



UFPA

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE PROCESSO DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA - MAGLEV

RÔMULO LIRA MILHOMEM

2º Período de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
TUCURUÍ - PARÁ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ

RÔMULO LIRA MILHOMEM

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA
DE PROCESSO DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA -
MAGLEV

TRABALHO SUBMETIDO AO COLEGIADO DO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Tucuruí - Pará
2010

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE PROCESSO DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA - MAGLEV

Este Trabalho foi julgado em 09 de junho de 2010 adequado para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista** e aprovado em sua forma final pela banca examinadora que atribuiu o conceito **EXCELENTE**.

Prof. MSc. Rafael Suzuki Bayma
ORIENTADOR

Prof. MSc. Cleison Daniel Silva
MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA

Eng. MSc. Raphael Barros Teixeira
MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Cleison Daniel Silva
**COORDENADOR DO CURSO DE GRADUAÇÃO
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Agradecimentos

Tenho aqui a oportunidade de manifestar minha gratidão a todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, acreditam em mim e me incentivam a correr atrás dos meus ideais. Assim, expresso meus agradecimentos.

Em especial aos meus pais, Manoel Milhomem Fernandes e Ana Maria Lira Fernandes, que através da fibra e persistência moldaram meu caráter. Vocês são modelos de luta e perseverança para mim. Sou extremamente grato por terem me fornecido condições para me tornar o profissional e pessoa que hoje sou.

A todos que me auxiliaram a atingir meus objetivos, em particular a minha família, meus irmãos, Tarcisio Lira Milhomem e Emanuela Lira Milhomem, que são para mim exemplos de fraternidade, lealdade e amizade.

A minha namorada, Kimi Yano, pelos anos de companheirismo e dedicação a mim concedidos, inclusive pelas inúmeras revisões de texto que foram feitas.

Em particular, ao meu orientador Rafael Suzuki Bayma, por sua paciência, persistência e dedicação incondicional. Graças ao seu empenho consegui vencer as dificuldades e alcançar o meu objetivo.

Aos amigos de laboratório, pela dedicação e empenho. Sem a ajuda de vocês não poderia alcançar os resultados almejados durante a pesquisa.

A todos, meu sincero: Muito Obrigado!

Resumo

A construção de experimentos é considerada uma eficiente atividade didática em cursos de engenharia, uma vez que integra esforços intelectuais e técnicos dos alunos em direção a uma meta concreta e bem definida. Esta prática tem sido desenvolvida na Universidade Federal do Pará - UFPA, inclusive em unidades avançadas do interior, como o Campus de Tucuruí.

Seguindo esta metodologia, em 2007 o Grupo de Controle e Automação, formado por alunos de graduação em Engenharia Elétrica, obteve resultados significativos ao construir um protótipo de um processo de levitação magnética. O desenvolvimento deste protótipo propiciou à equipe experiência suficiente para aspirar metas mais ousadas. A partir deste momento, iniciaram-se os estudos que levaram a consolidação de outro processo de levitação magnética, mais flexível e prático que o primeiro protótipo construído. Este trabalho apresenta o desenvolvimento desta nova planta, com o objetivo de disponibilizar um equipamento com recursos de *hardware* necessários ao estudo do sistema.

O sistema proposto nesta monografia é composto pelas seguintes partes: um eletroímã, responsável por atrair um corpo magnetizável através de forças de origem magnética que se opõem à força peso que age sobre o corpo; um sensor, que capta a posição do corpo através de um sistema óptico, realimentando a malha do sistema; um somador, que recebe o sinal de posição e de uma referência, informando o sinal de erro ao controlador, permitindo que este atue sobre o nível de corrente aplicado ao eletroímã, assim, controlando a força magnética empregada ao corpo.

A construção deste processo permitiu reforçar princípios fundamentais de diversas áreas abordadas durante a graduação. Outros pontos também podem ser ressaltados, como: o desenvolvimento do hábito de pesquisa, em especial por elementos além da grade curricular; o reforço de aspectos técnicos, como instrumentação e desenvolvimento de circuitos impressos; o planejamento, em especial no momento em que foi necessário trabalhar a versatilidade do protótipo. Desta forma, pode-se considerar este sistema uma planta com características pedagógicas relevantes, no que diz respeito ao seu desenvolvimento e ao uso em aulas expositivas de Engenharia Elétrica.

O desenvolvimento deste experimento não foi uma tarefa fácil, durando cerca de dois anos. Mesmo a equipe tendo certa perícia no desenvolvimento de sistemas deste tipo, o projeto foi desafiador, pois cada componente do equipamento despendia certo grau de atenção e tempo. Para se ter uma idéia preliminar, a fabricação do eletroímã durou cerca de dois meses, entre a construção dos núcleos e o enrolamento das bobinas, sem contar o tempo que foi gasto no ajuste do controlador analógico, cerca de dois meses e meio. Além do mais, o projeto só obteve êxito devido ao empenho e dedicação da equipe.

As dificuldades encontradas ao longo do trabalho foram contornadas com criatividade e um bom planejamento. Por exemplo, a estrutura do equipamento foi desenvolvida pelos próprios alunos, o que de certa forma, diminuiu os custos do projeto. Outros pontos também podem ser citados sob este aspecto: as proteções do sensor, o planejamento do *layout* do painel, a forma que o eletroímã foi encaixado à estrutura, o uso de diferentes compensadores na malha do sistema, além de um modo de selecionar a estratégia de controle desejada.

Ao longo desta monografia serão apresentados os métodos e as diretrizes de construção utilizados na fabricação deste equipamento, denominado Bancada Didática MAGLEV, desenvolvido no Laboratório de Sistemas de Controle da UFPA, Campus de Tucuruí.

Sumário

1	Levitação Magnética	1
1.1	Introdução	1
1.2	A levitação magnética	1
1.3	Aplicações da levitação magnética	4
1.4	Sistema MAGLEV	7
1.5	Objetivos gerais e específicos do trabalho	8
1.6	Apresentação e divisão do trabalho	9
2	Modelagem matemática do Sistema MAGLEV	10
2.1	Introdução	10
2.2	Modelo matemático geral	11
2.3	Pontos de equilíbrio	13
2.4	Linearização do sistema MAGLEV	14
2.5	Função de Transferência	15
2.6	Conclusão	16
3	Aspectos construtivos	17
3.1	Introdução	17
3.2	Experiência com o primeiro protótipo MAGLEV	18
3.3	Considerações sobre a Bancada Didática MAGLEV	19
3.4	Eletroímã	21
3.5	Fontes de alimentação	24
3.6	Módulos da bancada	28
3.6.1	Módulo do Sensor	28
3.6.2	Módulo de Controle Analógico	32
3.6.3	Módulo de Controle Digital	34

3.6.4	Controlador Externo	40
3.6.5	Módulo de Seleção	40
3.6.6	Módulo de Acionamento	44
3.7	Painel de comando	45
3.8	Estrutura física	48
3.9	Conclusão	50
4	Projeto do controlador analógico da bancada	51
4.1	Introdução	51
4.2	Controladores PID	52
4.2.1	Variações do algoritmo PID	53
4.3	Projeto do controlador PID	56
4.3.1	Ensaio para sintonia do controlador	58
4.3.2	Determinação dos parâmetros do controlador	62
4.3.3	Considerações sobre o controlador analógico parametrizado	63
4.4	Conclusão	65
5	Conclusão	66
A	Projeto dos circuitos dos Módulos da Bancada	72
B	Diagrama de conexões	78
C	Programa do PIC16F628A para o Módulo de Seleção	81
D	Análise de custos - Relação de componentes	88

Lista de Figuras

1.1	Levitação por atração.	3
1.2	Ímã levitando sobre nitrogênio líquido refrigerado a temperatura de $-200^{\circ}C$ [53].	4
1.3	Trem MAGLEV.	5
1.4	Trem MAGLEV, modelo Japonês.	5
1.5	Linha em escala reduzida do protótipo MAGLEV Cobra, COPPE - UFRJ.	6
1.6	Estrutura do Sistema MAGLEV.	7
1.7	Protótipo MAGLEV construído na UFPA - Campus do Guamá [54].	8
1.8	Protótipo MAGLEV construído na UFPA - Campus de Tucuruí [14, 42].	8
2.1	Diagrama de forças do sistema.	11
3.1	Primeiro protótipo MAGLEV desenvolvido, em funcionamento.	18
3.2	Tipos de núcleo para o eletroímã [54].	21
3.3	Dimensões do carretel usado.	22
3.4	Núcleo do eletroímã - <i>ferrite</i>	22
3.5	Bobinas construídas para a bancada.	23
3.6	Diagrama de blocos da fonte.	25
3.7	Circuito esquemático da fonte de alimentação dos circuitos de comando e controle.	26
3.8	Fonte de alimentação dos circuitos de comando e controle.	26
3.9	Circuito esquemático da fonte de alimentação do eletroímã.	27
3.10	Fonte do atuador.	27
3.11	Diagrama de blocos dos módulos da bancada.	28
3.12	Circuito do sensor.	29
3.13	Sensor da Bancada MAGLEV.	30
3.14	Circuito do Módulo do Sensor.	30
3.15	Módulo do Sensor.	32
3.16	Circuito do Módulo de Controle Analógico.	32

3.17	Módulo de controle analógico.	34
3.18	Pinagem do microcontrolador PIC18F4520, 40 pinos, encapsulamento DIP.	34
3.19	Circuitos de condicionamento.	36
3.20	Pinagem do conversor D/A MCP4921.	37
3.21	Estágio de saída do MCP e do Módulo de Controle Digital.	37
3.22	Esquemático do circuito de comunicação serial RS-232.	38
3.23	Esquemático do circuito de gravação do PIC e pinagem do conector de cinco vias.	39
3.24	Módulo de Controle Digital.	40
3.25	Circuito esquemático do Módulo de Seleção.	41
3.26	Módulo de Seleção.	43
3.27	Circuito do Módulo de Acionamento.	44
3.28	Módulo de Acionamento.	45
3.29	Desenho do painel de comando.	46
3.30	Painel de comando da bancada.	47
3.31	Estrutura móvel.	48
3.32	Estrutura fixa.	49
3.33	Bancada.	49
3.34	Estrutura física montada.	49
3.35	Bancada Didática MAGLEV.	50
4.1	Diagrama de blocos de um sistema com um controlador PID básico.	53
4.2	Diagrama de blocos de um sistema com um controlador PI-D.	54
4.3	Diagrama de blocos de um sistema com um controlador I-PD.	55
4.4	Sistemas utilizando controladores a dois graus de liberdade.	56
4.5	LGR da planta MAGLEV, sem compensação.	57
4.6	Resposta do sistema para referências tipo senoidal e onda quadrada. Em que: y - sinal de posição do sensor, R.E - Referência Externa.	61
4.7	Resposta do sistema para referências do tipo senoide, com pequenas amplitudes, e seus respectivos espectros. Em que: y - sinal de posição do sensor, R.E - Referência Externa.	64
4.8	Resposta do sistema para referências do tipo senoide, com amplitudes altas, e seus respectivos espectros. Em que: y - sinal de posição do sensor, R.E - Refe- rência Externa.	64
4.9	Resposta do sistema para referências do tipo onda quadrada. Em que: y - sinal de posição do sensor, R.E - Referência Externa.	65

5.1	Bancada Didática MAGLEV em funcionamento.	66
5.2	Sistema em operação utilizando o Atuador 1.	67
5.3	Sistema em operação utilizando o Atuador 2.	67
5.4	Ajuste dos parâmetros do controlador PID analógico.	68
5.5	Circuito sugerido para automatizar o processo de gravação.	69

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros dos atuadores.	24
3.2	Parte da Tabela <i>AWG</i> para fios e cabos padrão (simplificada).	24
3.3	Especificações da fonte dos voltímetros.	28
3.4	Características do microcontrolador PIC18F4520.	35
3.5	Resistências dos circuitos da Figura 3.19.	36
3.6	Resistências do circuito da Figura 3.25.	43
4.1	Parâmetros encontrados no ensaio. Em que: A_m - amostra, i - corrente, x - posição, RE. - Referência Externa, A - Tensão de pico a pico e f - Frequência. . .	61
4.2	Valores das capacitâncias C_I e C_D , adotados para o controlador.	62
4.3	Valores das resistências R_P , R_D e R_I , variações máximas e mínimas.	62

Capítulo 1

Levitação Magnética

1.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma visão geral do fenômeno da levitação magnética, seu contexto histórico, as técnicas utilizadas para sua utilização e algumas aplicações práticas. Além disso, é apresentado o Sistema MAGLEV¹, o seu funcionamento e seus principais componentes, representados em um diagrama de blocos. Também são discutidos os objetivos do trabalho desenvolvido, com a finalidade de construir um equipamento adequado ao uso em sala de aula. Ao final é feita uma apresentação da estrutura da monografia.

1.2 A levitação magnética

A levitação magnética é um processo que consiste em manter um corpo magnetizável suspenso no ar, pela ação de força magnética em sentido contrário ao peso do corpo. O objetivo é estabelecer uma relação de equilíbrio, mantendo o corpo suspenso no ar sem que haja contato direto (forças de campo). Em geral, o efeito visual do fenômeno é intrigante e instiga a curiosidade da maioria dos observadores.

Ao aproximar dois ímãs, observa-se que os pólos iguais se repelem, enquanto que os pólos distintos se atraem. Desta maneira, pode-se supor que estas forças de campo, possam proporcionar levitação magnética. Em 1842 Samuel Earnshaw, estudando esse comportamento, provou não ser possível levitar um objeto utilizando combinações de ímãs permanentes [26]. A partir desse estudo, Earnshaw elaborou um teorema, o qual leva seu nome: “ [...] *objetos sob a influência de campos que aplicam forças com o quadrado da distância tendem a formar configurações*

¹Do inglês *Magnetic Levitation*.

de equilíbrio instável” [26, 54], o que torna impossível a levitação por ação de campos passivos [54].

