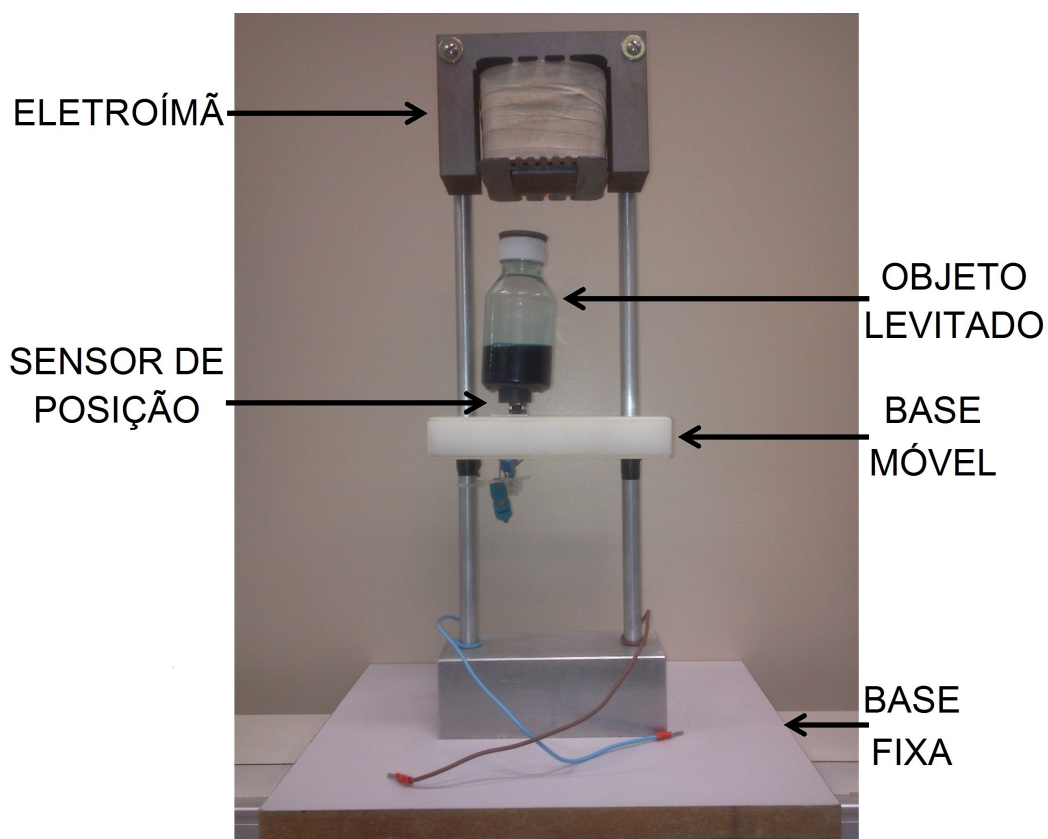


Figura 1: Foto do LEVMAG.

### 3.1.2 O circuito eletrônico de acionamento chaveado

Para o acionamento da planta optou-se pelo uso de um circuito chaveado. Os motivos desta escolha são a eficiência desta técnica de acionamento, sua presença e facilidade de uso em sistemas embarcados e a possibilidade de aplicar em um LEVMAG técnicas de controle eletrônico já consagradas (MOHAN; UNDELAND; ROBINS, 1995; AHMED, 2000). A figura 2 apresenta o diagrama do circuito de acionamento.

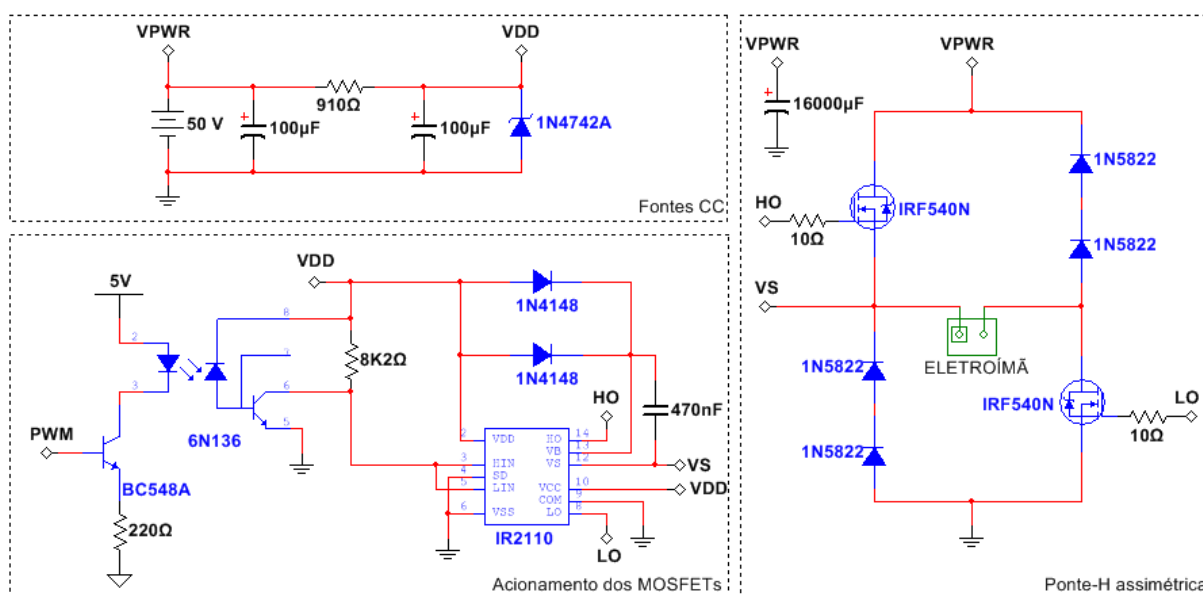


Figura 2: Circuito de acionamento chaveado.

A etapa de potência é realizada por 2 transistores MOSFET IRF540N em uma configuração conhecida como ponte-H assimétrica (CHIBA *et al.*, 2005; BANERJEE; BHADURI; PRASAD, 2008) que possibilita a aplicação de tensões positivas e negativas no eletroímã com apenas um sentido de corrente elétrica. Os diodos Schottky 1N5822 formam um caminho para o retorno da corrente elétrica no ciclo desligado do PWM (modulação por largura de pulso — *pulse-width modulation*). Para absorver esta corrente de retorno com uma variação de tensão abaixo de  $100mV$ , foi utilizado um capacitor eletrolítico de  $16000\mu F \times 63V$ .

O circuito integrado IR2110 ativa os transistores, garantindo a aplicação da tensão de porta necessária para que estes — tanto o transistor superior quanto o inferior — operem apenas nas regiões de corte e saturação, através de uma técnica conhecida como *bootstrap*, na qual a tensão de alimentação é dobrada e armazenada em um capacitor para ativação do transistor superior. Devido à esta técnica, para manter a carga do capacitor, o ciclo de trabalho do PWM aplicado deve estar entre 2% e 98%.

O circuito é isolado galvanicamente da placa de controle através do acoplador óptico 6N136, com alta velocidade de chaveamento.

Uma fonte DC ajustada em  $50V$  e capacidade de  $3A$  alimenta a etapa de potência. A partir desta fonte, é obtida uma tensão de  $12V$  com um diodo regulador zener para alimentação do IR2110 e da saída do 6N136. Para a ligação da entrada do 6N136 a placa de controle, é usada a alimentação de  $5V$  da própria placa de controle.

### 3.1.3 Placa de controle

O controle do LEVMAG é efetuado por uma placa EK-LM3S8962 (figura 3) da Texas Instruments. Entre os recursos utilizados no projeto, esta placa possui:

- Um microcontrolador ARM de 32-bit operando com clock de 50MHz;
- Um conversor AD (analogico digital) de 10-bit, amostragem de até  $500kS/s$  e 4 canais multiplexados;
- Seis geradores PWM de 10-bit;
- Interface com o usuários através de botões, LEDs (diodos Emissores de Luz — *light emmiting diodes*) e um display gráfico tipo OLED;
- Acesso via ilhas aos pinos de entrada, saída e alimentações.

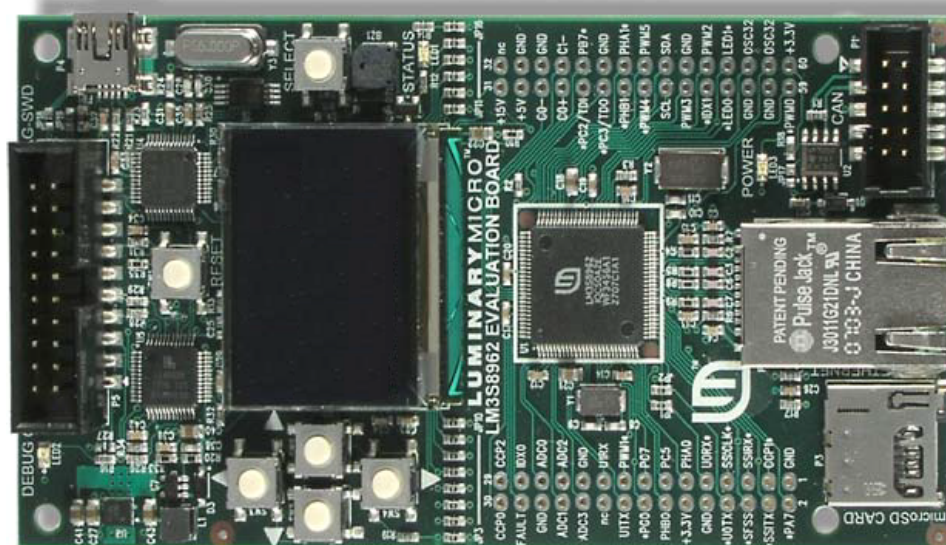


Figura 3: Placa EK-LM3S8962 utilizada no controle.

O programa LabVIEW™ através do módulo *LabVIEW Embedded for ARM* 2011 gera o código necessário para a programação da placa através de uma linguagem gráfica. Além das vantagens da programação gráfica apresentadas posteriormente, o código elaborado em um módulo do LabVIEW™ pode ser usado em outro, vantagem esta que será aproveitada no decorrer do trabalho.

### 3.1.3.1 Sensor de corrente elétrica

Dentre as opções para medição de corrente elétrica no eletroímã do LEVMAG, foi escolhido o sensor de efeito hall de malha fechada LTS 6-NP (figura 4) da LEM, utilizado por Costa (2009), capaz de medir correntes elétricas contínuas e alternadas até a máxima frequência de chaveamento a ser gerada pela placa (cerca de  $20kHz$ ).



Figura 4: Sensor de corrente por efeito hall LTS 6-NP (COSTA, 2009).

A ligação feita no primário do sensor configura sua  $I_{PN}$  (corrente nominal) como 2A. O gráfico da figura 5 representa a relação ideal tensão x corrente do sensor.

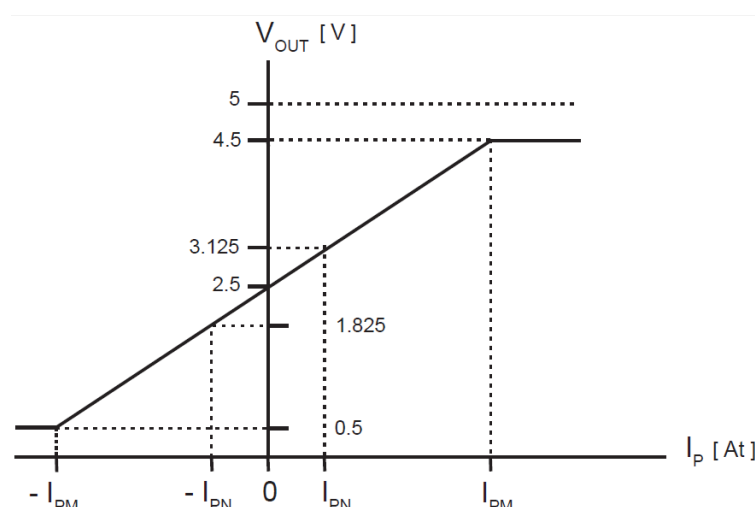


Figura 5: Gráfico de saída do LTS 6-NP (COSTA, 2009).

### 3.1.3.2 Sensor de posição

A posição do objeto levitado é medida através do sensor de efeito hall linear SS495A da Honeywell, colocado sobre a base móvel da planta do LEVMAG. Sob o objeto está um ímã de ferrite cujo campo magnético é detectado pelo sensor e assim estima-se a distância.

Para relacionar sua distância à tensão fornecida pelo sensor de posição, o objeto foi fixado sob o núcleo do eletroímã na região da levitação. Após isso, a base móvel da planta foi deslocada a diferentes posições e em cada uma foi medida a tensão na saída do sensor.

As medições relacionando a distância do objeto ao sensor formaram o gráfico da figura 6.

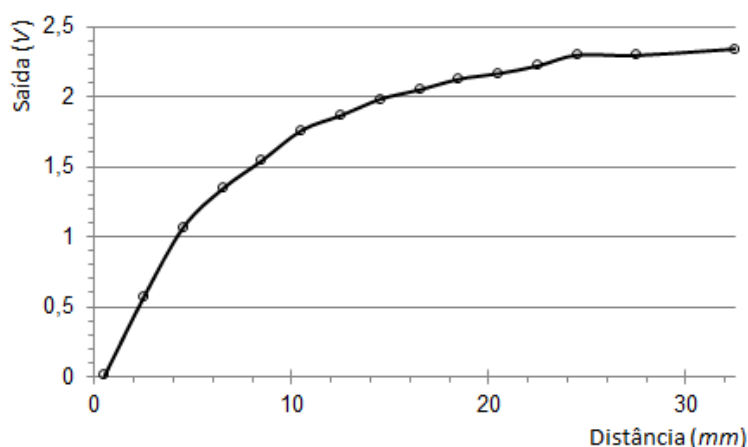


Figura 6: Gráfico da distância do objeto para o sensor x tensão.

### 3.1.4 Ferramenta de simulação

Para efetuar o teste do controlador desenvolvido com base nas características da planta, realizou-se uma série de simulações computacionais utilizando o programa LabVIEW™ 2011 SP1 da empresa National Instruments.

O LabVIEW™ e seu módulo *Control Design and Simulation* permitem a programação de forma gráfica e simulação de sistemas de controle, respectivamente. A simulação gráfica possibilita a montagem e adição de várias características do sistema de forma intuitiva através de uma série de blocos pré-definidos com funções de controle lineares e não lineares.

O algoritmo de controle elaborado opera tanto no ambiente de simulação (*Control Design and Simulation*) quanto na placa de controle (*LabVIEW Embedded for ARM*). Este mesmo algoritmo e as demais características de funcionamento da placa de controle são colocados no ambiente de simulação para representar uma resposta do sistema com fidelidade.