A levitação magnética utilizando o eletroímã como elemento atuador, começou a ser realizada a partir de 1930, com os trabalhos de F. T. Holmes [30]. Holmes observou que o teorema de Earnshaw só poderia ser aplicado em sistemas cujo fluxo dos pólos magnéticos mantém-se constantes [30]. Portanto, utilizando um sistema que permita modificar a força magnética para compensar a força peso, poderia-se atingir as condições estáveis de equilíbrio. Utilizando a teoria de controle por realimentação, Holmes alcançou este objetivo, levitando o eixo de um rotor com massa de $6g$ [30], com o propósito de estudar o comportamento não-linear deste tipo de fenômeno.

A partir dos estudos de Holmes, os métodos utilizados para a levitação magnética foram aperfeiçoados, principalmente sob o aspecto dos Sistemas de Controle. Desde então, a levitação magnética passou a ser um atrativo para pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Diferentes técnicas e métodos para promover a levitação magnética foram desenvolvidos, os quais podem ser classificados segundo a natureza da origem das forças magnéticas em: levitação por repulsão ou por atração magnética. Outra técnica em ascensão é a levitação supercondutora (*Superconducting Quantum Levitation - SQL*), baseado no Efeito Meissner de exclusão do campo magnético do interior de supercondutores.

Levitação por repulsão

O método, também conhecido por levitação eletrodinâmica (*Eletrodinamic Levitation - EDL*), consiste na utilização de bobinas para gerar um campo magnético, provocando o aparecimento de uma corrente elétrica induzida em um condutor, devido à movimentação do campo em suas proximidades. Desta forma, pela Lei de Faraday-Lenz, esta corrente induzida deverá ter sentido contrário a da bobina indutora, gerando um campo magnético que se opõe ao campo criado pela bobina, provocando uma repulsão entre a bobina e o condutor. A interação entre os campos gera uma força de repulsão capaz de suspender o objeto [24, 54].

Levitação por atração

Também conhecida por levitação eletromagnética, EML (*Eletromagnetic levitation*), é aquela em que um corpo, de material ferromagnético, é mantido suspenso pela força atrativa de um eletroímã [17, 44]. A força atrativa é função da posição do objeto e da corrente na bobina do eletroímã.

No corpo atuam duas forças: a peso e a magnética. O equilíbrio entre elas resultará na levitação do corpo (Figura 1.1). Este equilíbrio é instável, logo, a levitação é impraticável sem um sistema de realimentação. Este processo é dependente da eficácia do sensor de posição e do controle da corrente do eletroímã. Portanto, para que esta técnica possa ser utilizada, torna-se necessário um *hardware* que possa manter o sistema estável. Este é o caso do sistema desenvolvido neste trabalho.



Figura 1.1: Levitação por atração.

Levitação Supercondutora

Nos últimos anos outro método vem sendo pesquisado em diferentes países, incluindo o Brasil. Esta nova metodologia é baseada no efeito Meissner de exclusão do campo magnético do interior de supercondutores, denominada Levitação Supercondutora (*Superconducting Quantum Levitation - SQL*) [24], Figura 1.2 .

Este fenômeno só pôde ser devidamente explorado a partir do final do século XX com o advento de novos materiais magnéticos e pastilhas supercondutoras de alta temperatura crítica, que se tornam supercondutoras a temperaturas muito mais elevadas que os supercondutores convencionais. Esta tecnologia vem sendo desenvolvida no Brasil, tendo como principal objetivo viabilizar a construção de um trem MAGLEV brasileiro [24].



Figura 1.2: Ímã levitando sobre nitrogênio líquido refrigerado a temperatura de $-200^{\circ}C$ [53].

1.3 Aplicações da levitação magnética

A tecnologia da levitação magnética encontra aplicação em diversos ramos da engenharia, especialmente em situações nas quais se deseja eliminar vibrações e atrito mecânico [54]. Em 1968, os americanos James R. Powell e Gordon T. Danby, do Laboratório Nacional de Brookhaven, patentearam a levitação magnética com o uso de bobinas supercondutoras para produzir campo magnético capaz de levitar trens [24].

Em 1987 o francês Georg Bednorz e o alemão K.A.Muller produziram uma cerâmica supercondutora de eletricidade, misturando bário, lantânio, cobre e oxigênio, viabilizando o uso da levitação magnética empregada ao transporte de massa ² [24].

Ao comprovarem a importância prática do fenômeno da levitação magnética, esses cientistas abriram campo para diversas aplicações: trens de alta velocidade que levitam sobre trilhos magnéticos; máquinas rotativas cujos eixos levitam ao girar; mon trilhos rápidos, projetados para serem o transporte de massa do século XXI [24].

Trem MAGLEV

Os trens MAGLEV apresentam-se hoje como eficazes meios de transporte, por serem rápidos, confortáveis e ecologicamente corretos. Países como Alemanha, Japão e Estados Unidos tem apostado nesta tecnologia [54].

²Transporte coletivo público.



Figura 1.3: Trem MAGLEV.

Com a tecnologia atual, torna-se cada vez mais viável o emprego dos Trens MAGLEVs em grandes metrópoles, proporcionando um meio de transporte rápido, confortável e seguro. Estes trens podem atingir a velocidade de até 580km/h [17], que somente é possível porque não existe contato entre a *guideway*³ e o veículo enquanto ele se movimenta, sendo o ar a principal fonte de resistência, problema que pode ser resolvido por ajustes aerodinâmicos. Ao contrário dos trens convencionais, os MAGLEVs não transportam unidades de propulsão, que se situam na *guideway*. Com isso, eliminam a necessidade de rodas, freios, motores e dispositivos para captar, converter e transmitir a energia elétrica. Conseqüentemente, os MAGLEVs são mais leves, silenciosos e menos sujeitos ao desgaste que os trens tradicionais [24].



Figura 1.4: Trem MAGLEV, modelo Japonês.

³Via exclusiva por onde o veículo MAGLEV trafega.

O projeto do Trem MAGLEV brasileiro, denominado MAGLEV Cobra, baseia-se na Levitação Supercondutora como técnica para promover a levitação [21]. Tem como objetivo o transporte urbano em grandes metrópoles, contudo ainda encontra-se em fase de desenvolvimento e pesquisa. Por se tratar de uma tecnologia recente, ainda não existem linhas de teste em escala real, embora exista o projeto de se construir uma linha em modelo reduzido, Figura 1.5.



Figura 1.5: Linha em escala reduzida do protótipo MAGLEV Cobra, COPPE - UFRJ.

Máquinas Rotativas: Mancais Magnéticos e Motores Mancais Magnéticos (MMM)

Usualmente, rotores girando são mantidos em suas posições por meio de mancais mecânicos. Nas últimas décadas, os mancais magnéticos têm sido utilizados para manter a posição radial de cargas girantes através de forças eletromagnéticas [32]. O uso desta tecnologia visa à levitação do eixo de máquinas rotativas com a finalidade de atenuar vibrações e diminuir as perdas por atrito mecânico, na intenção de aumentar a eficiência da máquina. Esta é uma das aplicações mais promissoras da levitação magnética, a qual permite que motores operem em altas velocidades sem que haja atrito ou desgaste dos eixos [54].

Sua principal aplicação é na substituição dos mancais mecânicos. Esta tecnologia, apesar dos altos custos e complexidade, possui crescente interesse devido às suas características singulares [32]. Os Mancais Magnéticos são empregados nas seguintes áreas:

- Industrias: motores de alta velocidade ou de difícil manutenção de mancais mecânicos;
- Bioengenharia: Bombas de sangue e corações artificiais;
- Aeroespacial: Giroscópio de satélites artificiais;
- Nuclear: Ultracentrífuga de enriquecimento de urânio.

1.4 Sistema MAGLEV

O sistema MAGLEV, proposto neste trabalho, apresenta um grau de liberdade ⁴ e segue o princípio da levitação por atração. Seu objetivo é compensar a força peso de um corpo, de material ferromagnético, por meio de uma força de atração gerada a partir da circulação de uma corrente elétrica na bobina de um eletroímã.

Esse sistema apresenta característica não-linear e é naturalmente instável, de modo que sua estabilização só pode ser atingida utilizando um mecanismo de controle por realimentação. Desta forma, um sensor realimenta o sinal de posição para um controlador que regula a corrente aplicada ao eletroímã (atuador).

Com base nesse princípio foi desenvolvida uma estrutura que consiste basicamente de três partes: eletroímã, sensor e um circuito de acionamento e controle. Para a fixação do eletroímã e do sensor foi construída uma estrutura que permite a substituição do eletroímã e ajustes na posição do sensor. Buscou-se reproduzir a configuração exemplificada na Figura 1.6 ⁵, desenvolvendo um sistema de baixo custo, usando recursos de *hardware* similares aos utilizados em outros trabalhos que seguem esta metodologia [15, 23, 54, 59, 60].

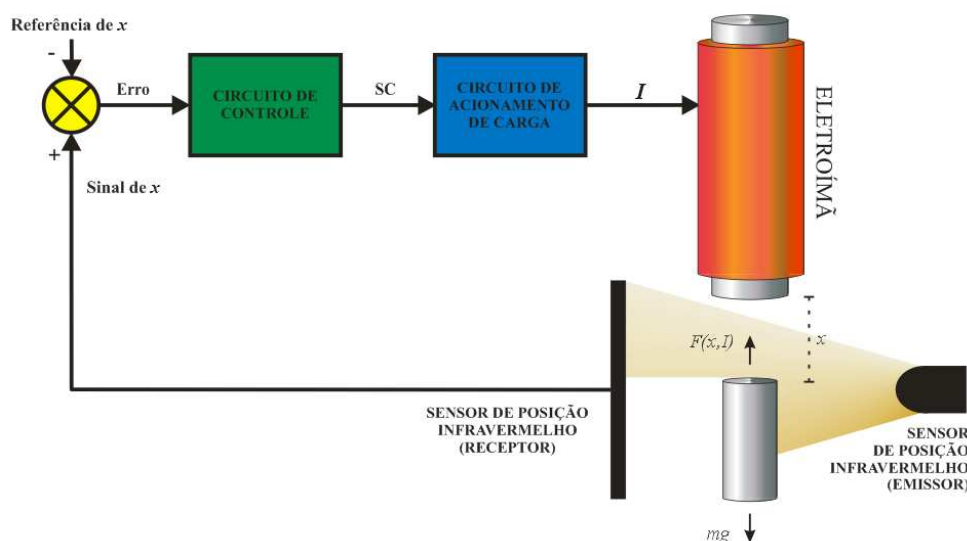


Figura 1.6: Estrutura do Sistema MAGLEV.

⁴Movimenta-se em apenas numa direção.

⁵Onde: x - posição do corpo, medida pelo sensor; $F(x,I)$ - força magnética; mg - força peso; SC - sinal de controle; I - corrente na bobina.

1.5 Objetivos gerais e específicos do trabalho

Há algum tempo, o MAGLEV tem sido objeto de estudos na Universidade Federal do Pará - UFPA. Em 2006, no Campus do Guamá - Centro Tecnológico, foi desenvolvido um protótipo deste processo na intenção de utilizá-lo em aplicações didáticas (Figura 1.7), porém sem êxito na estabilização do sistema [54]. Em dezembro do mesmo ano, no Campus de Tucuruí, iniciaram-se pesquisas sobre o tema, com o intuito de desenvolver outro protótipo (Figura 1.8). Somente um ano após seu início o projeto obteve êxito na sustentação de um corpo ferromagnético [14, 42] (no Capítulo 3 são apresentadas algumas considerações sobre esse projeto). Experiências semelhantes também são encontradas em trabalhos do exterior [38, 39], que se diferenciam pelo tipo de sensor e do acionamento do atuador.



Figura 1.7: Protótipo MAGLEV construído na UFPA - Campus do Guamá [54].



Figura 1.8: Protótipo MAGLEV construído na UFPA - Campus de Tucuruí [14, 42].

Este trabalho apresenta como objetivo geral a construção de um processo de levitação magnética baseado no Sistema MAGLEV, denominado *Bancada Didática MAGLEV*, que possa ser utilizado como apoio em aulas expositivas de Engenharia Elétrica. Esta planta apresenta-se como um equipamento *didaticamente adequado*⁶ ao uso em sala por professores interessados em enriquecer suas aulas e desenvolver pesquisa junto aos alunos. A utilização de uma *interface* simples e amigável, a viabilização do uso de diferentes técnicas de controle, assim como a possibilidade do uso de atuadores com características diferentes, faz desta planta um processo singular em relação aos outros protótipos já construídos.

Com relação aos objetivos específicos, são propostas: a consolidação de conhecimentos adquiridos ao longo da graduação; criação de uma cultura de inovação entre os discentes, centrada

⁶O termo didaticamente adequado é utilizado para designar as seguintes características: ser de simples manipulação e instalação pelo professor em sala de aula ou laboratório; permitir trabalhar os conceitos relativos ao tema; permitir a realização de medições e seu registro para posterior análise quantitativa.

no objetivo de desenvolver um equipamento; descrição do *hardware* desenvolvido, tornando esta monografia uma espécie de “ manual de instruções ” que possa permitir aos outros alunos, no futuro, reproduzir outras bancadas e fornecer a devida manutenção.

1.6 Apresentação e divisão do trabalho

Este capítulo apresentou os aspectos gerais do fenômeno da levitação magnética, suas características e aplicações. Também foram discutidas as particularidades do Sistema MAGLEV, com foco no desenvolvimento do equipamento proposto. Além disso, discutiram-se os objetivos gerais e específicos do trabalho.

Ao longo deste trabalho serão apresentadas as etapas de pesquisa necessárias à concretização da bancada: modelagem matemática do sistema de levitação magnética, construção do *hardware* e da estrutura da bancada, e o projeto de um controlador analógico. Por fim, é feita uma discussão sobre os resultados obtidos e propostas para trabalhos futuros, de acordo com a seguinte estrutura do texto:

Capítulo 2: Modelagem matemática do Sistema MAGLEV

Neste capítulo são mostrados resultados teóricos que permitiram melhor compreensão sobre o fenômeno, onde determinou-se as equações que regem o comportamento dinâmico do sistema e uma função de transferência geral a planta.

Capítulo 3: Aspectos construtivos

Apresenta os aspectos construtivos da Bancada Didática MAGLEV, construída com o propósito de realizar experimentos com levitação magnética.

Capítulo 4: Projeto do controlador analógico da bancada

Apresenta o projeto de um controlador analógico incorporado ao sistema, com a intenção de estabilizar o processo.

Capítulo 5: Conclusão

Faz uma avaliação dos resultados obtidos com o trabalho, sugerindo algumas melhorias para o projeto.

Capítulo 2

Modelagem matemática do Sistema MAGLEV

2.1 Introdução

A modelagem matemática de sistemas dinâmicos é um passo importante na análise de sistemas de controle, cuja finalidade é estabelecer uma relação matemática entre a entrada e a saída do sistema. Modelos matemáticos podem assumir diferentes formas. Entretanto, para este trabalho foi utilizada a representação por função de transferência, sendo assim, este capítulo trata da modelagem matemática do sistema de levitação magnética - MAGLEV.

A dinâmica dos sistemas pode ser apresentada sob a forma de equações diferenciais. Desta forma, partindo de princípios físicos fundamentais, as equações de movimento do sistema MAGLEV são desenvolvidas. O modelo, de característica não-linear, necessita do emprego da técnica de linearização, resultando em um modelo linear, que representa o sistema em torno de um ponto de equilíbrio. O motivo pela adoção do modelo linear tem base nas técnicas envolvidas para análise e projeto de controladores abordados durante a graduação.

Em seguida, é encontrada uma função de transferência representativa do sistema. A partir desta função é possível analisar a estabilidade do sistema, suas características dinâmicas e projetar controladores. Embora a modelagem matemática não seja o tema principal deste trabalho, ela é importante para entender qualitativamente o sistema e sugerir um primeiro projeto de controle.

2.2 Modelo matemático geral

A modelagem matemática do sistema MAGLEV é fundamentada nas leis da dinâmica. Feita uma análise dos sistemas de força que atuam sobre o corpo, identificam-se as forças aplicadas, reduzindo-se o sistema ao centro de massa do corpo, simplificando a análise de suas equações de movimento.

O sistema apresenta um grau de liberdade (movimenta-se apenas na direção vertical). Suas equações dinâmicas são determinadas a partir da aplicação da segunda lei de Newton ao sistema de forças. O resultado é um conjunto de equações que possibilita estabelecer o comportamento dinâmico do sistema.

O modelo é dito geral sob a ótica de não especificar uma função para a força magnética. Sua determinação pode ser dividida em duas etapas: a análise do diagrama de forças do sistema e a análise da força magnética.

Diagrama de forças

Considerando que o objetivo do sistema MAGLEV é sustentar um corpo metálico levitando no ar, é importante analisar as forças que atuam sobre o corpo. A figura 2.1 mostra estas forças agindo sobre um corpo levitante de forma cilíndrica (a geometria é apenas ilustrativa).

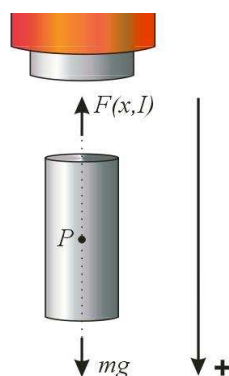


Figura 2.1: Diagrama de forças do sistema.

Sendo o corpo influenciado pela ação do campo gravitacional da Terra, a força peso p será proporcional à massa do corpo m e à aceleração da gravidade g , atuando na direção do centro da Terra.

Com o propósito de compensar a força peso, uma força magnética $F(x, I)$ de sentido oposto, é aplicada sobre o corpo. Esta força de atração é provocada por um campo magnético gerado a

partir da circulação de uma corrente $I(t)$ na bobina do eletroímã, desta forma, atraindo o corpo e mantendo-o a uma distância $x(t)$ do núcleo. A distância $x(t)$ é considerada entre o centro de massa do corpo e a base do núcleo do eletroímã. Portanto, considerando o ponto P como o centro de massa do corpo, Figura 2.1, é possível determinar a natureza do movimento com base na dinâmica de partículas [55].

Considerando a convenção utilizada nos trabalhos [54, 60], a força peso é positiva na direção indicada na Figura 2.1, enquanto que a força magnética é considerada negativa. Essa convenção vale também para a posição vertical do corpo em relação ao eletroímã, que é crescente quando a distância entre eles aumenta.

A esse sistema de forças é aplicada a segunda lei de Newton [55], produzindo a Eq.(2.1). O tempo t será omitido das equações daqui em diante.

$$m\ddot{x} = mg - F(x,I) \quad (2.1)$$

onde m é a massa do corpo, \ddot{x} é a derivada segunda em relação a t , g é a aceleração da gravidade e $F(x,I)$ é a força de interação magnética entre o imã e a massa, função da distância x e da intensidade de corrente elétrica I . A Eq.(2.1) pode ser dividida em duas equações de primeira ordem, através da inclusão da variável velocidade v , desta forma obtêm-se as Eqs. (2.2) e (2.3).

$$\dot{x} = v \quad (2.2)$$

$$\dot{v} = g - \frac{F(x,I)}{m} \quad (2.3)$$

Estas equações descrevem o modelo, em variáveis de estado, do processo MAGLEV.

Força magnética

A relação entre a força peso e a magnética, para a sustentação do corpo, é dada pela Eq. (2.1). Entretanto, ela foi apresentada de maneira genérica, sendo necessário estipular uma forma algébrica para a função $F(x,I)$ para a sua utilização prática.

Para esta finalidade, diversas expressões têm sido empregadas, como a Eq.(2.4).

$$F(x,I) = k \frac{I^2}{x^2} \quad (2.4)$$

que é uma formulação clássica para forças magnéticas [60]. Ela também é utilizada para determinação da força em um dispositivo eletromecânico elementar [5, 11]. Entretanto, ela possui limitações, pois quando $x \rightarrow 0 \Rightarrow F(x,I) \rightarrow \infty$, que não é observado na prática.

É proposta em [15] a utilização da Eq.(2.5) para a função $F(x,I)$.

$$F(x,I) = kI^2 e^{-x/a} \quad (2.5)$$

Outra forma adequada é dada pela Eq.(2.6), que é apresentada em [57].

$$F(x,I) = k \frac{I^2}{(x + \mu)^2} \quad (2.6)$$

em que, as constantes k e μ são características da interação magnética entre corpo e a bobina.

Todas as funções apresentadas satisfazem as observações do sistema real: a magnitude da força de magnética cresce com o aumento da corrente elétrica, admitindo $\partial F/\partial I > 0$, e diminui a medida que o corpo se afasta, admitindo $\partial F/\partial x < 0$. Contudo, as Eqs. (2.5) e (2.6) são de melhor utilização prática, pelo fato de a força magnética ser finita para $x = 0$.

2.3 Pontos de equilíbrio

Na análise de um sistema dinâmico, é importante identificar seus pontos de equilíbrio, como em estudos de bifurcação e caos [43].

O equilíbrio de um sistema dinâmico, descrito pela equação de estados $\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{u})$, é definido pelos valores \mathbf{y}_0 e \mathbf{u}_0 que satisfazem $\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{0} = \mathbf{G}(\mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0)$, em que: $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ e $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$ (sendo \mathbf{u} a entrada do sistema). Ou seja, são pontos cujos valores das variáveis de estado e entrada anulam a dinâmica do sistema. Aplicando esta condição às equações de estado do sistema MAGLEV, (2.2) e (2.3):

$$\dot{x} = v_0 = 0 \quad (2.7)$$

que é coerente, pois em equilíbrio o corpo estará em repouso. Para a Eq.(2.3) :

$$\dot{v} = g - \frac{F(x_0, I_0)}{m} = 0 \Rightarrow F(x_0, I_0) = mg \quad (2.8)$$

Demonstrando que o equilíbrio do sistema ocorre quando a força peso se iguala a força magnética, para um determinado ponto de operação (x_0, I_0) .

2.4 Linearização do sistema MAGLEV

Partindo da análise das equações que representam o sistema MAGLEV, observa-se que o modelo apresenta dinâmica não-linear, o que dificulta o seu tratamento matemático. Em muitos sistemas físicos há o envolvimento de relações não-lineares entre as variáveis, porém, se a operação ocorrer em torno de um ponto de equilíbrio e os sinais envolvidos forem pequenos, então é válida, pelo teorema de Peixoto [43], a aproximação por um sistema linear. Isto é importante porque a maioria das técnicas envolvidas no curso de graduação para analisar e projetar controladores são lineares.

A linearização é feita através da expansão em série de Taylor [46] dos termos não-lineares da equação diferencial $\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{u})$ em torno do ponto de operação. A Eq.(2.9) apresenta uma forma generalizada para a série de Taylor de uma função vetorial. Para se obter a aproximação linear trunca-se a série no segundo termo.

$$\mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) = \mathbf{G}(\mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0) + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{y}}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_0) + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{u}}(\mathbf{u} - \mathbf{u}_0) + \delta \quad (2.9)$$

Se for desprezada a influência dos termos de ordem superior, δ , pode-se aproximar a equação não-linear $\mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{u})$ por (2.10).

$$\Delta \mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) = \mathbf{A} \Delta \mathbf{y} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (2.10)$$

Onde:

$$\Delta \mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) = \mathbf{G}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) - \mathbf{G}(\mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0) \quad (2.11)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_0 \quad (2.12)$$

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_0 \quad (2.13)$$

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{y}} \right|_{\mathbf{y}=\mathbf{y}_0, \mathbf{u}=\mathbf{u}_0} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{B} = \left. \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{y}=\mathbf{y}_0, \mathbf{u}=\mathbf{u}_0} \quad (2.15)$$

onde os termos \mathbf{A} e \mathbf{B} (Eqs. (2.11), (2.14) e (2.15)) são geralmente utilizados para determinar os estados de um sistema linear invariante no tempo [46]. A notação $\partial \mathbf{G} / \partial \mathbf{y}$ significa matriz jacobiana.

Empregando a série de Taylor ao modelo do MAGLEV, Eqs. (2.2) e (2.3), e admitindo (x_0, I_0) como valores de equilíbrio de posição e corrente, obtém-se:

$$\Delta \dot{x} = \Delta v \quad (2.16)$$

$$\Delta \dot{v} = \lambda^2 \Delta x + k_0 \Delta I \quad (2.17)$$

em que λ e k_0 foram adotados apenas como forma de simplificar a Eq. (2.17), de modo que o termo quadrático (λ^2) surge após as interações das derivadas quando se lineariza a Eq. (2.3), onde:

$$\lambda^2 = -\frac{1}{m} \frac{\partial F(x_0, I_0)}{\partial x} \quad (2.18)$$

$$k_0 = -\frac{1}{m} \frac{\partial F(x_0, I_0)}{\partial I} \quad (2.19)$$

As Eqs. (2.16) e (2.17), são equações de estado linearizadas do sistema MAGLEV em torno do ponto de operação (x_0, I_0) . Através delas é possível obter a função de transferência, analisar estabilidade e projetar controladores.

2.5 Função de Transferência

A *função de transferência* de um sistema representado por uma equação diferencial linear invariante no tempo é definida como a relação entre a transformada de Laplace da saída e a transformada de Laplace da entrada, admitindo-se todas as condições iniciais nulas [46, 45].

Dessa forma, aplicando a transformada de Laplace às Eqs. (2.16) e (2.17):

$$s\Delta X(s) = \Delta V(s) \quad (2.20)$$

$$s\Delta V(s) = \lambda^2 \Delta X(s) + k_0 \Delta I(s) \quad (2.21)$$

$$\frac{\Delta X(s)}{\Delta I(s)} = \frac{k_0}{s^2 - \lambda^2} \quad (2.22)$$

A razão entre a saída e a entrada do sistema é dada pela Eq. (2.22), que representa a função de transferência genérica do sistema MAGLEV.

O modelo linear (2.22) é geral, sob o ponto de vista de não atribuir uma forma específica para a força magnética $F(x, I)$. No entanto, na Seção 2.2 foram mostradas algumas das possibilidades comumente utilizadas na literatura.

Para o sistema operando em regime permanente, um aumento da corrente I causa uma diminuição da posição x , comprovando que o sinal negativo de k_0 , Eq.(2.19), é aplicável. Esta relação entre as variáveis, x e I , sugere uma realimentação positiva à malha do sistema, além de um sinal de referência negativo, como exemplificado na Figura 1.6.

É também correto afirmar que a Eq.(2.22) possui pólos reais e distintos em $\pm\lambda$, pois admitiu-se que $\partial F/\partial x < 0$. A disposição dos pólos apresenta simetria, em relação ao eixo imaginário, comprovando a instabilidade do sistema. Além disso, o arranjo dos pólos pode sugerir a função de transferência do controlador, como será explorado no Capítulo 4.

2.6 Conclusão

Este capítulo propôs um modelo para o comportamento dinâmico do MAGLEV. Ele foi encontrado a partir da análise do diagrama de forças do sistema e do emprego da segunda lei de Newton. Foram também apresentadas algumas funções para a força magnética.