### 3.1.5 Placa de aquisição de sinais

Para realizar a documentação dos ensaios no LEVMAG, utilizou-se a placa de aquisição de sinais USB NI myDAQ da National Instruments. Seus principais recursos são:

- Oito entradas/saídas digitais configuráveis;
- Dois conversores AD diferenciais de 16-bit com taxa de amostragem de até  $200kS/s$ ;
- Dois conversores DA de 16-bit com taxa de atualização de até  $200kS/s$ ;
- Um contador de 32-bit com clock de até  $100MHz$ ;
- Um multímetro digital controlado pelo computador.

## 3.2 MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho resultou na elaboração de projetos intermediários para subsidiar o projeto principal. Inicialmente o foco foi a modelagem de uma planta LEVMAG e dimensionamento de um controlador por realimentação de estados com imposição de polos (RECH; CAMPO, 2011a). Após, foi elaborado um algoritmo digital para controle de corrente elétrica na placa LM3S8962 utilizando o mesmo sensor apresentado na seção anterior (RECH; CAMPO, 2011b). Tais projetos possibilitaram a elaboração de trabalhos que foram apresentados, respectivamente, nos congressos DINCON e CONCISTEC do ano de 2011.

Verificou-se em (RECH; CAMPO, 2011a) diversos fatores que influenciam a simulação de um sistema, assim como a interferência na resposta devido a presença de não linearidades no modelo. Também foi possível estudar um controlador por realimentação de estados através da imposição de polos, cuja estrutura é muito similar ao RLQ utilizado neste trabalho.

Em (RECH; CAMPO, 2011b), foram explorados os recursos físicos deste projeto através do desenvolvimento de um simples controlador PI para corrente elétrica, isto possibilitou averiguar as limitações da placa de controle e as diversas características de sua programação. Apesar do controlador desenvolvido não ser utilizado diretamente neste trabalho, a função de controle de corrente elétrica desenvolvida auxiliou nos ensaios de parametrização do LEVMAG.

Assim, de maneira geral, os projetos anteriores permitiram estudar os materiais e métodos utilizados neste trabalho, como o programa LabVIEW™ e seus diversos módulos, a placa de controle, simulação de sistemas não lineares, técnicas de controle no espaço de estados e controladores digitais embarcados.



## 4 MODELAGEM DO LEVMAG E PROJETO DO CONTROLADOR

Neste capítulo é apresentada a elaboração da função de transferência no espaço de estados do LEVMAG, levantamento de seus parâmetros e dimensionamento do regulador linear quadrático (RLQ). Serão abordados os modelos não lineares parciais da planta (Mecânico e eletromagnético) usados para a elaboração do simulador no próximo capítulo assim como o modelo linearizado, utilizado no projeto do controlador.

### 4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Um LEVMAG que relaciona a posição de um objeto levitado com a tensão elétrica aplicada é não linear quando são estudadas a relação entre a força magnética, a corrente elétrica e a derivada da indutância do eletroímã com a posição do objeto levitado (RECH; CAMPO, 2011b; HURLEY; WÖLFLE, 1997).

A planta é analisada em dois modelos interdependentes representando suas características elétricas e mecânicas.

#### 4.1.1 *Modelo matemático do sistema elétrico*

O modelo do sistema elétrico relaciona a tensão no eletroímã à corrente resultante, por isso depende diretamente do circuito de acionamento (figura 2). Para obter o modelo assumem-se algumas condições de linearidade, dentre elas (HURLEY; HYNES; WÖLFLE, 2004; RECH; CAMPO, 2011a; AHMED, 2000):

- As chaves eletrônicas (diodos e transistores) são consideradas ideais;
- A fonte de alimentação possui baixa impedância de saída e é capaz de absorver a corrente que retorna do circuito sem variações significativas de tensão;
- O circuito chaveado irá operar apenas em modo contínuo, evitando a desmagnetização do núcleo;
- O eletroímã será analisado como um circuito RL (resistor-indutor) série.

Ao aplicar um sinal do tipo PWM, durante o ciclo positivo (tempo no qual os transistores estão ligados) é aplicada a tensão positiva  $v(t)$  no eletroímã, fazendo a corrente

$i(t)$  crescer. Durante o ciclo negativo (tempo no qual os transistores estão desligados) o eletroímã se desmagnetiza, gerando uma força contra eletromotriz de amplitude aproximadamente igual à tensão de alimentação, que polariza os diodos, fazendo a corrente  $i(t)$  diminuir, circulando de volta à fonte de alimentação (CHIBA *et al.*, 2005).

Pela análise é possível observar na equação 1 que, para as condições assumidas, o modelo recai apenas para a análise do circuito RL do eletroímã, pois o chaveamento por PWM pode ser considerado como uma entrada de um sinal bipolar (+VPWR e -VPWR) no sistema. É preciso ressaltar neste momento que a indutância  $L(h)$  do eletroímã não é constante e dependerá da posição do objeto, como será observado no modelo mecânico.

$$R \cdot i(t) + L(h) \cdot \frac{di(t)}{dt} = v(t) \quad (1)$$

#### 4.1.2 Modelo matemático do sistema mecânico

A função de transferência mecânica de um LEVMAG associa as forças atuantes sobre o objeto de massa  $m$  em levitação na posição  $h(t)$ , conforme observado na figura 7 e na equação 2 (GOMES; STEPHAN, 2004).

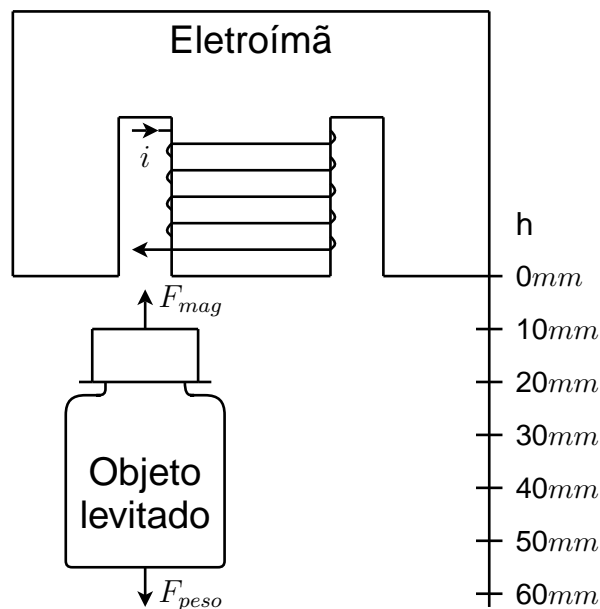


Figura 7: Representação do LEVMAG.

$$F_{peso} - |F_{mag}(i, h)| = m \cdot \frac{d^2h(t)}{dt^2} \quad (2)$$

O módulo da força magnética  $F_{mag}$  — detalhada na equação 3 — depende da corrente obtida na modelagem elétrica. Sua relação é não linear por ser proporcional ao quadrado da corrente elétrica e à derivada da indutância com a posição (HURLEY; WÖLFLE, 1997).

$$|F_{mag}(i, h)| = \frac{i^2(t)}{2} \cdot \frac{dL(h)}{dh} \quad (3)$$

A função da indutância com a posição depende das características construtivas da planta, tais como o formato e o material magnético que constituem o objeto levitado e o núcleo do eletroímã, além do número de espiras de fio no seu enrolamento. Devido a isso, diferentes representações para esta função aparecem nas referências, algumas delas obtidas através de verificações práticas em um sistema real com a medição de uma série de pontos e sua aproximação para uma função exponencial, descrita na equação 4 (HURLEY; WÖLFLE, 1997).

$$|F_{mag}(i, h)| = \frac{i^2(t)}{2} \cdot \frac{d}{dh} \cdot \left( L_1 + L_0 \cdot e^{-\frac{h(t)}{a}} \right) = \frac{i^2(t)}{2 \cdot a} \cdot L_0 \cdot e^{-\frac{h(t)}{a}} \quad (4)$$

A constante  $a$  está relacionada às características construtivas do LEVMAG. A indutância é representada por uma parcela fixa  $L_1$  e uma parcela incremental  $L_0$ .  $L_1$  equivale a uma indutância mínima e  $L_1 + L_0$  a indutância máxima, obtidas em função da distância do objeto levitado.

#### 4.1.2.1 Linearização em torno de pontos de operação

Para representar o sistema no espaço de estados, será feita a linearização da  $F_{mag}$  em torno dos pontos de operação  $I$  e  $H$  (equação 5) (MESSNER; TILBURY, 2011).

$$F_{peso} - (|F_{mag}(I, H)| + k_i \cdot \Delta i(t) + k_h \cdot \Delta h(t)) = m \cdot \frac{d^2 \Delta h(t)}{dt^2} \quad (5)$$

Onde  $\Delta i$  e  $\Delta h$  são pequenas variações em torno dos pontos de linearização<sup>1</sup> e  $k_h$  e  $k_i$  são as derivadas parciais do módulo da força magnética com a posição e com a corrente elétrica nos pontos de operação, respectivamente (equações 6 e 7).

<sup>1</sup>Assumem-se como pequenas variações  $\Delta i = i(t) - I$  e  $\Delta h = h(t) - H$

$$k_i = \left. \frac{\partial |F_{mag}|}{\partial i} \right|_{I,H} = \frac{I}{a} \cdot L_0 \cdot e^{-\frac{H}{a}} \quad (6)$$

$$k_h = \left. \frac{\partial |F_{mag}|}{\partial h} \right|_{I,H} = -\frac{I^2}{2 \cdot a^2} \cdot L_0 \cdot e^{-\frac{H}{a}} \quad (7)$$

Finalmente, no ponto da linearização, a  $F_{peso}$  e a  $|F_{mag}(I, H)|$  na equação 5 se anulam, resultando na equação 8 que considera apenas pequenas variações em torno do ponto de operação.

$$k_i \cdot \Delta i(t) + k_h \cdot \Delta h(t) = -m \cdot \frac{d^2 \Delta h(t)}{dt^2} \quad (8)$$

Quanto à linearização da equação elétrica do sistema, basta considerar os pontos de operação e suas respectivas variações. Semelhante à equação 8, os termos referentes aos pontos de operação  $V$  e  $I \cdot R$  se anulam, resultando em uma análise de pequenos sinais na equação 9. A variação da indutância em torno do ponto de operação será desprezada, de forma a ser constante e aproximadamente  $L(H) = L$ .

$$R \cdot (I + \Delta i(t)) + L(H) \cdot \frac{d(I + \Delta i(t))}{dt} = V + \Delta v(t) \rightarrow R \cdot \Delta i(t) + L \cdot \frac{d\Delta i(t)}{dt} = \Delta v(t) \quad (9)$$

#### 4.1.3 Modelo matemático completo no espaço de estados

Para a representação no espaço de estados, as equações 8 e 9 são reescritas isolando-se os termos de maior derivada (equações 10 e 11).

$$\frac{d\Delta i(t)}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot \Delta i(t) + \frac{1}{L} \cdot \Delta v(t) \quad (10)$$

$$\frac{d^2 \Delta h(t)}{dt^2} = -\frac{k_i}{m} \cdot \Delta i(t) - \frac{k_h}{m} \cdot \Delta h(t) \quad (11)$$

Utilizando a representação no espaço de estados:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (12)$$

E adotando como estados:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta h(t) \\ \frac{d\Delta h(t)}{dt} \\ \Delta i(t) \end{bmatrix} \quad ; \quad \dot{x}_1 = x_2 \quad ; \quad \dot{x}_2 = \frac{d^2\Delta h(t)}{dt^2} \quad ; \quad u = \Delta v(t) \quad ; \quad y = x_1$$

As matrizes que representam o sistema do LEVMAG são as da equação 13.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_h}{m} & 0 & -\frac{k_i}{m} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot u \\ y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

#### 4.2 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DA PLANTA

As equações de estado do LEVMAG dependem de dois conjuntos de parâmetros, o primeiro se refere às características físicas da planta e os seus valores estão na tabela 1, o segundo se refere à linearização e é apresentado mais a frente.

Tabela 1: Características físicas do LEVMAG.

Parâmetro	Valor
$R$	$16\Omega$
$m$	$0,086kg$
$L_0$	$68,8mH$
$L_1$	$536,5mH$
$a$	$4,24mm$

Os valores da tabela 1 foram obtidos através de medições com os instrumentos apropriados, ou seja, multímetro, balança e medidor RLC. Neste último, a indutância  $L_1$  (parcela fixa) foi obtida com o núcleo do eletroímã em aberto e a indutância  $L_1 + L_0$  — sendo  $L_0$  a indutância incremental — obtida com o núcleo fechado pelo objeto levitado. Entre estes dois extremos de indutância, foram realizadas medições com o objeto a ser levitado a diferentes distâncias do núcleo do eletroímã, resultando no gráfico de medições da figura 8.

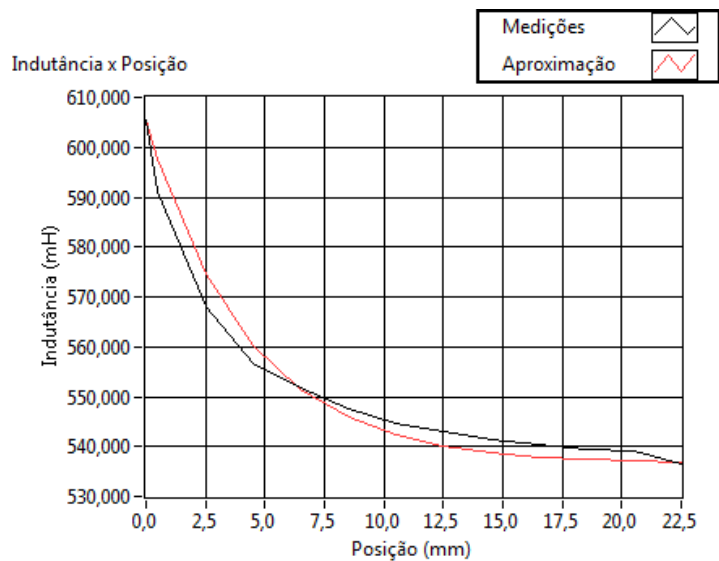


Figura 8: Gráfico comparativo da  $L(h)$  medido e estimado.

Para aproximar o gráfico conforme com a representação de  $L(h)$  feita na equação 4, foi necessário encontrar o valor de  $a$  que melhor relaciona os valores calculados com os medidos. Isto foi feito iterativamente no programa LabVIEW™ variando-se o valor de  $a$  na representação de  $L(h)$ . O gráfico estimado também está na figura 8.

Na tabela 2 estão os parâmetros relacionados à linearização do LEVMAG.

Tabela 2: Parâmetros de linearização do LEVMAG.