Foi feita uma análise do ponto de equilíbrio do sistema, a partir dos quais, pôde-se linearizá-lo através da expansão em série de Taylor. Então, foi proposta uma função de transferência geral, em que, a partir deste modelo pode-se projetar controladores simples.

A elaboração do modelo matemático é feita de forma sucinta, pois este não é o foco deste trabalho. Entretanto, as equações que regem o processo foram apresentadas de maneira genérica, facilitando o entendimento do fenômeno em questão.

Capítulo 3

Aspectos construtivos

3.1 Introdução

Um dos objetivos do uso de protótipos didáticos, em cursos de engenharia, é tornar o ensino mais prático. No entanto, a construção de tais protótipos vem proporcionando uma importante ferramenta didática no ensino de engenharia, visto que os alunos envolvidos com o projeto são iniciados a pesquisa científica e tem oportunidade de colocar em prática conhecimentos adquiridos em sala, à medida que o projeto evolui.

Seguindo esta metodologia, são apresentadas neste capítulo as características construtivas da Bancada Didática MAGLEV, desenvolvida com a finalidade de realizar experimentos com levitação magnética. As diretrizes de construção são baseadas no protótipo MAGLEV construído na UFPA - Campus de Tucuruí, sendo assim, é descrita a experiência da construção deste protótipo, o que propiciou conhecimento sobre o desenvolvimento de equipamentos deste tipo.

Foi sugerida a utilização de diferentes técnicas de controle na bancada. Para isso, fabricaram-se diversos circuitos de comando e controle, que foram divididos em módulos para facilitar a construção e a sua manutenção.

A interação do usuário com a bancada é realizada através de um painel de comando, facilitando o entendimento do processo, e possibilitando o controle do sistema através da introdução e adequação de controladores. Neste componente estão desenhadas as ligações dos controladores e de outros dispositivos do sistema.

Por fim, foi construída uma estrutura em madeira, com a finalidade de fixar os dispositivos (eletroímã, sensores e o painel) e acomodar os módulos.

3.2 Experiência com o primeiro protótipo MAGLEV

No final de 2006, uma equipe de alunos voluntários foi constituída com o objetivo de desenvolver um projeto de construção de um protótipo didático. Foi apresentada ao grupo a metodologia de criação de protótipos para ensino e pesquisa [8], além de alguns exemplos motivadores, como: [54] onde foi desenvolvido um protótipo de levitação magnética; [9] que construiu um pêndulo invertido; [16, 18] que mostram o desenvolvimento de um servomecanismo portátil e uma ferramenta computacional para dar suporte aos experimentos com ele.

A escolha de construir o MAGLEV partiu dos alunos, por se tratar de uma planta desafiadora em termos de pesquisa e aprendizagem. A partir daí, iniciaram-se os trabalhos que levaram a consolidação do primeiro protótipo MAGLEV [14, 42], Figura 3.1.

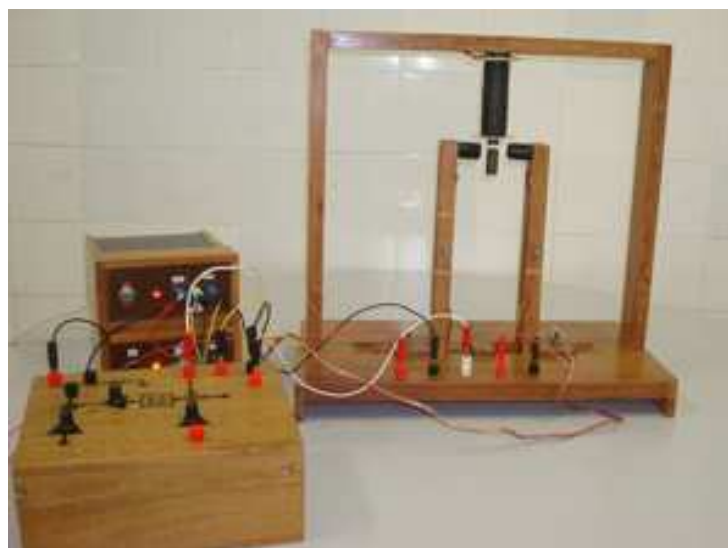


Figura 3.1: Primeiro protótipo MAGLEV desenvolvido, em funcionamento.

As principais diretrizes de construção foram motivadas por [23], onde um protótipo similar foi construído com a intenção de testar estratégias de controle para o processo de um TOKAMAK, que usa fusão termonuclear controlada por confinamento magnético de elementos leves em um reator. Uma característica mais didática ao projeto foi inspirada de [54], onde um sistema similar foi construído para uso em sala de aula na UFPA, porém, sem êxito no funcionamento.

Entretanto, as referências consultadas não enfatizavam o projeto da estrutura física, o que ofereceu uma certa dificuldade e exigiu um pouco de criatividade, pois se buscava um modo de acomodar o sensor e realizar ajustes em sua posição, além de acoplar o eletroímã e outros módulos.

Devido às características desafiadoras da planta, o desenvolvimento do protótipo envolveu várias áreas e disciplinas abordadas ao longo do curso. Durante o período de construção, cerca de dois anos, teve-se a possibilidade de consolidar conhecimentos adquiridos em sala de aula: circuitos elétricos, eletrônica, eletromagnetismo, controle, etc. Desse modo, a contribuição didática para os alunos envolvidos foi de grande valor, visto que a evolução do projeto coincidiu com o andamento do curso.

Outros resultados foram obtidos, dentre os quais podem-se destacar: o desenvolvimento do hábito de pesquisa, em particular por elementos além da grade curricular; o reforço de aspectos experimentais, como instrumentação e desenvolvimento de circuitos impressos. Destaca-se também a habilidade de planejar, em especial no momento em que foi necessário trabalhar a versatilidade do protótipo para manter o processo apto a receber outros circuitos de controle, além de deixar acessíveis pontos para medição de sinais.

De certa forma, o trabalho de iniciação científica desenvolvido, garantiu à equipe certo *know-how*¹ sobre o desenvolvimento de equipamentos deste tipo, além de uma visão do que é necessário para torná-lo mais adequado ao uso didático.

3.3 Considerações sobre a Bancada Didática MAGLEV

No desenvolvimento deste trabalho buscou-se reproduzir uma estrutura clássica de um sistema MAGLEV, semelhante à Figura 1.6, dotando-a de recursos para o uso em aulas presenciais, conforme a experiência relatada na Seção 3.2. No entanto, as sugestões de melhoria na estrutura e a limitação de ajustes do controlador, foram os principais fatores que levaram a construção da bancada, além da proposta de utilizar outros métodos de controle através de uma maneira mais versátil para a sintonia dos controladores.

A bancada possui um painel que possibilita o controle do sistema através de três estratégias diferentes, sendo duas incorporadas a própria bancada. O painel é feito de acrílico, ilustrando as ligações dos controladores, terminais para ligações externas e medição, indicadores de níveis de tensão e LEDs² demonstrando os recursos utilizados.

Como o curso de graduação aborda a teoria de controle contínuo, baseado em amplificadores operacionais, a bancada disponibiliza o uso deste tipo de estratégia. O compensador utilizado é do tipo PID³ e foi desenvolvido para proporcionar maior interação do usuário com a bancada.

¹Termo da língua inglesa, que significa: experiência, técnica, prática, perícia.

²Do inglês: *Light Emitting Diode*.

³PID: Proporcional - Integral - Derivativo.

Para isso, a modificação de seus parâmetros é feita através do chaveamento de capacitores e ajustes de potenciômetros disponíveis no painel.

Uma vez que o curso de graduação também contempla a teoria de controle discreto, a bancada permite aplicar este tipo de estratégia. Estão disponibilizados no painel (Figura 3.29), terminais que permitem a gravação de um programa em um microcontrolador PIC⁴ sem a necessidade de removê-lo (um esquema que é conhecido por gravação *in-circuit*), através da gravadora modelo PIKPROG2 disponível na faculdade. Também foi disponibilizado um terminal para a comunicação serial RS-232 do microcontrolador com um computador.

Para utilização de outros métodos de controle, a bancada dispõe de um bloco, no painel, denominado Controlador Externo (Seção 3.6.4). Ele disponibiliza ao usuário um terminal que fornece o sinal *ERRO*, proveniente do Módulo do Sensor (Seção 3.6.1), e outro conectado a entrada do módulo que aciona o atuador.

Para permitir que o sistema alterne entre os controladores, um circuito foi desenvolvido utilizando relés e um microcontrolador modelo PIC16F628 [2], de modo a selecionar e sinalizar a estratégia em utilização. Há também a possibilidade de utilizar sinais de referências ou perturbação, sendo que o sinal de referência é constante (incorporado ao circuito da bancada) e a perturbação um sinal externo.

Para simplificar e facilitar a fabricação dos circuitos, os amplificadores operacionais (*amp-op*) utilizados são modelos LM358 [37] e TL084 [56], que são encapsulamentos contendo dois e quatro amplificadores, respectivamente. Para proteção dos *amp-ops*, foram colocados diodos em cada entrada de alimentação (em todos os módulos que utilizam o dispositivo), um diretamente e outro reversamente polarizado, para protegê-los contra uma possível troca na ordem das fontes. Desta forma, nos terminais positivos dos circuitos haverá uma queda de aproximadamente 0,7V (devido aos diodos de proteção) o que dará uma tensão positiva em torno de 19,3V, denominada V_P .

Ao incorporar tantas funcionalidades, verificou-se que o circuito da bancada acabou se tornando muito complexo para o processo de fabricação de placas em uso na faculdade. Então, optou-se por desenvolvê-lo em módulos, facilitando o manuseio, fabricação e manutenção. O restante do capítulo descreve o funcionamento de cada um desses módulos, bem como outros componentes físicos da bancada (eletroímã, sensor, etc.).

⁴Atualmente é utilizado o modelo 18F4520 [4].

3.4 Eletroímã

O eletroímã é o elemento atuador do sistema MAGLEV e consiste de uma bobina com um núcleo ferromagnético. A bobina tem a função de gerar o campo responsável pela força de atração que age sobre o corpo, sendo esta controlada pela corrente que circula em seus enrolamentos. A finalidade do núcleo é concentrar as linhas de campo para se obter o melhor aproveitamento do fluxo magnético [49].

As linhas de fluxo de campo se assemelham aos pólos de um ímã. Deste modo, um corpo de material ferromagnético é magnetizado quando se aproxima da extremidade do eletroímã, surgindo nele uma força de atração [54].

Este dispositivo recebe atenção especial em alguns trabalhos. Por exemplo [29], que realiza pelo método de elementos finitos, uma análise do desempenho do eletroímã quando são consideradas dois tipos distintos de geometria do núcleo. Duas configurações para este elemento são vistos na Figura 3.2, em que “B” representa a geometria de núcleo envolvente e “A” a de núcleo envolvido.

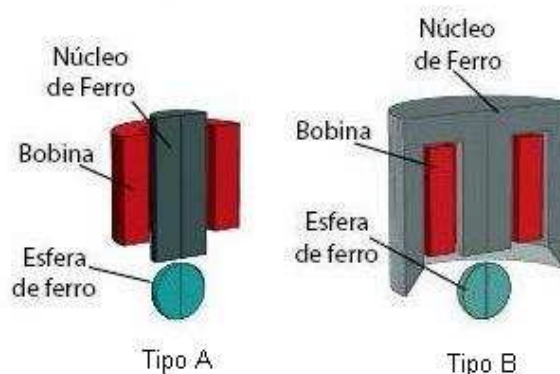


Figura 3.2: Tipos de núcleo para o eletroímã [54].

Características construtivas do eletroímã

No planejamento da bancada, foi proposta a construção de dois atuadores com características eletromagnéticas diferentes. Esses dispositivos têm o papel de alterar as propriedades dinâmicas da planta. A experiência no desenvolvimento do primeiro protótipo possibilitou uma melhor compreensão da escolha do material e da geometria dos eletroímãs. Sendo assim, buscou-se construir as bobinas de acordo com as apresentadas em [14, 23, 42].

Para a construção das bobinas, as espiras foram enroladas em um carretel de plástico, com o propósito de moldar e sustentar o enrolamento. Vale ressaltar que esta forma de construção, facilita testes de vários tipos de materiais ferromagnéticos para a constituição do núcleo, visto a praticidade de acoplamento com a bobina. As dimensões do carretel utilizado são indicadas na Figura 3.3.

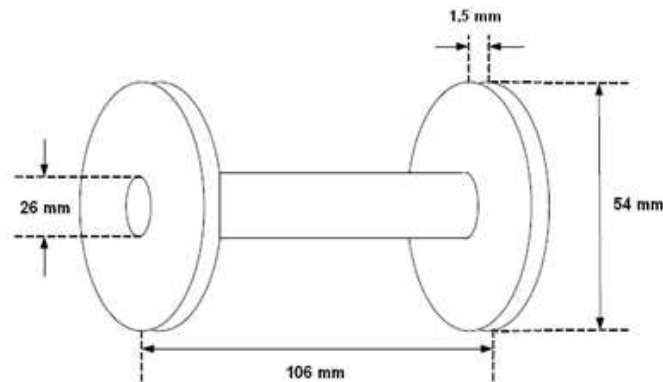


Figura 3.3: Dimensões do carretel usado.

Para constituir o núcleo, foi utilizado o material *ferrite* (Figura 3.4), por apresentar alta permeabilidade magnética [49]. A geometria escolhida foi o tipo “A” da Figura 3.2, devido à facilidade de construção. Esta forma possui apenas um bloco de material ferromagnético onde são enroladas as espiras.



Figura 3.4: Núcleo do eletroímã - *ferrite*.

As dimensões do núcleo foram escolhidas em função do carretel e da forma como o eletroímã foi fixado à estrutura. Para isso, em uma das extremidades foi fabricada uma rosca ⁵ (Figura 3.4), de modo que o imã pudesse ser removido quando necessário. Os atuadores resultantes são mostrados na Figura 3.5. O enrolamento do primeiro atuador foi envolvido por uma fita isolante, enquanto que o segundo foi envolvido por uma carcaça de plástico para proteção mecânica.

⁵Especificação técnica: rosca de 1/2" de diâmetro, tipo UNC - Rosca Grossa.

Outra característica importante da fabricação do eletroímã é a constante de tempo. O atuador deve trabalhar com uma constante de tempo pequena, pois ela está relacionada com o transitório da força magnética. Portanto, é importante que a resposta do atuador para as variações de corrente seja rápida. Por outro lado, é preciso conciliar este aspecto com uma indutância capaz de produzir uma força magnética que consiga levantar uma determinada massa. Imãs magneticamente “pesados” podem comprometer os resultados, como notado em [54].



Figura 3.5: Bobinas construídas para a bancada.

Portanto, buscou-se para o primeiro atuador aproximar o valor de indutância (L) e resistência (R) propostos em [14, 23, 42] a fim de se aproximar das respectivas constantes de tempo. Para o segundo eletroímã foi estipulado um valor de indutância superior, de modo que, ao se alternar entre esses dois elementos, haja a possibilidade de alterar as características do atuador. Sendo assim, são apresentados na Tabela 3.1 os parâmetros dos dois atuadores.

Nos enrolamentos das bobinas foi usado fio de cobre esmaltado de bitola 22 *AWG*. Ele foi utilizado, pois não havia nenhum fio de diâmetro maior no momento em que foi fabricada a bobina do eletroímã. Com base na Tabela 3.2, o fio mais adequado seria o 19 *AWG*, de acordo com a corrente máxima fornecida pela fonte de alimentação, que está em torno de 2A. Contudo, foi observado experimentalmente que o fio utilizado não prejudicou o desempenho do sistema e a estrutura das bobinas.

Tabela 3.1: Parâmetros dos atuadores.

Parâmetros	Eletroímã 1	Eletroímã 2
L	96 mH	350 mH
R	8,5 Ω	18 Ω
L/R	11,30 ms	19,45 ms
Número de espiras	96	346
Comprimento do Núcleo	140 mm	140 mm
Diâmetro do Núcleo	26 mm	26 mm

Tabela 3.2: Parte da Tabela *AWG* para fios e cabos padrão (simplificada).

Nº <i>AWG</i>	Secção (mm^2)	Resistência (Ω/km)	Capacidade (A)
18	0,82	20,73	2,50
19	0,65	26,15	2,00
20	0,52	32,69	1,60
21	0,41	41,46	1,20
22	0,33	51,50	0,92
23	0,26	56,40	0,73

3.5 Fontes de alimentação

No desenvolvimento da bancada decidiu-se construir uma fonte dedicada para o atuador e outra para os circuitos de comando, controle e sensores, assim como foi no primeiro protótipo. A fonte do atuador foi a que apresentou maior dificuldade de projeto, pois necessitava-se estabelecer uma configuração simples e de baixo custo para sua construção, que fornecesse uma potência elevada. Para os demais circuitos, a fonte de alimentação foi desenvolvida conforme a necessidade de alimentar os módulos, discutidos na Seção 3.6. Serão apresentados a seguir, os projetos desses dois componentes, divididos em: fonte de alimentação dos circuitos de comando e controle, e fonte de alimentação do eletroímã. Uma terceira fonte foi instalada na bancada para alimentar os voltímetros.

Fonte de alimentação dos circuitos de comando e controle

A fonte segue o padrão clássico de retificação, filtragem e regulação [51]. A Figura 3.6 mostra seu funcionamento sob a forma de diagrama de blocos.

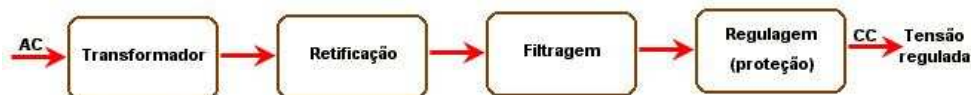


Figura 3.6: Diagrama de blocos da fonte.

A fonte utiliza os pólos do secundário do transformador, que fornece uma corrente máxima de $2A$, de modo a aproveitar os dois semiciclos da onda senoidal em um retificador de onda completa, de maneira a gerar um nível positivo e outro negativo de tensão DC em relação à derivação central do secundário do transformador. Foi utilizado um filtro capacitivo, em paralelo com o regulador de tensão, para transformar a tensão contínua pulsante, em tensão contínua com pequena ondulação.

O elemento de estabilização da tensão de saída é um CI⁶ regulador de tensão. No mercado existe uma série de dispositivos que exercem este papel, sendo os mais utilizados os das famílias 78XX e 79XX. Estes CIs reguladores são estabilizadores de tensão com limitação interna de corrente e compensação de temperatura, e podem fornecer vários níveis de tensão de saída. Os da família 78XX fornecem tensão de saída positiva, enquanto que os da família 79XX fornecem tensão de saída negativa [25, 35, 36].

Como existem diversos circuitos na bancada alimentados em diferentes níveis de tensão, a fonte possui cinco saídas: para a alimentação dos amplificadores operacionais há duas saídas reguladas em $+20V$ e $-10V$; a saída de $+20V$ também alimenta os sensores da bancada e outros pontos do circuito; para os microcontroladores e outros CIs, há uma saída de $+5V$; e uma em $+12V$ para o acionamento de relés de comando e alimentação das ventoinhas. A saída de $+9V$ seria utilizada para alimentar os voltímetros do painel, porém, foi observado em [47] que a fonte que alimenta este dispositivo não pode ser a mesma do circuito a ser medido, sendo assim, este ponto encontra-se disponível para uma posterior utilização. O circuito esquemático da fonte é apresentado na Figura 3.7.

A função dos capacitores de $100nF$ na saída dos CIs reguladores é eliminar pequenas variações de tensão. Para proteção dos reguladores, foi posto um fusível em série com cada saída de alimentação, de forma que a corrente não ultrapasse o valor máximo permitido pelo componente, cerca de $1A$ [35, 36]. A versão final do dispositivo é mostrada na Figura 3.8.

⁶Circuito Integrado.

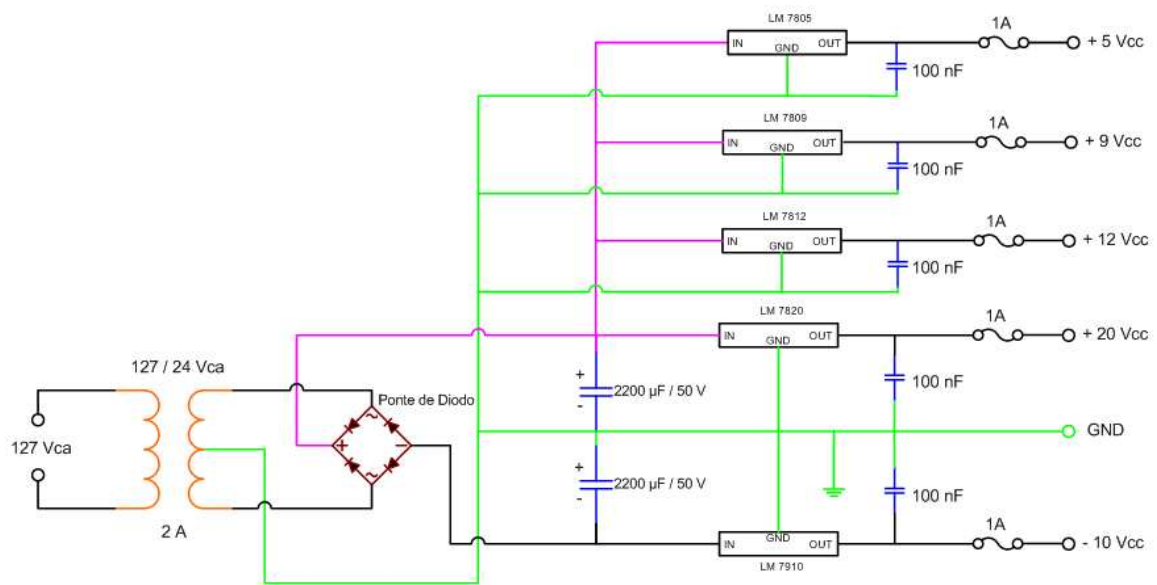


Figura 3.7: Circuito esquemático da fonte de alimentação dos circuitos de comando e controle.

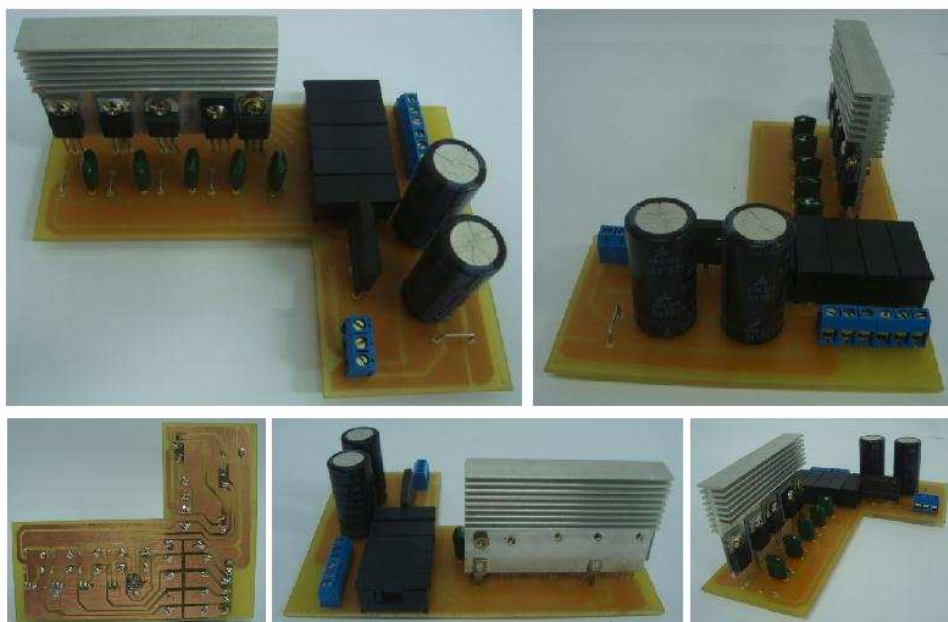


Figura 3.8: Fonte de alimentação dos circuitos de comando e controle.

Fonte de alimentação do eletroímã

Por ser um circuito que exige uma quantidade considerável de potência (em relação aos demais componentes), o eletroímã possui uma fonte de alimentação dedicada. Ela fornece para o atuador um nível de tensão de 20V. Seu funcionamento é semelhante ao da fonte de alimentação dos circuitos de comando e controle, exceto por utilizar dois CIs reguladores, modelo LM7824, em paralelo para fornecer uma corrente máxima de 2A. Mesmo utilizando um regulador de tensão para 24V, há uma queda de tensão devido à falta de robustez da fonte. A Figura 3.9 mostra o circuito esquemático da fonte do atuador, enquanto que a Figura 3.10 mostra a versão final do dispositivo.

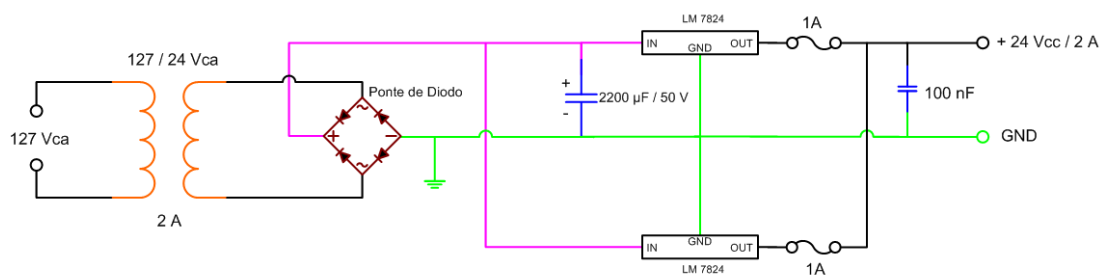


Figura 3.9: Circuito esquemático da fonte de alimentação do eletroímã.

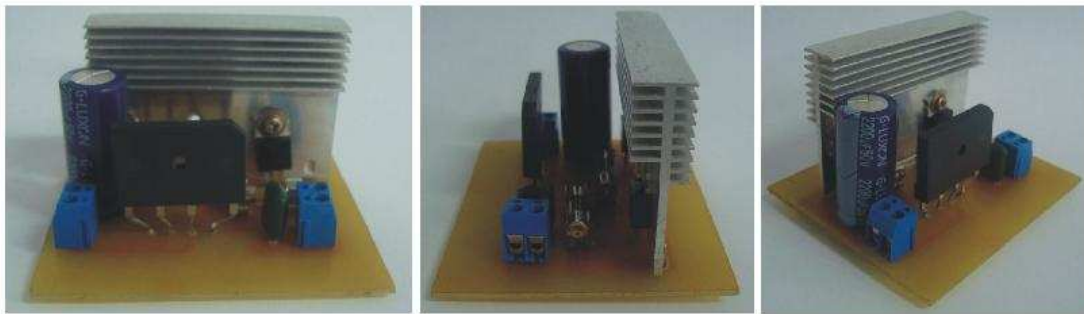


Figura 3.10: Fonte do atuador.

Fonte de alimentação dos voltímetros

Para alimentação dos voltímetros do painel, foi adaptada uma fonte de um carregador de celular. As especificações desta fonte são mostradas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Especificações da fonte dos voltímetros.