Parâmetro	Valor
$H$	8,48mm
$I$	0,73A
$V$	11,68V
$L$	545,8mH
$k_h$	-138
$k_i$	1,6

O valor de  $H$  foi estabelecido como  $2 \cdot a$  para otimização do fluxo magnético do núcleo, conforme as observações de Hurley e Wölfle (1997).

A corrente  $I$  foi obtida experimentalmente com o controlador de (RECH; CAMPO, 2011b). O objeto foi posicionado na posição  $H$  e variou-se progressivamente a corrente até o objeto ser atraído ao núcleo. O valor de corrente na atração foi considerada como o ponto de operação  $I$ . Com este valor, obteve-se  $V = I \cdot R$ .

A indutância  $L$  é o valor no ponto de linearização  $H$ , calculado a partir da equação 14, extraída da equação 4.

$$L = L_1 + L_0 \cdot e^{-\frac{h}{a}} = 536,5m + 68,8m \cdot e^{-2} = 545,8mH \quad (14)$$

Finalmente, os valores das constantes de linearização  $k_h$  e  $k_i$  foram calculados nas equações 6 e 7.

#### 4.3 PROJETO DO RLQ

Os polos (autovalores) da equação de estados parametrizada do LEVMAG (equação 15) são  $-29,31$ ,  $-40,06$  e  $40,06$ , indicativo de que o sistema é instável em malha aberta (figura 9). Através da mesma equação de estados, verifica-se que o sistema é controlável e portanto serão dimensionados ganhos de realimentação para um RLQ usando o módulo *Control Design and Simulation* do programa LabVIEW™. Será necessário também estimar o estado não medido fisicamente no LEVMAG, pois o regulador necessita da realimentação completa para operar. Finalmente, será incluída no sistema a entrada de referência para que o LEVMAG possa acompanhar os sinais aplicados.

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{138}{0,086} & 0 & -\frac{1,6}{0,086} \\ 0 & 0 & -\frac{16}{545,8m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{545,8m} \end{bmatrix} \cdot v(t) \\ y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (15)$$

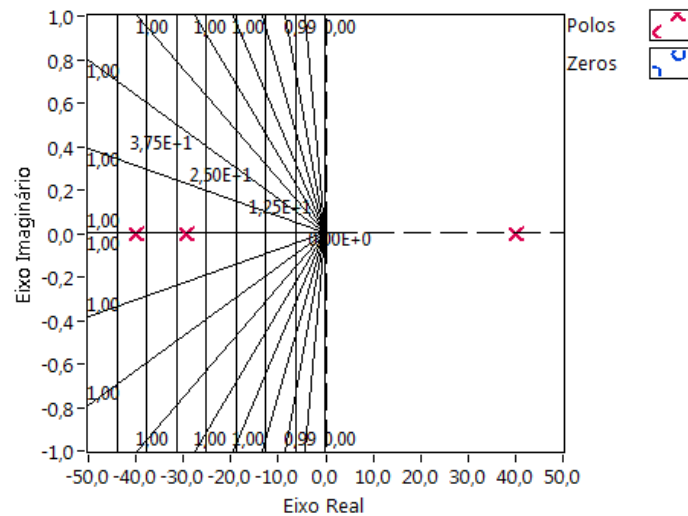


Figura 9: Mapa de polos do LEVMAG em malha aberta

#### 4.3.1 Cálculo dos ganhos de realimentação do RLQ

O RLQ é um controlador que utiliza a teoria de controle ótimo para estabilizar um sistema, ou seja, seu projeto visa minimizar a variação de sinais para que este possa se manter dentro dos parâmetros do projeto com o mínimo gasto de energia. O RLQ recebe este nome por utilizar a variância dos sinais para estabelecer o mínimo custo de funcionamento.

Para operar, o RLQ necessita da realimentação de todos os estados do sistema, aos quais é aplicado um ganho de realimentação (equação 16). Sem prejuízo para o projeto do controlador, a entrada de referência de cada estado pode ser desprezada e incluída após a construção do controlador (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2002; OGATA, 2003; LEONARDI; MAYA, 2011), isto porque o projeto é realizado com base no sistema linearizado.

$$\mathbf{u} = \mathbf{K} (\mathbf{r} - \mathbf{x}) \rightarrow \mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (16)$$

O controlador será calculado com base no LEVMAG linearizado no espaço de estados. Seu projeto utiliza as matrizes de estado do sistema ( $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$ ) e os parâmetros de operação ótimos são desenvolvidos através das matrizes de penalização  $\mathbf{Q}$  (para os estados) e  $\mathbf{R}$  (para as entradas). As matrizes  $\mathbf{Q}$  e  $\mathbf{R}$  são quadradas e positivas semi-definidas. A dimensão de  $\mathbf{Q}$  é o número de estados do sistema e a de  $\mathbf{R}$  o número de entradas.



Há vários critérios para estabelecer os valores das matrizes  $Q$  e  $R$ , neste trabalho será utilizado o mais comum, no qual as matrizes são diagonais e os valores são variados iterativamente até as características do projeto serem atingidas. Para estabelecer os valores das diagonais, será aplicada a regra de Bryson (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2002), na qual cada elemento diagonal das matrizes é estabelecido pela equação 17, onde  $\max x_i^2$  e  $\max u_j^2$  são os quadrados dos máximos valores de projeto para cada estado e entrada do sistema, respectivamente.

$$Q_{ii} = \frac{1}{\max x_i^2} \quad i \in \{1, 2, \dots\}$$

$$R_{jj} = \frac{1}{\max u_j^2} \quad j \in \{1, 2, \dots\}$$
(17)

Ainda assim, a regra de Bryson apenas define um ponto de partida para o projeto do controlador, pois estabelece um conjunto de pesos para equiparar a variação de cada estado. Como alguns dos estados podem descrever valores máximos diferentes apenas devido aos critérios do projeto e não a limitações físicas, pode-se agir retroativamente de forma iterativa até se alcançar as características pré-estabelecidas. Nesta metodologia de projeto, os valores de  $\max x_i$  e  $\max u_j$ , que não foram definidos pelas características físicas do sistema, são variados iterativamente até atingir os critérios do projeto.

Assim, formulou-se no LabVIEW<sup>TM</sup> o código iterativo necessário para o dimensionamento do RLQ. Sabendo que o sistema é controlável, o bloco de função *Linear Quadratic Regulator* do módulo *Control Design and Simulation* fornece a matriz de ganhos do sistema com base nas matrizes  $A$ ,  $B$ ,  $Q$  e  $R$ . Como o regulador será implementado de forma digital, foi estabelecido o período de amostragem de  $500\mu s$  (operação em  $2kHz$ ) para que o bloco de função retorne os ganhos com base no sistema discretizado utilizando um segurador de ordem zero, neste caso, o cálculo realizado pelo bloco é equivalente ao comando *lqrd* do programa MATLAB<sup>TM</sup>. No mesmo código são gerados continuamente:

- A equação de estados em malha fechada;
- O mapa de polos e zeros de malha aberta e fechada;
- As trajetórias dos estados.

Como critérios de projeto, o RLQ será dimensionado para um sobressinal de 0% (para evitar a saída do ponto de operação) e resposta no menor tempo possível sem ultrapassar os valores máximos de  $x_3$  e  $u$  (parametrizados abaixo do limite do circuito de acionamento). Foram estabelecidos os parâmetros iniciais conforme a tabela 3. As variáveis  $\max x_1$  e  $\max x_2$  (as quais não estão pré-definidas) serão variadas até o alcance dos critérios estabelecidos, logo seus valores iniciais são apenas para o início do processo iterativo.

Tabela 3: Dimensionamento do RLQ.

Parâmetro	Valor inicial	Valor final
$\max \Delta v(t) = \max u$	35V	35V
$\max \Delta h(t) = \max x_1$	5mm	500 $\mu$ m
$\max \frac{d\Delta h(t)}{dt} = \max x_2$	5mm/s	53mm/s
$\max \Delta i(t) = \max x_3$	1,7A	1,7A

Para avaliação da resposta transitória do LEVMAG linearizado, a condição inicial do estado  $x_1$  será ajustada<sup>2</sup> em 5mm. Os demais estados terão condição inicial nula.

Ao iniciar o processo de iteração, verificou-se no mapa do sistema em malha fechada os polos da figura 10. Nesta condição a estabilização leva cerca de 6s e não há sobressinal (figura 11).

Em um primeiro momento, procurou-se tornar o sistema predominantemente de 2ª ordem, afastando o polo real da origem. O valor de  $\max x_1$  foi reduzido e o de  $\max x_2$  foi aumentado acompanhando-se a posição dos polos e a trajetória dos estados no LabVIEW™. Nesta tentativa, o valor de  $x_3$  ultrapassa o limite estabelecido e surge um pequeno sobressinal no estado  $x_1$  (figuras 12 e 13), demonstrando não ser um bom caminho para a construção deste controlador.

Em uma nova iteração, aumentando gradativamente  $\max x_1$  e reduzindo  $\max x_2$  (em relação ao processo anterior), foram alcançados os polos de malha fechada  $-99,42$  e  $-99,37 \pm 112,1i$  (figura 14), nos quais o sistema atende aos critérios do projeto. Nesta região em que as partes reais dos polos são próximas, o LEVMAG estabiliza em aproximadamente 50ms, sem sobressinal e sem ultrapassar o limite de  $x_3$  estabelecido (figura 15). Os valores máximos finais obtidos também são apresentados na tabela 3.

<sup>2</sup>O ajuste do valor inicial do estado equivale a aplicação de um sinal tipo impulso.

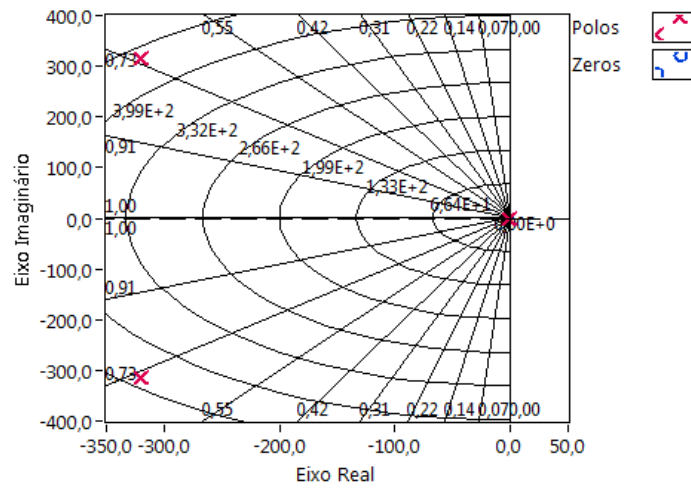


Figura 10: Mapa de polos com os parâmetros máximos iniciais.

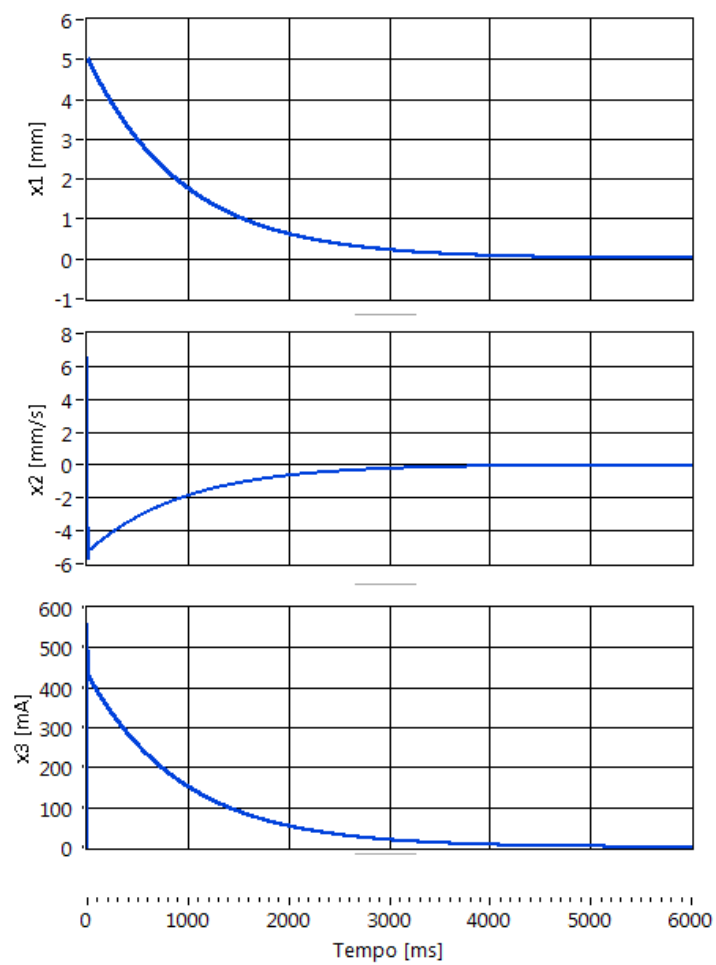


Figura 11: Trajetória dos estados com os parâmetros máximos iniciais.

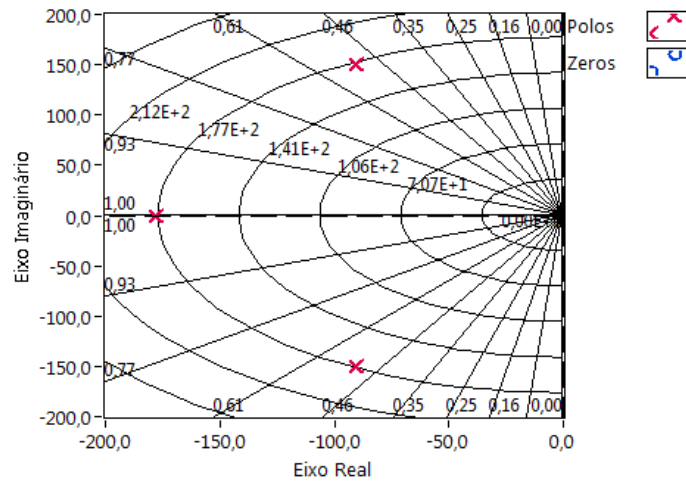


Figura 12: Mapa de polos na tentativa de impor dois polos dominantes.