Entrada		Saída	
Tensão (V)	Corrente (mA)	Tensão (V)	Corrente (mA)
100 - 240	100	6,25	350

3.6 Módulos da bancada

Durante o planejamento da bancada, conforme discutido na Seção 3.3, percebeu-se que a versatilidade de suas funções exigia um *hardware* complexo, difícil de ser desenvolvido com os métodos de fabricação de circuito impresso utilizados na faculdade. Desta forma, o circuito foi dividido em módulos, que o torna mais simples e facilita sua manutenção.

A Figura 3.11 ilustra os vários processos da bancada. Os blocos foram agregados conforme semelhança de funções. Os circuitos foram desenvolvidos conforme esta divisão, sendo os seus projetos anexados no Apêndice A. Também está anexado ao trabalho, no Apêndice B, um diagrama de blocos indicando todas as conexões entre os módulos e o painel. Esta seção descreverá como funciona cada módulo e suas características de construção.

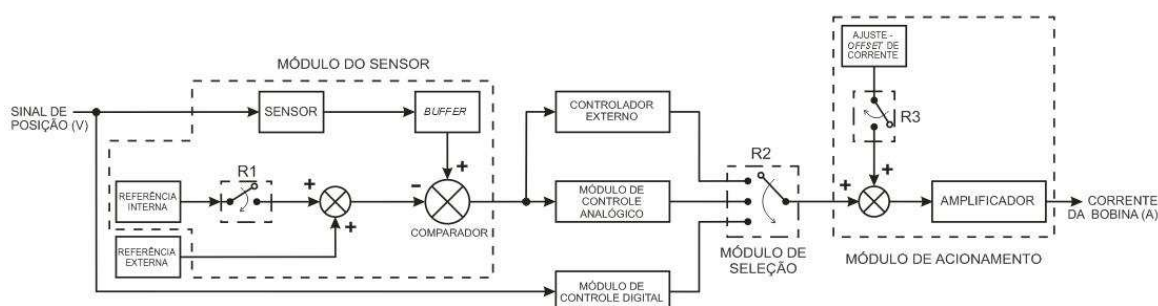


Figura 3.11: Diagrama de blocos dos módulos da bancada.

3.6.1 Módulo do Sensor

O Módulo do Sensor foi desenvolvido para fazer o condicionamento do sinal de posição, para fornecer ao controlador uma forma de onda em conformidade ao que ocorre no sistema. O circuito desenvolvido para o módulo foi dividido em dois estágios, conforme o tratamento do sinal: sensor e comparador.

Sensor

O sensor é o elemento responsável por informar, através de uma tensão elétrica equivalente, a posição do corpo em relação ao núcleo do imã sem que haja contato direto. Esse elemento exige uma atenção especial, por ser responsável por fechar a malha de controle.

Existem diferentes tipos de sensores para esta aplicação, os quais diferem nas características de construção e o princípio de funcionamento [33]. Pode-se destacar, dentre esses diferentes tipos: sensores capacitivos, indutivos, ultra-sônicos, ópticos e de efeito Hall.

Os mais comuns em trabalhos de baixo custo, são os sensores ópticos [14, 23, 42, 54, 60], especialmente pela eficácia e simplicidade. Neste tipo de sensor o corpo interrompe uma parcela da luz gerada por uma fonte luminosa (parte transmissora). Desta forma, a quantidade de luz incidente sobre a parte receptora é função da distância entre o corpo e o eletroímã. O sensor de posição utilizado na Bancada Didática MAGLEV utiliza este tipo de princípio, e é constituído de dois elementos de material semicondutor: um LED (emissor) e um fototransistor (receptor).

O emissor é um LED infravermelho, modelo *TIL32*. O receptor é um transistor bipolar infravermelho modelo *TIL78*, encapado em uma cobertura transparente para que a luz possa atingir a base coletora da junção. Nesse elemento a resistência é reduzida quando a luz, em uma apropriada frequência, brilha na junção base-coletor.

O fototransistor é o componente responsável por gerar um sinal elétrico, proporcional a quantidade de luz que incide sobre sua base, estabelecendo uma relação entre a posição do corpo e a corrente I_E , conforme a Figura 3.12. A distância entre o corpo e o imã permite maior ou menor passagem de luz, proporcionando mais ou menos corrente no circuito de condicionamento. Um aumento na corrente I_E , decorrente da queda do corpo, ocasiona um aumento de tensão sobre o resistor de $100\text{ k}\Omega$. Esta tensão, rotulada y , é o sinal informado ao circuito de controle, como mostra a Figura 3.12.

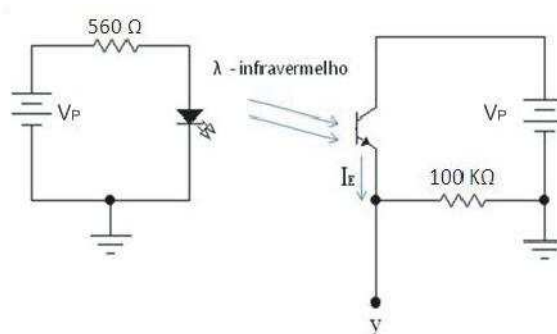


Figura 3.12: Circuito do sensor.

Para amenizar a influência de outras frequências da luz, uma proteção com material negro foi confeccionada envolvendo o receptor e o transmissor. Essa proteção consiste em dois tubos de 2,5cm de comprimento e 1/2" de diâmetro, acoplados à estrutura como mostra a Figura 3.13.

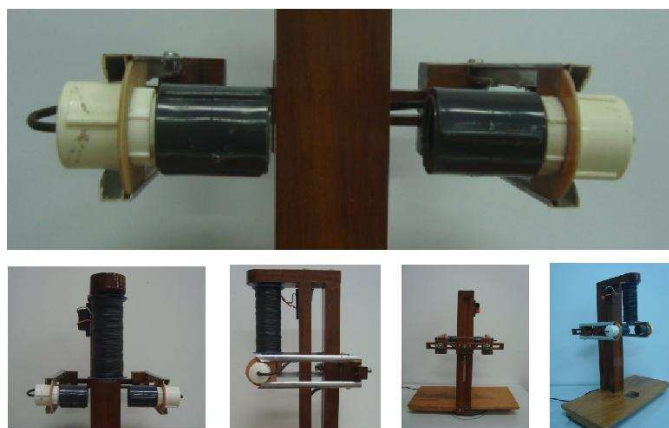


Figura 3.13: Sensor da Bancada MAGLEV.

Após a instalação das proteções, o sensor se mostrou mais robusto. Também foi utilizado um cabo coaxial na ligação do sensor com o outro estágio do módulo, o que produziu um sinal de posição menos susceptível as possíveis interferências.

Comparador

O outro estágio do módulo é composto por um circuito comparador [48, 51]. Seu papel é retirar o *offset* de tensão proveniente do sensor, informando ao controlador quando o corpo flutuante está acima ou abaixo da posição de referência. O circuito desse módulo foi fabricado conforme o esquemático mostrado na Figura 3.14.

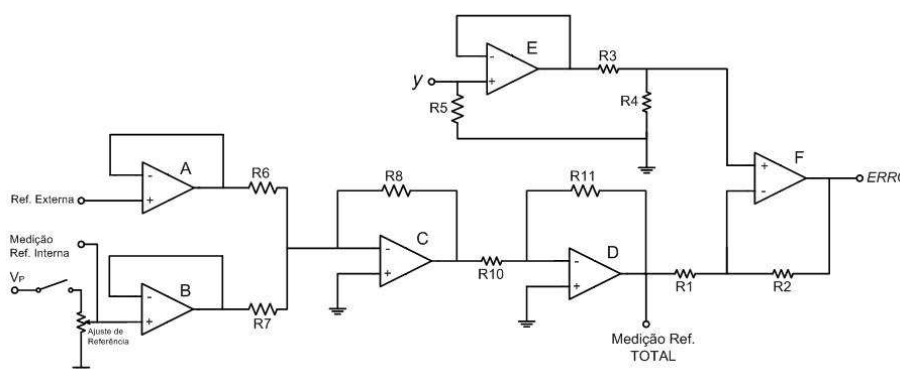


Figura 3.14: Circuito do Módulo do Sensor.

Conectado ao terminal não-inversor do *amp-op* do comparador (F), há um *buffer* (E) [51]. Este estágio tem por função apenas isolar a impedância do circuito de controle da impedância do sensor de posição. Ele se faz necessário, pois foi comprovado experimentalmente que a impedância do circuito de controle influenciava o sinal y proveniente do sensor. Idealmente, este estágio não realiza nenhuma operação.

O terminal inversor do comparador é conectado a uma rede de *amp-ops* (A, B, C, D) responsáveis pelo condicionamento dos sinais de referência. Um somador inversor (C) recebe os dois sinais de referência, um interno e outro externo ao circuito. Um amplificador inversor de ganho unitário (D) é utilizado apenas para inverter o sinal.

A referência interna faz-se necessária para estabelecer uma posição de referência para o corpo flutuante (*offset* de posição). Ela foi incorporada ao módulo a partir de um potenciômetro, ligado como um divisor de tensão ao terminal de tensão positiva do circuito. A leitura do sinal de referência é realizada por um voltímetro instalado no painel de comando.

O outro terminal de referência permite que um sinal externo, por exemplo, proveniente de um gerador de função possa ser utilizado no processo como perturbação ou para rastreamento. A saída do circuito (sinal *ERRO* da Figura 3.14) pode ser representada pela Eq. (3.1).

$$ERRO = y - \left(R.E + \frac{R_x}{R_a} V_P \right) \quad (3.1)$$

em que: $R.E$ é o sinal de perturbação (Referência Externa); R_x/R_a é a fração de resistência do potenciômetro conforme o ajuste; e V_P é a tensão aplicada ao potenciômetro R_a , equivalente a alimentação positiva dos *amp-ops* da bancada.

O usuário pode habilitar e desabilitar a referência interna sempre que desejar, através de uma chave que se encontra no painel. Adicionalmente, poderá medir o valor da Referência Total (conforme Figura 3.14), caso selecionada, por meio de um terminal também presente no painel. A versão final do módulo é mostrada na Figura 3.15.

A Referência Externa, quando não estiver em uso, **deve ter seu terminal aterrado** através de um *jumper*, feito no próprio painel (Seção 3.7). Isto é necessário, pois, verificou-se que quando este procedimento não é realizado, surge uma tensão de 18V no terminal de saída do *buffer* que isola este ponto (*amp-op* A do circuito da Figura 3.14), que leva a um valor de referência de posição incorreto.

Todos os resistores do circuito da Figura 3.14 são de $10k\Omega$, exceto $R5$, que é o mesmo resistor de $100k\Omega$ da Figura 3.12. O resistor de 560Ω (Figura 3.12) também está incorporado ao circuito, na placa do módulo.

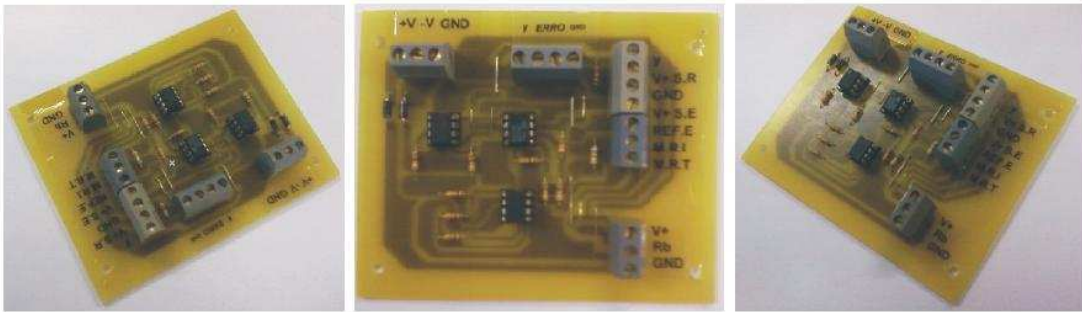


Figura 3.15: Módulo do Sensor.

3.6.2 Módulo de Controle Analógico

Este módulo foi desenvolvido para proporcionar a maior interação do usuário com a bancada. Isto é justificado pelo fato do enfoque contínuo, baseado em amplificadores operacionais, ser um assunto tratado no curso de graduação da faculdade. Desta forma, os alunos que interagirem com a bancada terão a oportunidade de colocar em prática conhecimentos adquiridos nos cursos teóricos.

A ação de controle contínua desenvolvida é do tipo PID [46, 45, 52]. Este controlador consiste da união de três estratégias de controle, permitindo atuar no transitório e regime permanente da resposta de forma independente. Um enfoque mais detalhado sobre este tipo de controlador será abordado no Capítulo 4.

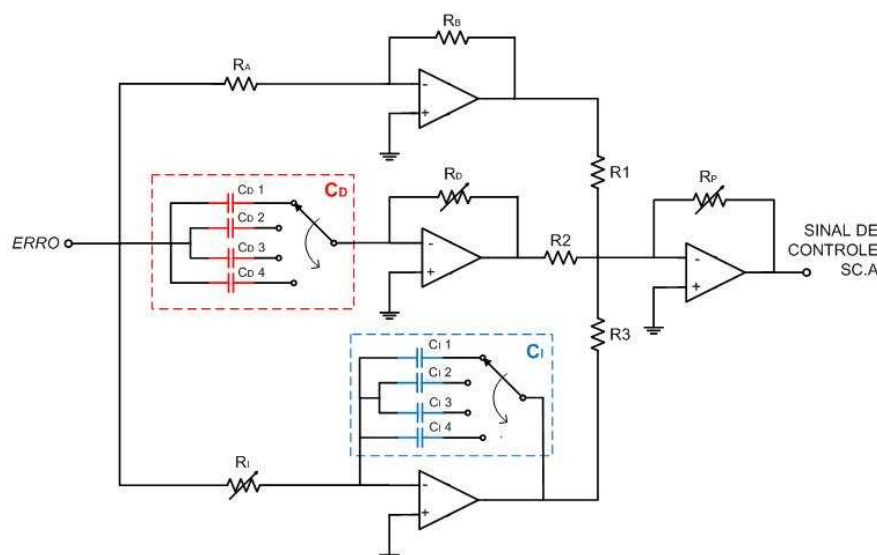


Figura 3.16: Circuito do Módulo de Controle Analógico.