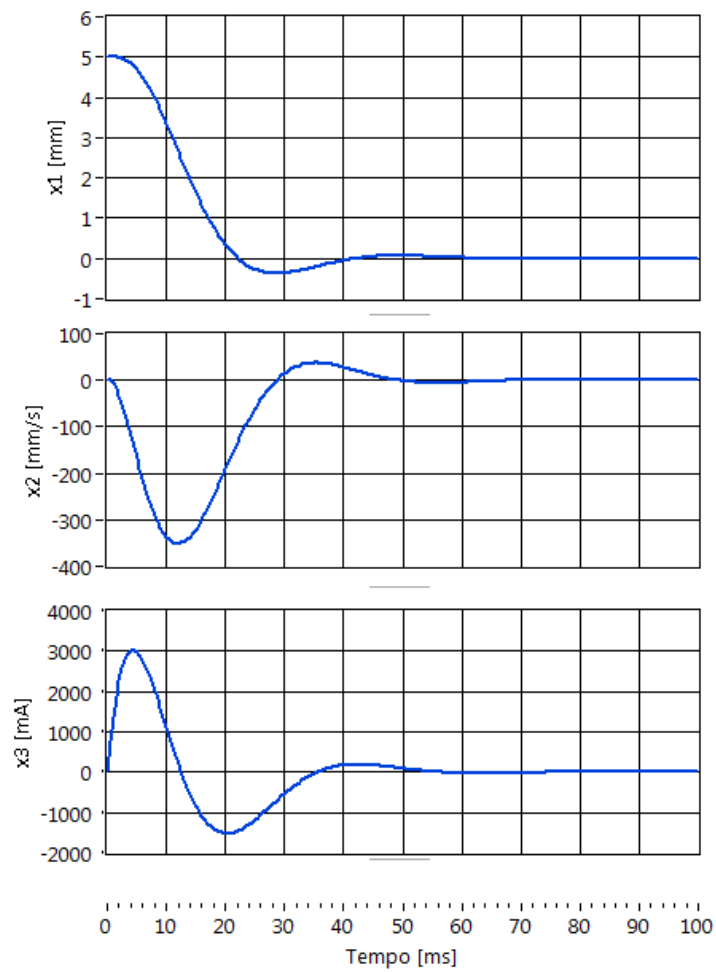


Figura 13: Trajetória dos estados na tentativa de impor dois polos dominantes.

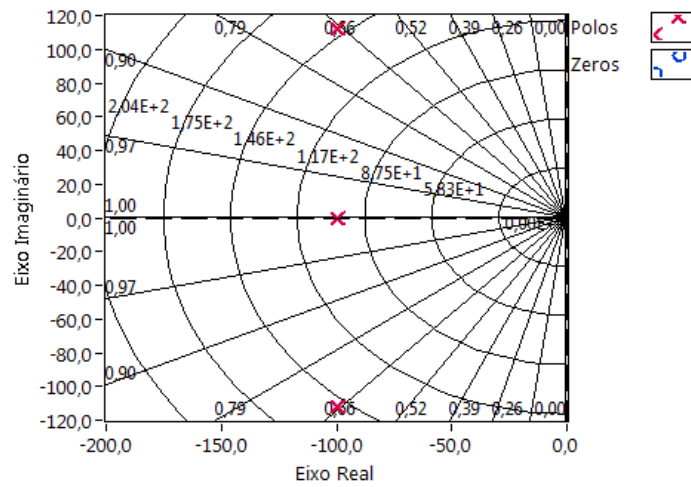


Figura 14: Mapa de polos com os parâmetros máximos finais.

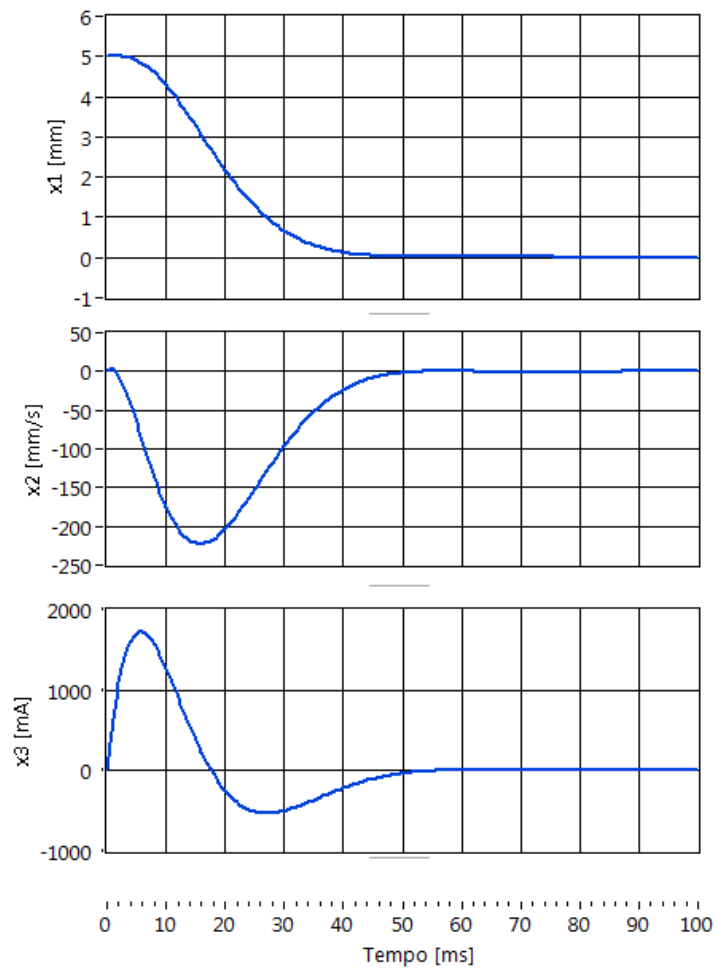


Figura 15: Trajetória dos estados com os parâmetros máximos finais.

A demonstração da aplicação da regra de Bryson para as matrizes  $\mathbf{Q}$  e  $\mathbf{R}$  é feita na equação 18 e a matriz de ganhos de realimentação, calculada pelo bloco *Linear Quadratic Regulator* do LabVIEW™, é a da equação 19.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(500 \cdot 10^{-6})^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(53 \cdot 10^{-3})^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1,7)^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \cdot 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 356 & 0 \\ 0 & 0 & 346,02 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{R} = \left[ \frac{1}{(35)^2} \right] = [816,33 \cdot 10^{-6}]$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{x_1} & K_{x_2} & K_{x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -79337,5 & -1282,63 & 146,74 \end{bmatrix} \quad (19)$$

#### 4.3.2 Estimativa do estado não medido

Conforme visto na seção anterior, o RLQ precisa da realimentação de todos os estados do sistema para efetuar o controle. Na figura 16 temos um diagrama com o LEVMAG, os pontos de operação da linearização e os ganhos de realimentação.

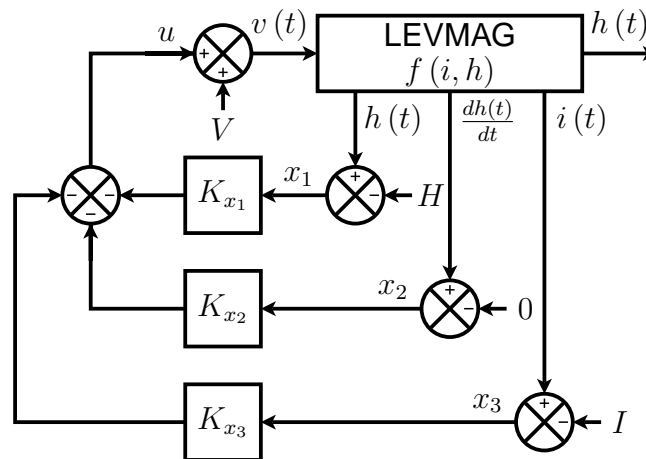


Figura 16: Diagrama de blocos do LEVMAG em malha fechada

Na prática, o LEVMAG utilizado possui apenas um sensor para a posição do objeto ( $h(t)$ ) e um sensor para a corrente elétrica do eletroímã ( $i(t)$ ), assim o estado relativo à velocidade ( $x_2$ ) deverá ser estimado no algoritmo de controle para uso no RLQ.

Em um primeiro momento, procurou-se obter a estimativa da velocidade do objeto

através da derivada da posição, entretanto os resultados não foram satisfatórios já que devido à quantização do conversor AD na placa de controle, o sinal apresentou pulsos e não ficou próximo ao real.

Uma segunda aproximação utilizou a equação mecânica linearizada obtida no LEVMAG (equação 20) para calcular a aceleração do objeto ( $\ddot{x}_2$ ), a qual consiste apenas na multiplicação dos estados medidos por valores constantes.

$$\frac{d^2 \Delta h(t)}{dt^2} = -\frac{k_i}{m} \cdot \Delta i(t) - \frac{k_h}{m} \cdot \Delta h(t) \rightarrow \ddot{x}_2 = -\frac{k_i}{m} \cdot x_3 - \frac{k_h}{m} \cdot x_2 \quad (20)$$

Com a aceleração, elaborou-se um algoritmo de integração para se obter a velocidade. Também foi adicionado a este um filtro passa-altas discreto, conforme proposto por Costa (2004), para atenuar a deriva do sinal da velocidade estimada em relação à real<sup>3</sup>. Seguem a equação do integrador com filtro passa-altas resultante, discretizada pela aproximação de Tustin, com frequência de corte  $w_c$  (em  $rad/s$ ) e período de amostragem  $T$  (equação 21) e sua respectiva equação de diferenças (equação 22).

$$\frac{x_2(z)}{\dot{x}_2(z)} = \frac{T(z+1)}{(2+T \cdot w_c)z - (2-T \cdot w_c)} \quad (21)$$

$$\left(\frac{2}{T} + w_c\right) \cdot x_2(k) = \left(\frac{2}{T} - w_c\right) \cdot x_2(k-1) + \dot{x}_2(k) + \dot{x}_2(k-1) \quad (22)$$

O novo diagrama de blocos com a adição do estimador de velocidade discreto é apresentado na figura 17. Na mesma figura são adicionados os blocos conversores AD e DA, sincronizados para operar com o período de amostragem  $T$ .

O valor do período de amostragem  $T$  foi mantido em  $500\mu s$  e escolheu-se uma frequência de corte  $w_c$  de  $70rad/s$ , abaixo da frequência de operação do sistema (em torno de  $100rad/s$ ). Costa (2004) explica a dificuldade no ajuste de  $w_c$ , pois um valor muito próximo à frequência de operação do sistema, atenua demasiadamente o sinal de velocidade e aumenta a oscilação nos estados do LEVMAG, já um valor muito baixo não atenua o suficiente as componentes DC da aceleração, causando um aumento no desvio e saída do ponto de operação. Verificou-se durante as simulações que o valor escolhido, apesar de provocar um pequeno sobressinal nos estados, possibilita a estabilização do LEVMAG e operação em uma maior faixa de posições.

---

<sup>3</sup>Este problema ocorre pela presença de componentes DC nos estados, decorrentes da diferença entre os valores estacionários e os pontos de operação da linearização.

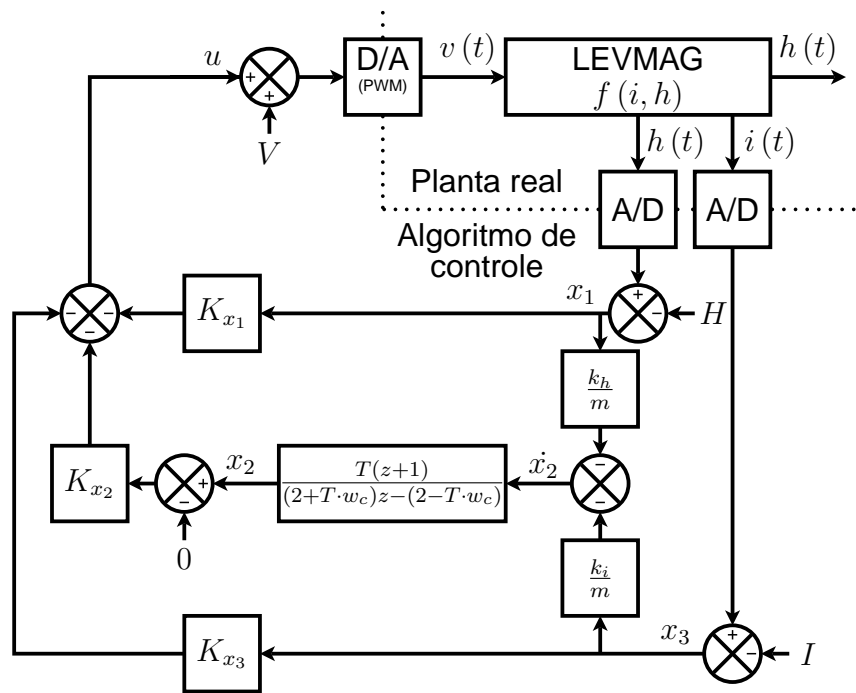


Figura 17: Diagrama de blocos do sistema com estimador de velocidade

#### 4.3.3 Inclusão da entrada de referência

A entrada de referência do sistema foi inicialmente ignorada para o projeto do controlador, pois não afeta as características dinâmicas da planta quando ela é avaliada pelo seu modelo linearizado. Sua inclusão é necessária para que LEVMAG possa seguir diferentes sinais aplicados, assim é possível avaliar as respostas transientes, bem como sua robustez, tendo em vista a operação fora do ponto de linearização.

A única referência necessária para o controle do LEVMAG é a referente à sua saída, ou seja,  $x_1$  (variação da posição). Entretanto, as mesmas relações matemáticas entre os estados se apresentam nos sinais de referência (LEONARDI; MAYA, 2011), ou seja, ao aplicar um sinal de referência para  $x_1$  também será necessário aplicar a derivada desse para  $x_2$  e um sinal equivalente para  $x_3$ , seguindo a relação entre os estados. Uma solução para este problema é posicionar o sinal de referência conforme a figura 18 e equação 23.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{N}} \cdot r \quad (23)$$

A arquitetura proposta na figura é apresentada em (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2002; MESSNER; TILBURY, 2011). É feita a inclusão de uma referência tipo





## 5 ELABORAÇÃO DO SIMULADOR

Neste capítulo, demonstra-se a construção dos blocos representando o LEVMAG, o algoritmo de controle e demais componentes para a simulação. Tais blocos serão mais complexos que os apresentados na figura 18 pois utilizarão como base as equações dinâmicas não lineares do LEVMAG e as características reais dos demais componentes utilizados. Será utilizado o módulo *Control Design and Simulation* do programa LabVIEW™, o qual permite trabalhar todas as características desejadas de forma gráfica.

### 5.1 BLOCO ELÉTRICO

A equação 26 representa matematicamente o funcionamento elétrico do LEVMAG de uma forma ordenada para a construção dos blocos, i.e. com o termo de maior derivada isolado dos demais. Além da equação, as características reais consideradas para a composição do bloco são (RECH; CAMPO, 2011a):

- Sinal de controle convertido em um PWM bipolar equivalente ao circuito de acionamento;
- Saturação da entrada PWM de 0% a 100%;
- Saturação do integrador de saída para o limite inferior de operação;
- Condições iniciais para a partida no ponto linearizado.

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i(t) + \frac{1}{L} \cdot v(t) \quad (26)$$

O bloco resultante é apresentado na figura 19. As entradas VPWR, CT, f, i inicial, i, R e L permitem o acesso externo às configurações e sinais. A saída do integrador possui um código de reinício para a corrente elétrica em 0A, assim o seu valor, como no circuito de acionamento, não tem a possibilidade de ficar negativo.