Os ajustes do controlador são promovidos através de elementos dispostos no painel, a partir da alteração dos valores de capacitâncias e resistências, ilustrados no circuito da Figura 3.16. Os capacitores C_I e C_D estão ligados a uma chave seletora, de forma que, cada posição dessa chave seleciona um valor de capacitância diferente. Esses valores foram determinados experimentalmente, como relatado no Capítulo 4.

A Eq. (3.2) representa a função de transferência do circuito da Figura 3.16.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_P}{R} \left[\frac{R_B}{R_A} + (R_D \cdot C_D)s + \frac{1}{(R_I \cdot C_I)s} \right] \quad (3.2)$$

onde: $U(s)$ e $E(s)$ representam a transformada de Laplace dos sinais de controle (SC.A) e *ERRO*, respectivamente; $R = R_1 = R_2 = R_3 = 10k\Omega$; $R_A = R_B = 1k\Omega$. Os valores dos demais resistores e dos capacitores são comentados no Capítulo 4.

Analisando o circuito da Figura 3.16 e a Eq. (3.2), pode-se estabelecer que:

- O ganho proporcional (K_P) do controlador é regulado através do resistor variável R_P , que realimenta um circuito somador. Este elemento, na verdade, regula um ganho global para o circuito em questão, não interferindo apenas na parte proporcional. Um amplificador de ganho unitário foi incluído no circuito, a partir dos resistores R_A e R_B , de forma que o sinal *ERRO* alcance o estágio do somador sem interferências;
- A ação derivativa é feita a partir de um circuito ativo [46, 48, 51], a partir do amplificador operacional em que estão conectados o resistor variável R_D e os capacitores representados por C_D ;
- Um circuito integrador [46, 48, 51] promove a ação integral através de um amplificador operacional em que estão ligados os capacitores representados por C_I e o resistor variável R_I .

O Módulo de Controle Analógico foi fabricado conforme o circuito da Figura 3.16, sua versão final é mostrada na Figura 3.17.

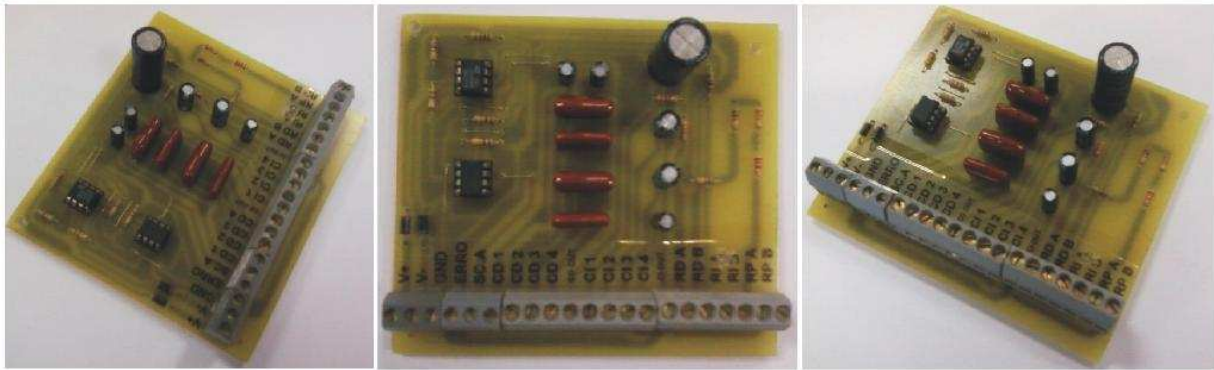


Figura 3.17: Módulo de controle analógico.

3.6.3 Módulo de Controle Digital

O Módulo de Controle Digital permite a utilização de técnicas de controle discreto na bancada. Para isto, foi desenvolvido um *hardware* que realiza diferentes funções: conversão A/D e D/A (Analógico-Digital e Digital-Analógico, respectivamente), comunicação serial e gravação do microcontrolador.

O microcontrolador utilizado é da família PIC, modelo PIC18F4520 [4], cujo diagrama de pinos é ilustrado na Figura 3.18. Algumas de suas características são mostradas na Tabela 3.4[4].

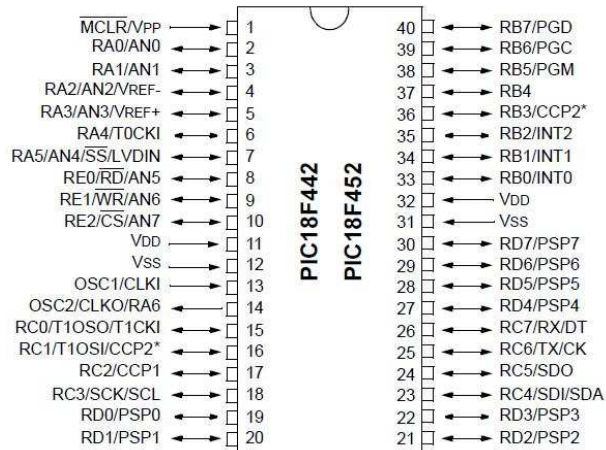


Figura 3.18: Pinagem do microcontrolador PIC18F4520, 40 pinos, encapsulamento DIP.

Tabela 3.4: Características do microcontrolador PIC18F4520.

Frequência operacional	- DC 40 MHz
Memória de programa (Bytes)	- 32K
Memória de programa (instruções)	- 16384
Memória de dados (Bytes)	- 1536
Memória de dados EEPROM (Bytes)	- 256
Módulos de Captura/Comparação/PWM (CCP)	- 2
Fontes de interrupção	- 18
Portas I/O	- Portas A, B, C, D, E
Timers	- 4
Comunicação seri;	- MSSP, Addressable e USART
Comunicação paralela	- PSP
Módulo A/D 10-bits	- 8 canais de entrada

Conversão A/D e D/A

O conversor A/D do PIC tem o papel de amostrar os sinais de posição do sensor (sinal y da Figura 3.14) e de tensão no resistor de potência do Módulo de Acionamento (R_{POT} , Figura 3.27). Os sinais podem ser digitalizados em uma faixa com resolução de 10 bits, ou seja, 1024 níveis. O período de amostragem pode ser ajustado em *software* através de contadores de tempo internos do PIC.

A faixa de conversão A/D do PIC varia na escala 0 – 5V. Entretanto, os sinais da planta variam em uma faixa bem mais ampla, cerca de 0 – 19,4V para o sinal de posição, e 0 – 6,6V para a tensão em R_{POT} . Assim, torna-se necessária a utilização de um circuito que faça o condicionamento desses sinais para a faixa de conversão do PIC.

Os circuitos que realizam esta tarefa foram construídos utilizando *amp-ops*, em circuitos do tipo comparador [48, 51]. Eles são mostrados na Figura 3.19.

O sinal de posição (y), ao passar pelo circuito (em que estão os *amp-ops* A e B), reduz para uma faixa que varia de 0 – 4,67V. Da mesma forma, é feito o condicionamento do sinal de tensão em R_{POT} , que ao passar pelo circuito condicionador (em que estão os *amp-ops* C e D) é rebaixado para uma faixa que varia de 0 – 5V⁷.

⁷Foi observado, experimentalmente, que este sinal pode chegar até 5,2V para uma tensão de 6,8V em R_{POT} , que surge quando o *offset* de corrente é máximo (19,4V) sem o equilíbrio do corpo.

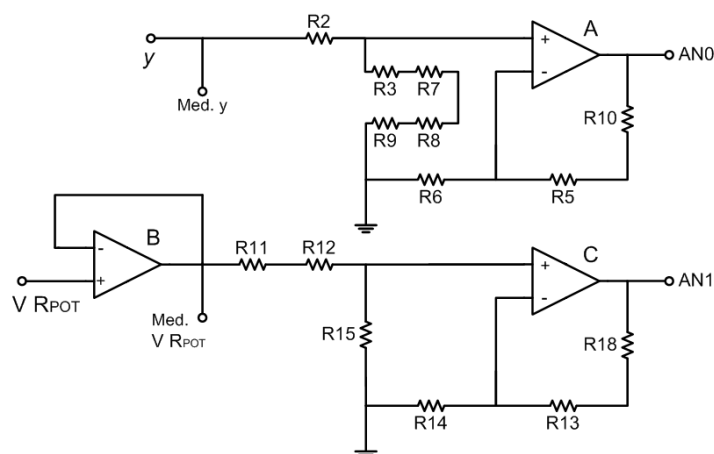


Figura 3.19: Circuitos de condicionamento.

As saídas destes circuitos estão conectadas aos canais AN0 e AN1 do PIC, respectivamente. Também há dois pontos (Med. y e Med. V_{RPOT}) utilizados para medição destes sinais, os quais estão disponíveis no painel (Seção 3.6.5). A Tabela 3.5 mostra os valores das resistências do circuito da Figura 3.19.

Tabela 3.5: Resistências dos circuitos da Figura 3.19.

Resistor	Ω	Resistor	Ω	Resistor	Ω
$R2$	68 k	$R8$	560	$R13$	2 k
$R3$	1 k	$R9$	100	$R14$	1 k
$R5$	2 k	$R10$	2 k	$R15$	1 k
$R6$	620	$R11$	4,7 k	$R18$	2 k
$R7$	1,2 k	$R12$	1 k	-	-

A conversão D/A é realizada pelo CI MCP4921[41]. Trata-se de um conversor D/A de 12 bits, que utiliza comunicação serial em 16 bits do tipo SPI⁸, que pode ser facilmente gerada em *software* por funções internas do PIC e compiladores.

A saída do MCP varia em uma faixa de 0 – 5V. Desta forma, torna-se necessário um amplificador para elevar o estágio de saída para a faixa 0 – 19V. Este amplificador foi desenvolvido a partir de um *amp-op* (na configuração não-inversora), com ganho 3,4V/V. Este ganho pode ser ajustado através de um trimpot ($RV2$) instalado no circuito da Figura 3.21.

⁸Serial Peripheral Interface [4].

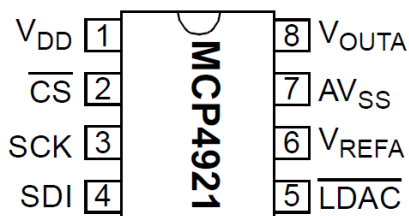


Figura 3.20: Pinagem do conversor D/A MCP4921.

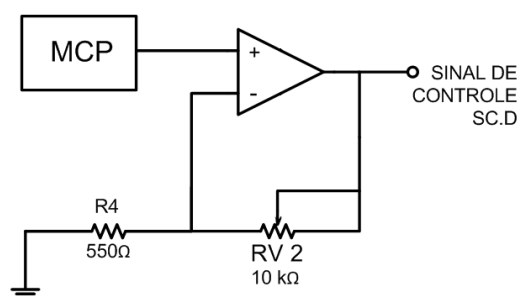


Figura 3.21: Estágio de saída do MCP e do Módulo de Controle Digital.

Comunicação serial RS-232

Uma transmissão serial (bit-serial) converte a mensagem em um bit por vez através de um canal. Cada bit representa uma parte da mensagem. Estes bits individuais são rearranjados em seu destino para compor a mensagem original. Desta forma, num canal irá passar apenas um bit por vez [13].

O padrão de comunicação serial RS-232⁹ especifica: as tensões, temporizações e funções dos sinais; um protocolo para troca de informações; e as conexões mecânicas [13]. Este padrão é utilizado para transmissão de dados entre o PIC e o PC¹⁰, promovida pelo módulo USART¹¹ do microcontrolador PIC [4]. A USART utiliza os pinos TX e RX (Figura 3.18) para realizar a comunicação. Após a configuração desses pinos, via *software*, eles não podem mais ser utilizados como pinos de E/S (Entrada e Saída) digitais [1, 4, 54].

Como a maioria dos equipamentos digitais utiliza níveis TTL¹² ou CMOS¹³ (0–5V), torna-se necessário o uso de um CI para converter o sinal em níveis RS-232 (lido pelo PC) e vice-versa. Para isto é utilizado o CI MAX232 [40], que é capaz de gerar tensões que variam de +10V a –10V a partir de uma fonte de alimentação de +5V e capacitores externos [1, 8, 12, 13] (Figura 3.22), estabelecendo a compatibilidade entre o padrão TTL/CMOS e o RS-232. O conector utilizado para a conexão serial da bancada com o PC é do tipo DB9 (Figura 3.22, que ilustra apenas os pinos utilizados).

⁹RS é uma abreviação de *Recommended Standard*, que é a padronização de uma interface comum para comunicação de dados entre equipamentos, criada no início dos anos 60, pelo comitê conhecido atualmente como *Electronic Industries Association* (EIA) [13].

¹⁰Do inglês: Personal Computer.

¹¹*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*.

¹²*Transistor-to-Transistor Logic*.

¹³*Complementary Metal Oxide Semiconductor*.