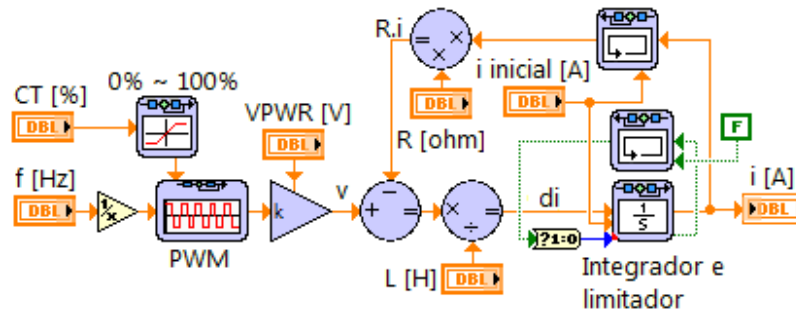


Figura 19: Diagrama no LabVIEW™ da etapa elétrica do LEVMAG.

## 5.2 BLOCO MECÂNICO

Assim como na seção anterior, as equações representando a etapa mecânica do sistema são adaptadas para a construção do bloco (equação 27).

$$\frac{d^2h(t)}{dt^2} = \frac{F_{peso} - F_{mag}(i, h)}{m}$$

$$F_{mag}(i, h) = \frac{i^2(t)}{2 \cdot a} \cdot L_0 \cdot e^{-\frac{h(t)}{a}} \quad (27)$$

$$F_p = m \cdot g$$

As características de saturação consideradas para a montagem deste bloco preveem o reinício de ambos integradores de saída na posição de  $0mm$ , pois representa o contato do objeto com o núcleo do eletroímã, assim a velocidade será  $0mm/s$  neste momento e a posição não ficará negativa. A representação da força magnética foi feita utilizando a sua função não linear para maior proximidade com o sistema real.

O diagrama de blocos obtido é o da figura 20. Mais uma vez, as entradas de configuração e sinal são disponibilizadas para configuração ( $i$ ,  $a$ ,  $L_0$ ,  $m$ ,  $g$ ,  $h$  inicial,  $L_0 \cdot \exp(-h/a)$  e  $h$ ) e para montagem do sistema com os demais blocos.

## 5.3 BLOCOS AUXILIARES DA REALIMENTAÇÃO

De forma a incluir o máximo de informações em relação ao sistema real para criação do simulador, o conversor analógico-digital (AD) presente na placa de controle será modelado junto aos sensores de posição e corrente elétrica. Estes componen-

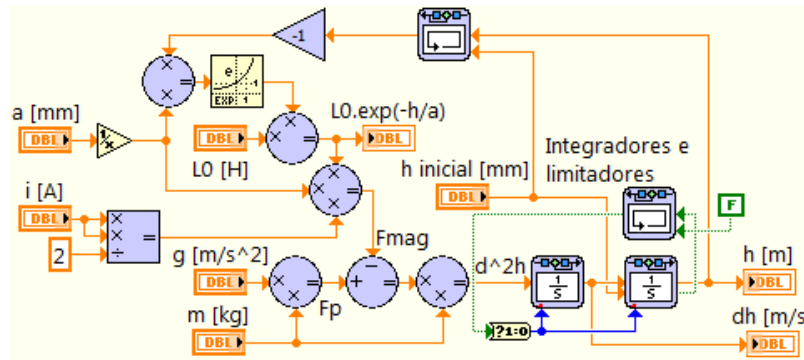


Figura 20: Diagrama no LabVIEW™ da etapa mecânica do LEVMAG.

tes incorporam o ramo de realimentação do LEVMAG. Para a representação, serão utilizadas tanto informações extraídas das folhas de dados dos componentes quanto medições realizadas na prática.

O conversor AD pode ser considerado como um simples ganho aplicado ao sinal medido. Com sua resolução de 10-bit e faixa de tensão de entrada de  $0V$  à  $3V$  o ganho equivale a 341, i.e. um sinal de  $0V$  é convertido em 0 enquanto um sinal de  $3V$  é convertido em 1023. Como características inerentes ao conversor, o valor convertido é sempre inteiro e amostrado, por isso também são adicionados um bloco para quantizar o sinal e um segurador de ordem zero.

Para o sensor de posição, foi necessário obter através de ensaios o gráfico da figura 6 (citado e descrito no capítulo Materiais e Métodos), associando a tensão de saída à distância do objeto para o sensor na base móvel do LEVMAG. Fixando a base móvel à  $148mm$  de distância do núcleo, foi obtido o gráfico de entreferro (posição efetiva do objeto até o eletroímã) na figura 21.

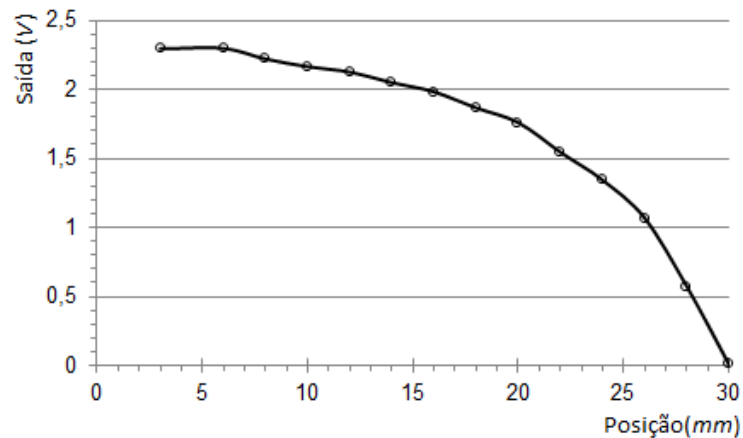


Figura 21: Gráfico da distância do objeto para o núcleo (entreferro) x tensão.

O conjunto de valores do gráfico da figura 21 foi colocado em um bloco de conversão, assim para cada posição medida é interpolada uma tensão equivalente.

No caso do sensor de corrente elétrica, o gráfico linear da figura 5 (também citado no capítulo Materiais e Métodos) indica uma variação com cerca de  $0,31V$  para cada  $1A$  medido, além da referência de  $0A$  em aproximadamente  $2,486V$  (Valor medido na prática). Para melhor aproveitamento da faixa de leitura do conversor AD, a polaridade de entrada da corrente no sensor foi invertida, assim a tensão de saída passa a ser inversamente proporcional à corrente elétrica. Por possuir um comportamento linear, a dinâmica do sensor de corrente será expressa apenas pelo polinômio de  $1^a$  ordem da equação 28.

$$v_i(t) = 2,486 - 0,31 \cdot i(t) \quad (28)$$

Os blocos destes componentes da realimentação são apresentados na figura 22.

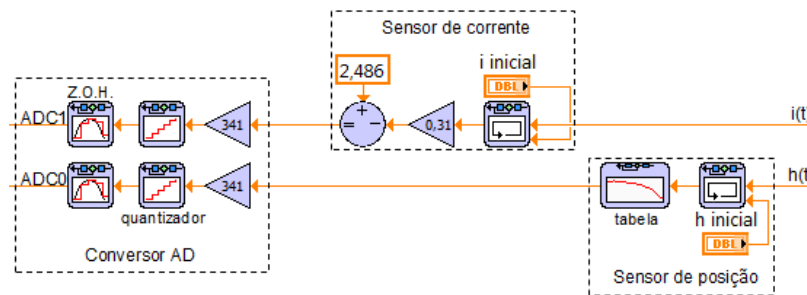


Figura 22: Representação dos blocos com os componentes da realimentação.

#### 5.4 BLOCO DO ALGORITMO DE CONTROLE

Este bloco incorpora a colocação dos estados nos pontos de operação, controlador RLQ, estimador de velocidade e demais funções para ajuste de escala numérica em função dos recursos da placa de controle. Para sua elaboração serão utilizadas funções elementares do programa LabVIEW™, pois este mesmo bloco fará parte do algoritmo da placa de controle. Assim a simulação terá os mesmos recursos de controle disponibilizados para o ensaio prático.

A primeira consideração na elaboração do algoritmo para este bloco é a velocidade da placa de controle. Verificou-se em experiências anteriores (RECH; CAMPO, 2011b) que a realização de poucas operações em ponto flutuante na placa de controle

demandam um tempo da ordem de  $ms$ , inviável para o controle do LEVMAG. Desta forma, o código irá incorporar apenas operações aritméticas com números inteiros de 32-bit.

Conforme visto em (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2002; GOLDBERG, 1991), as operações numéricas computacionais apresentam limitações dependendo da forma como são realizadas. Neste caso, por não utilizar números em ponto-flutuante, há uma perda considerável de resolução nas operações. A solução recomendada por Goldberg (1991) é a multiplicação da escala dos sinais e constantes utilizados no algoritmo por um fator, aumentando assim a quantidade de bits disponíveis para os cálculos. Adotou-se neste trabalho o fator  $10^5$ , correspondente a incorporação de 5 casas decimais ao número inteiro, suficiente para representar, por exemplo,  $H = 8,48mm$ .

O algoritmo na figura 23 incorpora a multiplicação da escala dos sinais de corrente, posição e referência nas operações de ajuste de grandezas. Estas funções iniciais corrigem as escalas impostas pelos sensores e o ganho imposto pelo conversor AD e apresentam como resultado  $h(t) \cdot 10^5$  e  $i(t) \cdot 10^5$ . A correção do sinal de posição é feita pelas constantes  $ah$  e  $bh$ , calculadas a partir da curva inversa da figura 21 linearizada entre os pontos  $6mm$  e  $14mm$ . O sinal de corrente é corrigido pelas constantes  $ai$  e  $bi$ , calculadas a partir da função inversa da equação 28. O sinal de referência será dado em  $mm$  e a multiplicação ajusta sua escala e aplica o ganho  $\bar{N}$  dimensionado no projeto do controlador.

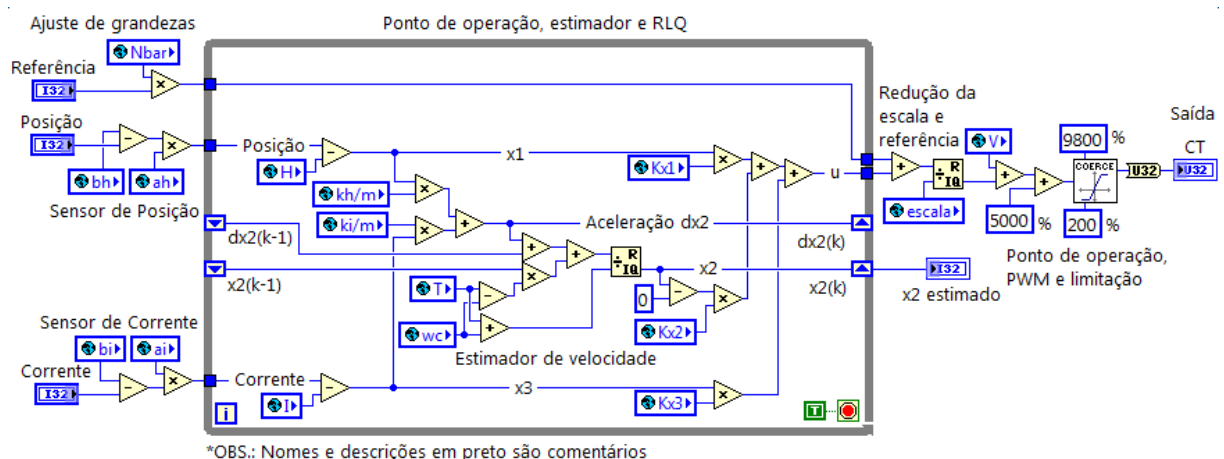


Figura 23: Diagrama no LabVIEW™ do controlador.

O código dentro do loop (Ponto de operação, estimador e RLQ) funciona da mesma forma apresentada na figura 17. Primeiro, os estados são colocados em torno dos pontos de operação (que também já incorporam a multiplicação de escalas por  $10^5$ ),



## 6 SIMULAÇÕES E ENSAIOS

Neste capítulo demonstra-se a simulação e ensaio feitos para avaliar o comportamento do sistema. A simulação possibilitou investigar o LEVMAG antes de averiguar seu funcionamento prático. Já o ensaio foi realizado de forma a validar o modelo obtido, bem como avaliar a simulação, permitindo observar as diferenças entre as duas formas de realização.

### 6.1 SIMULAÇÃO

O simulador criado no capítulo anterior servirá como base para esta verificação. A simulação utilizará o algoritmo de integração Range-Kutta 4 com passo de  $20\mu s$ . As variáveis que compõem os blocos simuladores criados foram configuradas com os valores obtidos no decorrer deste trabalho e resumidos na tabela 4.

Tabela 4: Variáveis relacionadas ao simulador.

Parâmetro	Valor
$R$	$16\Omega$
$m$	$0,086kg$
$L_0$	$68,8mH$
$L_1$	$536,5mH$
$a$	$4,24mm$
$g$	$9,81\frac{m}{s \cdot s}$
$VPWR$	$50V$
$f$	$20kHz$
$h\ inicial$	$8,48mm$
$i\ inicial$	$0,73A$

Quanto às variáveis que compõem o bloco do controlador, os valores estão resumidos na tabela 5.

Durante cada simulação, o sinal de referência foi variado a cada dois segundos com a aplicação de degraus, inicialmente afastando o objeto do eletroímã e depois o aproximando. A faixa de trabalho do sinal de referência é de  $4mm$  a  $-3mm$  em torno do ponto de operação ( $8,48mm$ ), na qual o sistema ainda se mantém estável.



Tabela 5: Variáveis relacionadas ao algoritmo de controle.

Parâmetro	Valor
$escala$	100000
$H$	8,48mm
$I$	0,73A
$V$	11,68V
$-k_h/m$	1605
$-k_i/m$	-19
$K_{x_1}$	79338
$K_{x_2}$	1283
$K_{x_3}$	-147
$ah$	10
$bh$	841
$ai$	946
$bi$	848
$T$	500 $\mu s$
$2/T$	40kHz
$w_c$	70rad/s
$\bar{N}$	-65328

Na tabela 6 estão os valores de referência aplicados ao longo do tempo.

Tabela 6: Valores de referência aplicados ao longo do tempo — simulação.

Tempo	0s	2s	4s	6s	8s	10s	12s	14s
Ref.	0mm	1mm	2mm	3mm	4mm	3mm	2mm	1mm
Tempo	16s	18s	20s	22s	24s	26s	28s	
Ref.	0mm	-1mm	-2mm	-3mm	-2mm	-1mm	0mm	

Na simulação, além dos demais estados, serão obtidas a velocidade do objeto (acessível apenas no modelo do LEVMAG criado no LabVIEW™) e a velocidade estimada pelo algoritmo de controle. Com os dois gráficos, será possível avaliar o funcionamento do estimador de velocidade criado.

Na figura 25 estão as trajetórias completas dos sinais de posição, velocidade, velocidade estimada e corrente elétrica na simulação realizada com os blocos elaborados

no capítulo anterior, configurados com as características citadas anteriormente. Já na figura 26, verifica-se o detalhe entre os tempos de  $0s$  e  $4s$  de simulação.

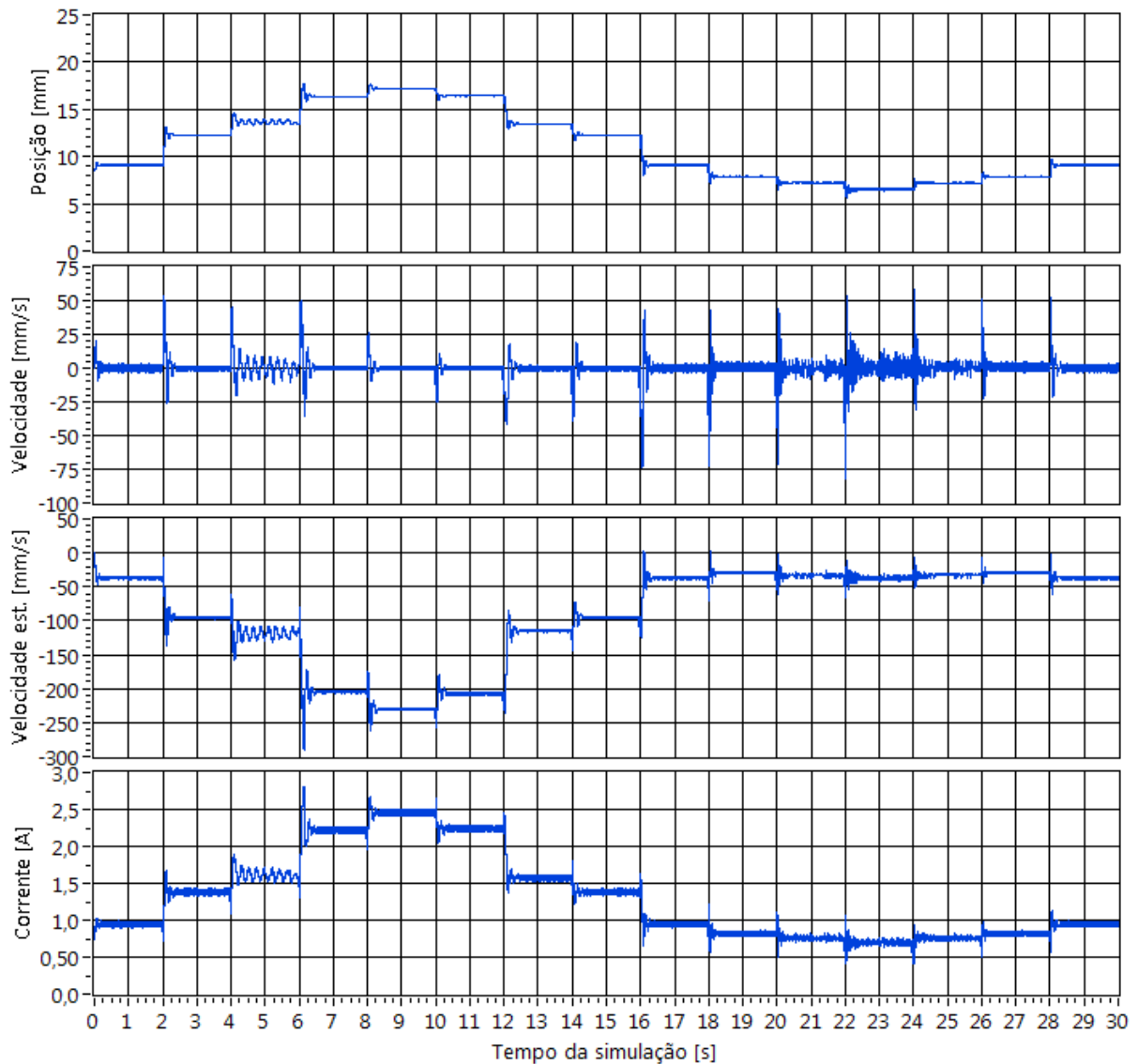


Figura 25: Resultado completo da simulação no LEVMAG.

Pelos gráficos, verifica-se que o sistema estabiliza em todos os degraus aplicados, entretanto o LEVMAG não os acompanha com erro zero, assim, no total, a operação ocorre efetivamente entre  $7mm$  e  $17mm$  (uma variação aproximada de  $-2mm$  à  $8mm$  da posição inicial). Percebe-se também um sobressinal médio de  $24,24\%$  na posição, diferente do critério de projeto para sobressinal zero. Tais efeitos ocorrem devido aos blocos não lineares modelados e ao filtro passa-altas do estimador de velocidade, os quais alteram a dinâmica do sistema em relação ao modelo linearizado.

Quanto à velocidade estimada pelo algoritmo de controle, há a presença dos degraus aplicados na referência e também um nível DC de  $-40mm/s$ . Tais valores

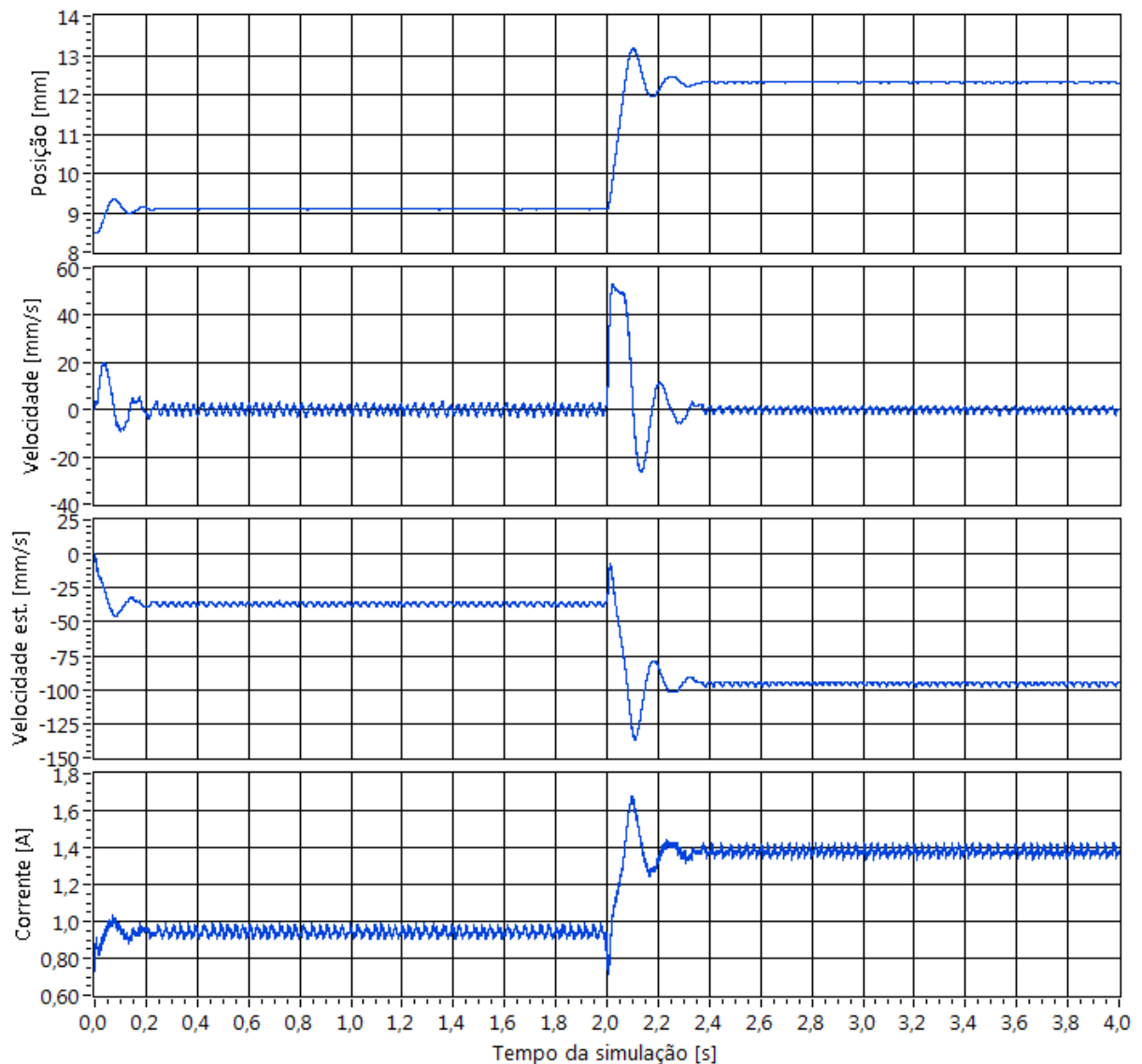


Figura 26: Detalhe da simulação no LEVMAG.

desviam-se do sinal de velocidade gerado pelo modelo do LEVMAG e ocorrem por dois principais motivos. Os degraus são decorrentes da linearização feita no sensor de posição, levando esse sinal a apresentar um erro crescente em relação ao original com o distanciamento da posição, já nos pontos de posição próximos da linearização do sensor, ocorrem desvios menores. O nível DC fixo é ocasionado pelo erro de corrente elétrica em relação ao ponto de operação utilizado na linearização. Enquanto o valor dimensionado é de  $0,73A$ , o que se observa na simulação é próximo de  $1A$  na posição inicial.

## 6.2 ENSAIO

Para a realização do ensaio foi necessário embarcar o algoritmo de controle da figura 23 na placa de controle. Para tanto, o bloco do algoritmo foi montado junto aos demais blocos necessários para configurar e operar a placa de controle, como mostrado na figura 27.

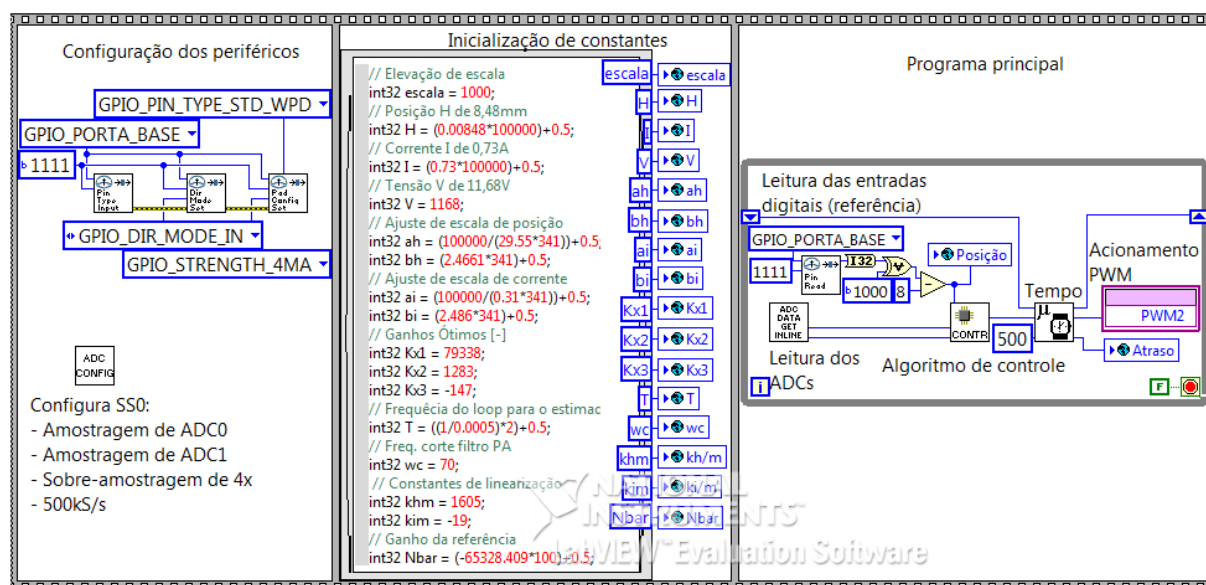


Figura 27: Código completo para embarcar na placa de controle.

No código elaborado para a placa de controle realiza-se a configuração das entradas digitais e módulos de conversão AD utilizados. Em seguida todas as variáveis do algoritmo de controle são configuradas com os mesmos valores da tabela 5 utilizando uma rotina em linguagem C. Finalmente, no programa principal, utiliza-se um bloco para a aquisição dos sinais de posição e velocidade, um bloco para leitura das entradas digitais, o algoritmo de controle, um temporizador para fixar o período de funcionamento em  $500\mu s$  e o bloco de PWM.

São utilizadas quatro entradas digitais para o controle externo do sinal de referência. Os quatro bits das entradas são lidos em conjunto, formando um número inteiro entre  $-8mm$  e  $7mm$ .

Para documentação do ensaio, utilizou-se a placa de aquisição de sinais USB NI myDAQ. Através dos canais de entrada analógicos, capturou-se os sinais de posição e corrente elétrica, e através das saídas digitais, gerou-se pelo computador os sinais de referência.

A faixa de sinais referência nas quais o LEVMAG estabiliza no ensaio é diferente

da utilizada nas simulações e está entre  $7mm$  e  $-2mm$ . Os novos valores são apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Valores de referência aplicados ao longo do tempo — ensaio prático.

Tempo	$0s$	$2s$	$4s$	$6s$	$8s$	$10s$	$12s$	$14s$	$16s$	$18s$
Ref.	$0mm$	$1mm$	$2mm$	$3mm$	$4mm$	$5mm$	$6mm$	$7mm$	$6mm$	$5mm$
Tempo	$20s$	$22s$	$24s$	$26s$	$28s$	$30s$	$32s$	$34s$	$36s$	
Ref.	$4mm$	$3mm$	$2mm$	$1mm$	$0mm$	$-1mm$	$-2mm$	$-1mm$	$0mm$	

No ensaio não é possível avaliar a velocidade real do objeto (por não haver um sensor para este estado) e nem a velocidade estimada pelo algoritmo de controle (por ser uma variável interna do algoritmo), assim a velocidade foi calculada com base nas medições de posição e corrente elétrica.

Os dados foram adquiridos na placa de aquisição à uma taxa de  $40kS/s$ . Os valores de tensão lidos no programa LabVIEW™ foram tratados para retornar a posição, velocidade e corrente elétrica efetivos. A posição foi calculada com uma tabela de interpolação baseada no gráfico da figura 21. A corrente elétrica foi obtida da mesma forma realizada no simulador (equação 28). A velocidade foi calculada de forma parecida com a do algoritmo de controle, só que sem a aplicação do fator de escala e com cálculos em ponto flutuante.

Os resultados são apresentados na figura 28 e o detalhamento no tempo entre  $0s$  e  $4s$  na figura 29.

Como verifica-se nos gráficos, o LEVMAG se mantém na faixa de referências aplicadas, com uma oscilação no degrau de  $1mm$ , a qual fica menor nos degraus seguintes. O sobressinal verificado na posição é cerca de 66,67%. Há uma quantidade de ruído com cerca de  $\pm 100mA$  nas leituras do sensor de corrente elétrica, provenientes do chaveamento PWM do circuito de acionamento. Nas leituras do sensor de posição também verifica-se o ruído, cujo valor é aproximadamente  $\pm 0,4mm$ .

O sinal de velocidade calculada para análise oscila durante todo ensaio, acompanhando a variação de trajetória do objeto e o ruído proveniente dos sinais medidos. Verifica-se também um nível DC de  $-65mm/s$ . Como a posição é calculada por uma tabela de interpolação, o seu desvio em relação ao valor real é pequeno e por isso os degraus da referência não são transferidos para o estimador. Há um erro estacionário no sinal de posição, o qual mantém o objeto em  $10mm$  ao invés dos  $8,48mm$  do ponto

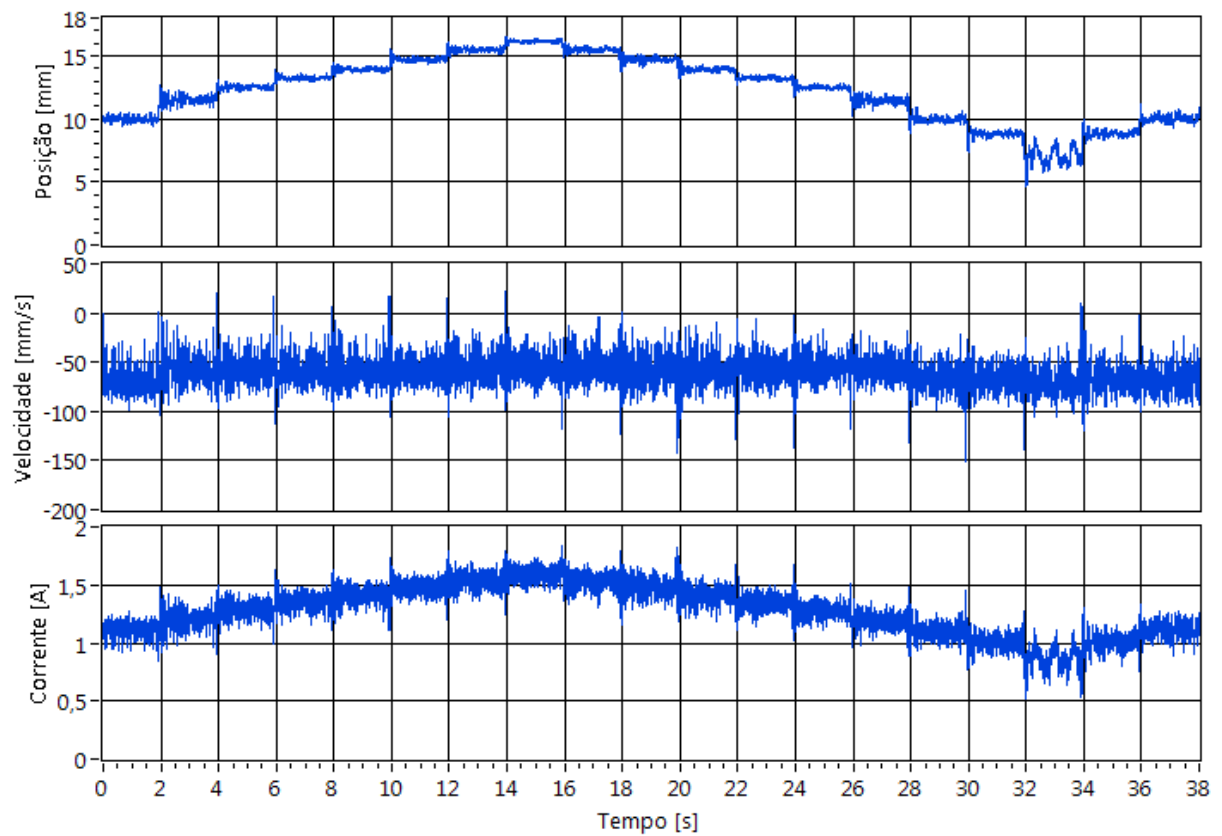


Figura 28: Resultado completo do ensaio no LEVMAG.

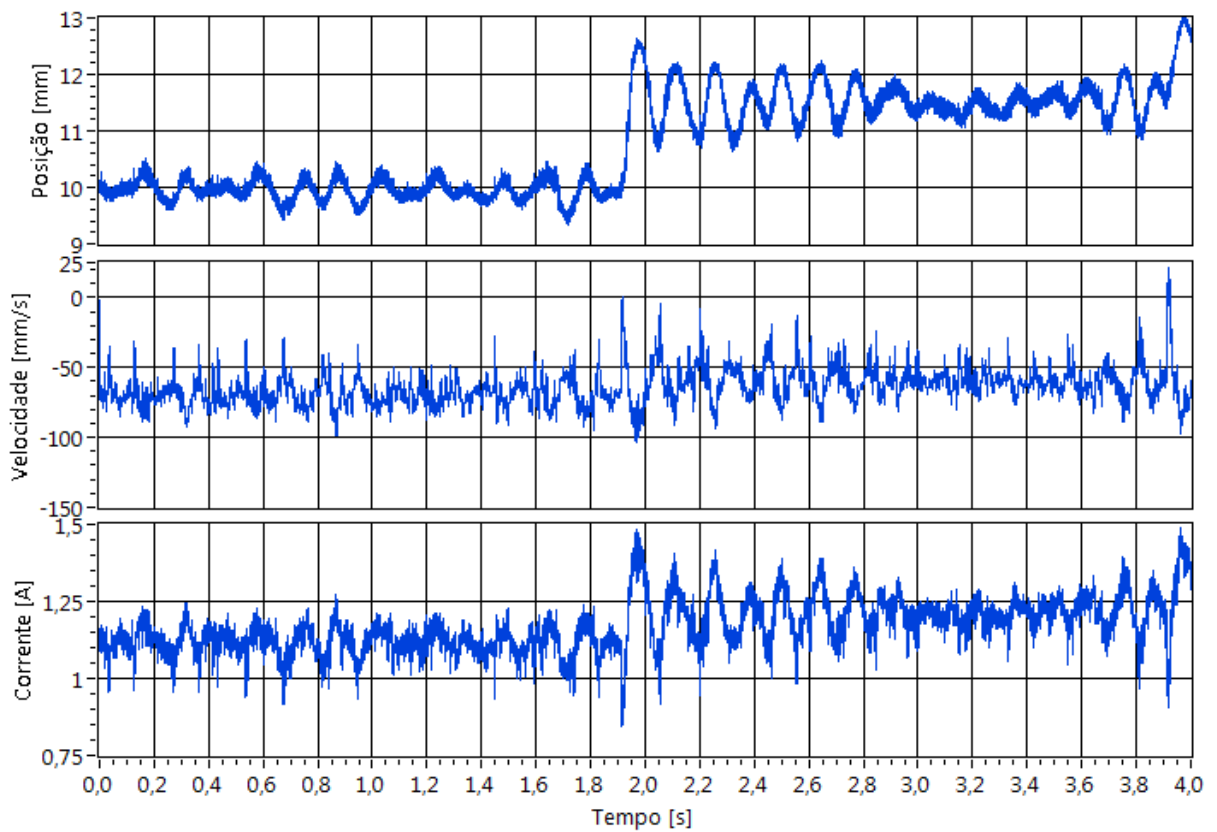


Figura 29: Detalhe do ensaio no LEVMAG.

inicial. Já a corrente elétrica descreve um sinal com valor médio de  $1,1A$  (próximo ao valor da simulação) na posição inicial, isto devido ao erro no ponto de operação também observado na simulação.

### 6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme avaliado individualmente em cada seção, o controlador e demais códigos necessários para sua operação foram capazes de estabilizar o LEVMAG em diferentes posições em uma faixa de  $10mm$ , tanto na simulação quanto no ensaio. A resposta transitória entre cada degrau da referência apresentou sobressinal, apesar do projeto do controlador prever tal condição como nula. Seu surgimento foi ocasionado pela presença do filtro passa-altas no estimador de velocidade e das não linearidades da simulação e ensaio. Para o projeto proposto, no qual o objeto levitado está livre na região sob o eletroímã, a disparidade entre o sobressinal especificado e o observado durante a operação não acarreta problemas no funcionamento do sistema, no entanto é um ponto importante a ser aperfeiçoado, pois em diferentes estruturas esta condição pode ser prejudicial, e.g. motores com mancal magnético.

Durante a simulação foi possível avaliar o estimador de velocidade, o qual não acompanhou satisfatoriamente o sinal original nas variações da referência. Tal situação ocorreu pela linearização da resposta do sensor de posição no algoritmo de controle. Também percebe-se um desvio do seu valor médio associado ao erro dos pontos de operação estabelecidos na linearização. Tais condições, permitirão em trabalhos futuros, elaborar algoritmos com desvios menores, possivelmente a partir de técnicas como a observação de estados (OGATA, 2003; LEONARDI; MAYA, 2011) e tabelas de interpolação para caracterização dos sensores.

Por fim, mesmo com a aplicação de diferentes valores no sinal de referência, tanto a simulação quanto o ensaio permitiram avaliar a estabilidade do LEVMAG nas proximidades das mesmas posições efetivas de  $7mm$  a  $17mm$ . O ensaio acompanhou o sinal de referência de posição com um erro menor que o apresentado na simulação. Também verificou-se que a corrente elétrica requisitada em cada degrau foi, em média, menor no ensaio (máximo de  $1,7A$ ) do que na simulação (máximo de  $2,5A$ ). Estes fatores demonstram a necessidade de aperfeiçoar o modelo não linear utilizado na simulação.

## 7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho elaborou-se um controlador RLQ para um LEVMAG a partir de seu modelo matemático. Os LEVMAGs aplicam-se em diversas situações nas quais é necessária a eliminação de atrito por contato, e.g. trens bala, ultracentrífugas e motores com mancal magnético (COSTA, 2009). Estes sistemas estão presentes no estudo de técnicas de controle clássicas e modernas, isto devido à sua natureza não linear, a qual permite avaliar a eficiência da aplicação de uma determinada técnica, e também por ser uma aplicação lúdica, com grande apelo visual durante o funcionamento.

O LEVMAG elaborado neste trabalho possui 1 GDL e pode ser controlado no sentido do eixo vertical. Seu modelo matemático foi obtido utilizando-se uma regressão exponencial para representar a variação da indutância do eletroímã com a posição do objeto. As características do modelo foram obtidas e calculadas através de ensaios e medições no sistema real. A partir deste modelo parametrizado, obteve-se modelos linearizados no espaço de estados para a construção do RLQ.

Para elaboração do RLQ, utilizou-se a técnica de controle ótimo, com base na regra de Bryson. Dentre os parâmetros necessários para o dimensionamento dos ganhos de realimentação, o critério de sobressinal zero demonstrou ser satisfatório, pois na simulação e ensaio do LEVMAG, com a presença de não linearidades, o sistema apresentou sobressinal. Em uma situação na qual o projeto é realizado com base em equações que não consideram determinadas condições (como as equações linearizadas), a aceitação de limites críticos para alguns parâmetros pode ocasionar uma faixa de estabilidade menor na prática. A inclusão dos limites de operação do circuito de acionamento como parâmetros, também contribuíram na definição de ganhos que mantiveram a corrente elétrica dentro de sua faixa de trabalho.

Devido a relação não linear existente entre os estados do sistema, optou-se pela aplicação do sinal de referência diretamente no sinal de controle. Foi dimensionado um ganho para este sinal, o qual foi suficiente para compensar o ganho DC do sistema. Esta técnica demonstrou desempenho satisfatório, mesmo com as diferenças no deslocamento da posição do objeto verificadas entre a simulação e o ensaio. Apesar disso, a faixa de estabilidade efetiva do LEVMAG foi a mesma (de  $7mm$  a  $17mm$ )



em ambas aplicações.

No desenvolvimento de um simulador com resposta próxima à realidade, o módulo *Control Design and Simulation* do programa LabVIEW™ ofereceu recursos suficientes para representar todas as características averiguadas no LEVMAG. O simulador permitiu avaliar as técnicas utilizadas no algoritmo de controle e apresentou uma faixa de operação igual a do ensaio realizado. Foram verificadas diferenças entre as respostas do simulador e do ensaio, uma delas referente ao valor do deslocamento do objeto em cada degrau da referência e outra referente aos valores de corrente elétricas requeridos para estabilização em cada degrau (chegando ao máximo de  $2,5A$  na simulação e  $1,7A$  no ensaio). Estas diferenças permitirão o aperfeiçoamento futuro do simulador, de forma a prever demais condições, além da faixa de estabilidade do sistema e os sinais internos do algoritmo de controle.

O algoritmo de controle contendo o RLQ foi construído de forma a se adequar a todas as características da placa de controle, a principal delas se refere à realização de cálculos apenas com números inteiros, o que requisitou a utilização de técnicas matemáticas para expandir a resolução dos valores usados. Para a aplicação do algoritmo na placa de controle, não houveram dificuldades, pois foi possível utilizar o mesmo código já preparado para a simulação, acrescentando apenas as configurações da placa de controle e das variáveis. Seu desempenho no ensaio foi aceitável e muito próximo ao da simulação, apesar do objeto levitado apresentar uma oscilação em cada degrau da referência devido à presença dos ruídos associados ao chaveamento PWM.

Finalmente, os resultados da simulação e do ensaio foram próximos o suficiente para, em futuros aperfeiçoamentos do controlador, concentrar os esforços na sua construção, observando as respostas computacionais. Ao atingir os critérios estabelecidos, o controlador pode ser utilizado em ensaios práticos, requerendo neste momento, o mínimo de modificações.

## 7.2 TRABALHOS FUTUROS

No âmbito de desenvolvimento das etapas que compõem esta dissertação, diversos pontos foram verificados como promissores para a execução de trabalhos futuros. As áreas avaliadas envolvem modificações estruturais no LEVMAG, modificações no circuito de acionamento, utilização de outras placas de controle, aplicação de uma nova estrutura e técnicas de controle moderno junto ao RLQ e também a utilização de

recursos relacionados à co-simulação entre programas.

### 7.2.1 Estrutura do LEVMAG

No decorrer dos ensaios de parametrização do LEVMAG, observou-se a concentração do campo magnético entre os ramos do núcleo do eletroímã, devido o seu formato em “E”. Assim, o objeto é atraído apenas nesta região, com uma pequena inclinação em relação à face do núcleo. Com a utilização de um ímã permanente no lugar de um material ferromagnético no topo do objeto levitado, a atração ocorrerá no centro do núcleo, reduzindo a inclinação do objeto.

Com a modificação proposta acima, é possível também colocar o sensor de efeito hall de posição junto à face do eletroímã, de forma que a distância será estimada com a diferença entre o campo gerado e o campo do ímã permanente no objeto. Esta solução elimina a necessidade de uma base móvel após a parametrização do LEVMAG, mas está sujeita a apresentar um ruído maior, requerendo o projeto de filtros para reduzi-lo.

### 7.2.2 Circuito de acionamento

O circuito de acionamento utilizado apresentou um bom desempenho no controle do LEVMAG, mas apresenta algumas limitações devido à técnica de *bootstrap* para o acionamento do MOSFET. Devido a semelhança deste sistema com um motor DC do ponto de vista elétrico, podem ser utilizados circuitos de acionamento monolíticos dedicados ao controle de corrente elétrica. Um exemplo de circuito é o DRV8840, que possui uma ponte H interna capaz de suprir até 5A ao eletroímã. Além disso, este mesmo circuito possui um controlador de corrente elétrica próprio, possibilitando a criação de um controle cascata e eliminando um estado na realimentação para o RLQ.

Considerando os efeitos observados pela presença do ruído de chaveamento do PWM, também pode-se optar por um circuito de acionamento linear, apesar de apresentar menor eficiência, não há emissão de ruídos por parte do circuito, além do térmico. Para sua aplicação, é necessário um conversor digital-analógico ligado e controlado pela placa de controle.

### 7.2.3 Placas de controle

A placa de controle EK-LM3S8962 foi escolhida para este projeto pela sua integração com o módulo *Embedded for ARM* do programa LabVIEW™. Suas limitações principais foram referentes a falta de uma unidade de cálculos em ponto flutuante e a utilização de programação em linguagem gráfica, que utiliza mais recursos que a programação textual.

Procurando o aperfeiçoamento do algoritmo de controle e a menor necessidade de técnicas de otimização de código, há diferentes placas com a mesma família de microcontroladores (ARM) que possuem unidades de cálculo em ponto flutuante e são programadas em linguagem C. Como averiguado no trabalho, com um bom simulador, o controlador pode ser totalmente analisado nas simulações, mesmo que esteja escrito em linguagem C, diminuindo a necessidade de modificações durante os ensaios. Com o excedente de recursos oferecidos por uma nova placa pode-se, por exemplo, representar os sensores utilizando tabelas de interpolação, que apresentarão menores desvios com a variação da referência.

### 7.2.4 Estruturas e técnicas de controle

Conforme citado nas modificações relacionadas ao circuito de acionamento, utilizando circuitos integrados dedicados ao controle de corrente na etapa de potência, é possível trabalhar em cascata com o controlador RLQ, reduzindo para dois os estados realimentados e processados.

Também verificou-se a dificuldade presente na estimativa do sinal de velocidade. O estimador elaborado apresentou problemas com sinais DC na sua entrada. A técnica mais comum que pode ser aplicada na estimativa da velocidade utiliza observadores de estado. Outra possibilidade é a aplicação de um filtro de Kalman. Em ambos os casos, pode-se conseguir resultados mais promissores, entretanto será necessária uma placa de controle com melhores recursos de processamento.

### 7.2.5 Co-simulação de sistemas

Por fim, para uma boa averiguação prévia do controlador, é necessário um simulador com características muito próximas à realidade. Mesmo com as diversas condições estipuladas neste trabalho, ainda sim alguns sinais simulados não acompanha-

ram a resposta observada no ensaio, principalmente a corrente elétrica, relacionada ao circuito de acionamento.

Há a possibilidade de se trabalhar com o programa Multisim™ através de uma técnica conhecida como co-simulação. Nesta técnica, o Multisim™ faz a simulação de um circuito elétrico (como o circuito de acionamento) e o programa LabVIEW™ fornece e lê os sinais referentes à esta simulação. Esta técnica permite introduzir na simulação não linearidades do circuito de acionamento presentes dentro de cada componente elétrico que o compõe, oferecendo respostas mais próximas a realidade.

## REFERÊNCIAS

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. [S.l.]: Prentice Hall, 2000.

BANERJEE, S.; BHADURI, R.; PRASAD, D. Some aspects of switching power amplifier used in electromagnetic levitation system. **Int. J. Power Electronics**, v. 1, n. 1, p. 33–48, 2008.

CHIBA, A.; FUKAO, T.; ICHIKAWA, O.; OSHIMA, M.; TAKEMOTO, M.; DORRELL, D. G. **Magnetic Bearings and Bearingless Drives**. 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2005.

COSTA, E. A. da. **Controle da Suspensão Magnética de um veículo MAGLEV**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

COSTA, E. A. da. **Mancal Magnético Ativo Aplicado a um Motor de Indução Linear Tubular**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CUTIN, M. da S.; MACHADO, S. G.; MATTOS, A. L. Sistema de levitação eletromagnético controlador por computador. Projeto de fim de curso. 2001.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Feedback Control of Dynamic Systems**. 4. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2002.

GOLDBERG, D. What every computer scientist should know about floating-point arithmetic. **ACM Comput. Surv.**, v. 23, n. 1, p. 5–48, 1991.

GOMES, R. R.; SILVA, D. C. B. V. da; NETO, J. L. da S. Eletromagnetic levitation using matlab real time control toolbox. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, v. 3, p. 1144–1146, 2003.

GOMES, R. R.; STEPHAN, R. M. Um experimento para ilustrar o sistema de levitação eletromagnética utilizado em trens maglev. Projeto de fim de curso. 2004.

HURLEY, W. G.; HYNES, M.; WÖLFLE, W. H. Pwm control of a magnetic suspension system. **IEEE Transactions on education**, v. 47, n. 2, p. 165–173, 2004.

HURLEY, W. G.; WÖLFLE, W. H. Eletromagnetic design of a magnetic suspension system. **IEEE Transactions on education**, v. 40, n. 2, p. 124–130, 1997.

LEMPEL, A.; MICHEL, G.; CARBALAJES, R. Ensayos de control no lineal sobre un levitador magnético. **Revista Argentina de Trabajos Estudiantiles**, v. 1, n. 1, p. 36–40, 2006.

LEONARDI, F.; MAYA, P. **Controle essencial**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2011.

MESSNER, W.; TILBURY, D. **Control Tutorials for MATLAB and Simulink**. 2011. Disponível em: <<http://www.engin.umich.edu/class/ctms/state/state.htm>>. Acesso em: 9 de janeiro de 2013.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBINS, W. P. **Power Electronics: Converters, Applications and Design**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1995.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2003.

RECH, E. **Simulação e projeto de circuitos de acionamento para sistemas de levitação magnética através dos programas NI LabVIEW e NI Multisim**. Monografia (Especialização) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2010.

RECH, E.; CAMPO, A. B. Modelagem e simulação de um sistema de levitação magnética através de programação em linguagem gráfica. In: **X Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações**. Águas de Lindóia, São Paulo: [s.n.], 2011. p. 223–226.

RECH, E.; CAMPO, A. B. Projeto de um controlador proporcional integral embarcado para corrente elétrica. In: **II Congresso Científico da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia no IFSP**. Bragança Paulista, São Paulo: [s.n.], 2011.

## APÊNDICE A - Desenho técnico do LEVMAG

Ao final deste apêndice, apresenta-se o desenho detalhado da planta de levitação magnética elaborada e estudada neste trabalho. Na região B1 deste desenho, a vista frontal detalha as diferentes partes da planta, o eletroímã, as bases móvel e fixa e o objeto utilizados na levitação. Na região B2, as demais cotas são colocadas na vista lateral direita da planta, assim como a massa do objeto levitado. Finalmente, a vista isométrica está na região D.

### A.1 ELETROÍMÃ

O eletroímã é composto de materiais para montagem de transformadores monofásicos. O enrolamento possui 1216 espiras de fio magnético de seção 23AWG em um carretel cujo núcleo tem 4cm de lado. O núcleo é formado por chapas de ferro silício tipo "E" para reduzir sua relutância e aumentar o fluxo magnético na região de atração do objeto.

### A.2 BASES

Uma chapa de MDF com as dimensões aproximadas 31cm x 25cm x 2cm serve como base fixa de sustentação para a planta. Duas hastes cilíndricas de alumínio apoiadas em um bloco fixam o eletroímã em suas pontas. Um bloco de nylon, entre as hastes, se movimenta em toda a altura entre o eletroímã e o bloco de apoio das hastes, possibilitando uma base móvel para fixação do sensor de posição.

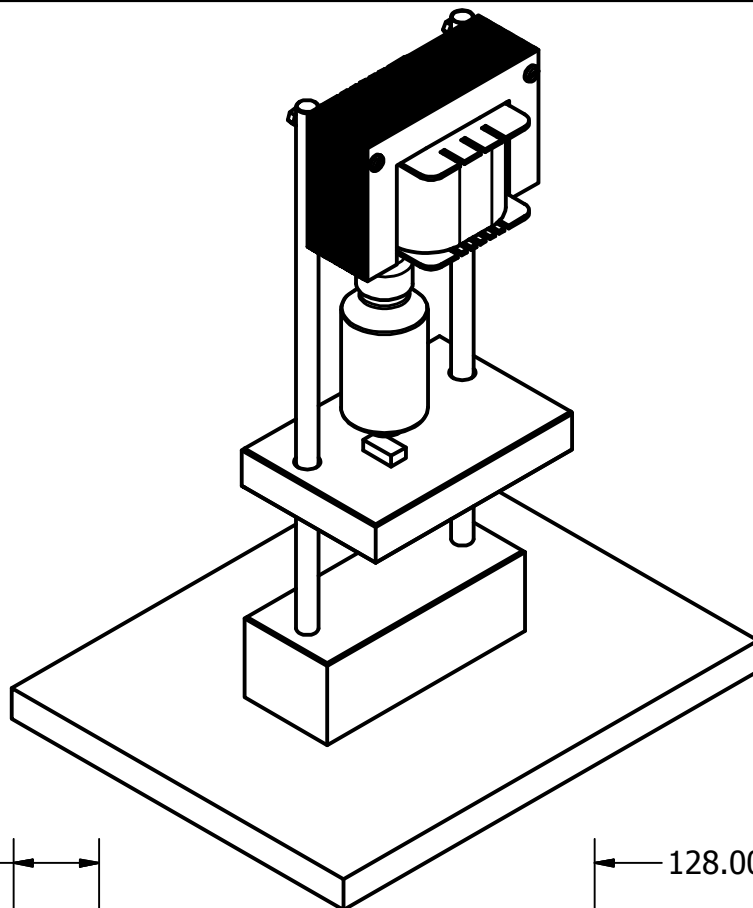
### A.3 OBJETO LEVITADO

O objeto levitado magneticamente é uma garrafa plástica com capacidade de 100ml. Na tampa da garrafa plástica há uma arruela ferromagnética para que o eletroímã possa a atrair. No ponto inferior da garrafa, há um ímã de ferrite usado na medição da posição do objeto. No interior da garrafa plástica há areia e sua massa total é de 86g.

2

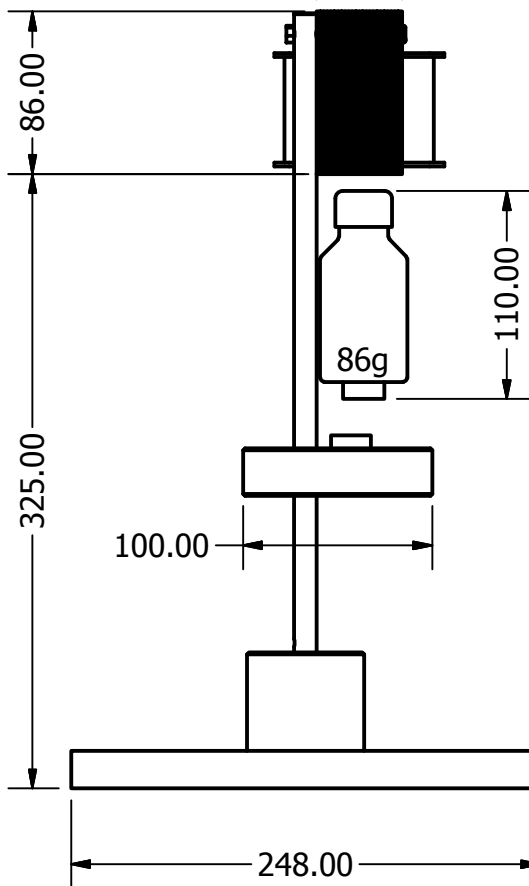
1

70

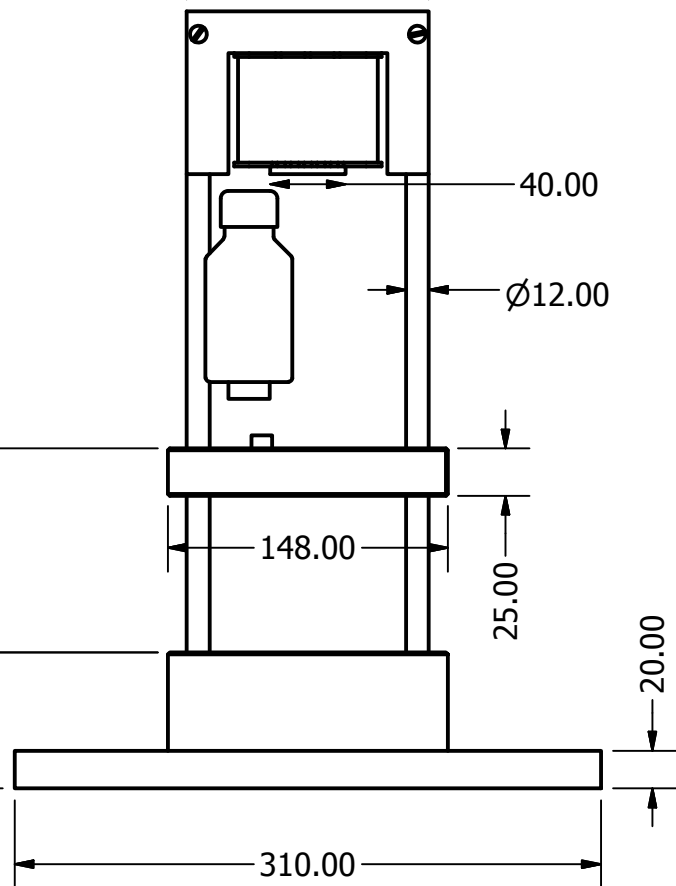


45.00

128.00



Altura Ajustável



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

TÍTULO

APÊNDICE A  
PLANTA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

FORMATO

A4 [mm]

ESCALA

1:4

FOLHA 1 DE 1

2

1