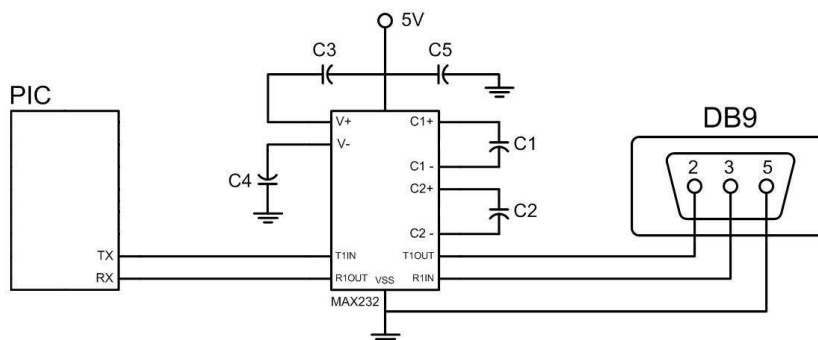


Figura 3.22: Esquemático do circuito de comunicação serial RS-232.

Gravação do microcontrolador

Atualmente, a programação de microcontroladores PIC foi bastante simplificada através da utilização de compiladores em linguagem C, que permitem que o código hexadecimal (a ser gravado) seja gerado a partir de uma linguagem de alto nível.

O compilador C utilizado foi o CCS PCW [50]. O programa para este módulo é explicado em [22], que trata especificamente do projeto de controladores e modelagem do sistema da bancada. No presente trabalho são apenas apresentadas as características construtivas e operacionais do módulo.

Uma das importantes funções do Módulo de Controle Digital é a possibilidade de gravação do programa no PIC sem a necessidade de removê-lo da bancada, utilizando um terminal que permite a conexão deste módulo com um gravador modelo PIKPROG2.

Para realizar a gravação, o PIC utiliza o modo MSSP¹⁴ operando no modo SPI [4]. Este modo permite que dados de 8 bits sejam sincronamente transmitidos e recebidos simultaneamente. Esta comunicação é tipicamente realizada por três ou quatro pinos do PIC [4]:

- Serial Data Out (SDO) - RC5/SDO;
- Serial Data In (SDI) - RC4/SDI/DAS;
- Serial Clock (SCK) - RC3/SCK/SCL/LVDIN.
- Slave Select (SS) - RA5/SS/AN4.

O quarto pino (SS) pode ser usado quando o modo de operação SLAVE¹⁵ for selecionado.

¹⁴Master Synchronous Serial Port.

¹⁵Escravo.

Para iniciar a gravação, o gravador fornece uma tensão de 12V no pino V_{PP} , que é ligado ao pino MCLR do PIC, ativando o modo de programação [27]. Durante o processo, outros pinos passam a ser usados [27]:

- RB7 - Comunicação bidirecional, para gravar e ler os programas;;
- RB6 - Pino de clock;
- V_{DD} - 5V;
- V_{SS} - GND.

Um circuito para realizar esta operação é sugerido em [27], que recomenda isolar o microcontrolador do resto do sistema no momento em que ocorre a gravação, utilizando para isso dois resistores. Estes resistores podem ser substituídos por interruptores (ou *jumpers*), que durante a gravação do programa devem estar abertos [27].

No circuito do módulo, este procedimento é feito por um relé, que comuta entre a alimentação do circuito e da gravadora (pino V_{DD} , Figura 3.23), além do pino MCLR do PIC. Este relé é comandado pelo Módulo de Seleção (Seção 3.6.5), de modo que no momento da gravação comuta para a alimentação da gravadora, “isolando” o microcontrolador do restante do sistema.

O esquemático do circuito que realiza a gravação é mostrado na Figura 3.23¹⁶. No bloco CONTROLADOR DIGITAL do painel (Figura 3.29), é disponibilizado o terminal que conecta o módulo a gravadora, denominado ISP¹⁷. Contudo, na fabricação da PCI¹⁸ foi utilizado um conector de cinco vias (Figura 3.23).

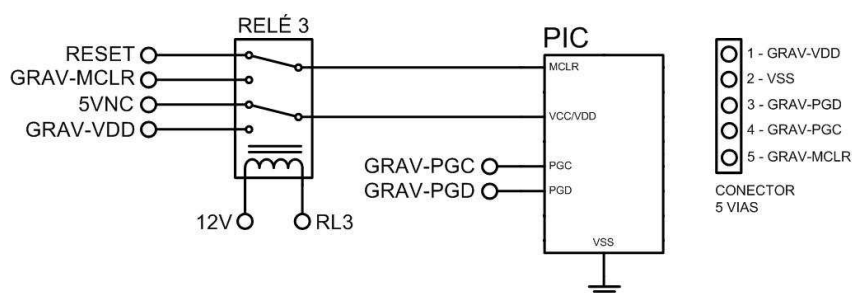


Figura 3.23: Esquemático do circuito de gravação do PIC e pinagem do conector de cinco vias.

¹⁶Todos os conectores cuja nomenclatura apresenta o prefixo “GRAV” são referentes às conexões da gravadora.

¹⁷In System Programming.

¹⁸Placa de Circuito Impresso.

Todos os esquemáticos apresentados nesta seção (Figuras 3.19, 3.21, 3.22 e 3.23) fazem parte de um circuito maior, que teve seu esquemático omitido devido a sua complexidade. Porém, no Apêndice A é apresentado o projeto da sua PCI, enquanto que, a versão final do Módulo de Controle Digital é mostrada na Figura 3.24.

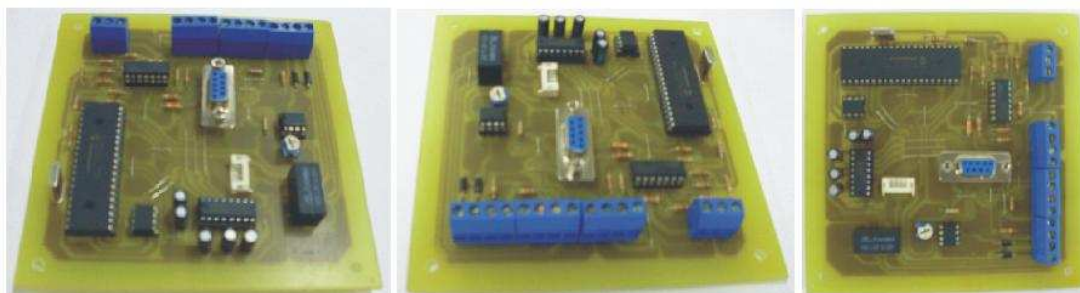


Figura 3.24: Módulo de Controle Digital.

3.6.4 Controlador Externo

Para tornar a bancada versátil, planejou-se a possibilidade de se utilizar outros circuitos de controle. Para este propósito, foram disponibilizados dois terminais no painel, nos quais se pode medir o sinal *ERRO* e inserir um sinal de controle, proveniente de um controlador externo a bancada. Estes terminais estão em um bloco denominado CONTROLADOR EXTERNO, no diagrama do painel (Figura 3.29).

No primeiro terminal é possível saber o nível do sinal *ERRO*, proveniente do Módulo do Sensor, que varia conforme a Eq. (3.1). De modo que, considerando a referência interna e a externa em $0V$, este sinal excursiona na faixa de $0 - 17,50V$. No painel, este terminal é indicado como SINAL DE *ERRO* – SENSOR, o qual deverá ser conectado a entrada do controlador do usuário.

O outro terminal está ligado à entrada do Módulo de Seleção, o qual é conectado ao Módulo de Acionamento (Seção 3.6.6), identificado no painel como SINAL DE CONTROLE. Nele pode-se inserir um sinal de controle, proveniente do controlador do usuário.

3.6.5 Módulo de Seleção

O acionamento do atuador por diferentes metodologias de controle exige que haja uma lógica de seleção entre essas estratégias distintas. Esta seleção consiste, essencialmente, em desligar os contatos elétricos relativos a um tipo de estratégia enquanto se ligam os contatos asso-

ciados a outro. Para isso, foi proposta a utilização de uma chave comutadora, com três contatos de entrada e um de saída, cada uma ligada a um módulo de controle e a saída ao Módulo de Acionamento.

O circuito do módulo foi desenvolvido utilizando o microcontrolador PIC16F628 [2] e relés, de modo a selecionar e sinalizar a estratégia de controle escolhida pelo usuário. No painel, esse módulo está representado pelo bloco denominado CHAVE SELETORA, que indica o controlador utilizado através de sinais luminosos. A Figura 3.25 ilustra o circuito desenvolvido para o módulo.

O microcontrolador utilizado possui dezoito pinos, dos quais dezesseis podem ser usados como E/S digitais, agrupados em duas portas de oito bits [2]. Como foram usados todos os pinos do PIC, o *clock* externo e o *MCLR* foram desabilitados, e seus pinos foram utilizados como entradas e saídas digitais.

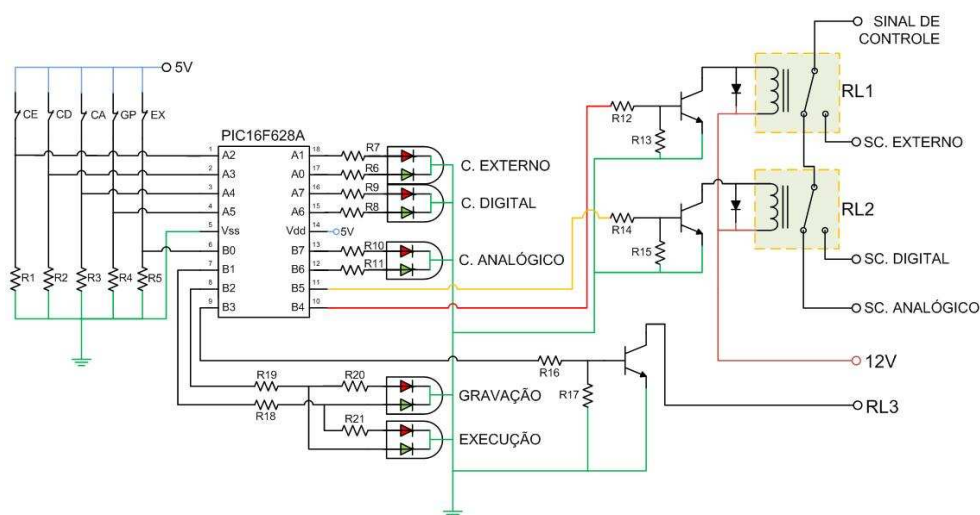


Figura 3.25: Circuito esquemático do Módulo de Seleção.

As chaves de seleção dos controladores (CE, CD e CA)¹⁹ estão no painel, em seus respectivos blocos. São chaves de toque, normalmente fechadas e alimentadas com 5V. Elas estão conectadas aos pinos A2, A3 e A4. O controlador selecionado é ativado em nível baixo.

A indicação do controlador utilizado é realizada por LEDs bicolores, onde cada qual é ligado a um pino do PIC. Esses LEDs apresentam três terminais: dois deles para ativar a luz verde ou vermelha, e um terminal comum (central). As conexões dos LEDs no PIC estão distribuídas da seguinte maneira: para ativar a indicação do controlador externo são usados os pinos A1 (para

¹⁹CE - Controlador Externo; CD - Controlador Digital; CA - Controlador Analógico.

o LED vermelho) e o pino *A0* (para o LED verde); para o controlador digital são utilizados os pinos *A7* (para o LED vermelho) e o pino *A6* (para o LED verde); para a indicação do controlador analógico são usados os pinos *B7* (para o LED vermelho) e o pino *B6* (para o LED verde).

Portanto, ao selecionar um dos controladores, ativa-se a luz verde correspondente a ele, indicando o seu funcionamento, ao mesmo tempo em que são ativadas as luzes vermelhas dos outros controladores, indicando que estão desativados.

Os pinos *B5* e *B4* comandam os relés *RL1* e *RL2*, respectivamente. Esses relés funcionam como uma chave comutadora de três posições. Os sinais de controle estão ligados aos pontos distintos da chave, e o ponto comum conectado ao Módulo de Acionamento. Dessa forma, ao selecionar o CONTROLADOR DIGITAL, por exemplo, o relé *RL2* será ativado através do sinal, em nível alto, proveniente do pino *B5*. Da mesma forma que ao selecionar o CONTROLADOR EXTERNO, o relé *RL1* será ativado através do sinal, em nível alto, proveniente do pino *B4*. O CONTROLADOR ANALÓGICO é acionado através do desligamento dos relés.

O módulo também é responsável pelo acionamento da gravação do microcontrolador do Módulo de Controle Digital, discutido na Seção 3.6.3. Isso foi necessário, pois se o algoritmo responsável pelo controle da gravação estivesse inserido no microcontrolador do Módulo de Controle Digital, ele teria que ser regravado a cada vez que se alterasse o algoritmo do controlador. Portanto, decidiu-se englobar a função de gravação com a de seleção dos controladores no mesmo algoritmo, no PIC do Módulo de Seleção. Esse algoritmo foi feito em linguagem C, e é mostrado no Apêndice C.

Ao Módulo de Seleção também estão conectadas duas botoeiras, referentes à operação do Módulo do Controlador Digital, que estão indicadas no painel como: EXECUÇÃO (EX) e GRAVAÇÃO (GP). Essas botoeiras (EX e GP) funcionam semelhantes as da seleção dos controladores, indicadas também por meio luminoso. Ao selecionar o modo GRAVAÇÃO, o pino *B3* do PIC ficará em nível alto, ativando o relé *RL3*, que se encontra na placa do Módulo do Controlador Digital. É importante observar que ao iniciar o processo de gravação, o Módulo de Seleção não prevê o seu fim, de forma que, ao pressionar o botão EXECUÇÃO no meio do processo de gravação, ele será interrompido. Vale ressaltar que os modos GRAVAÇÃO ou EXECUÇÃO só podem ser acessados quando o bloco do CONTROLADOR DIGITAL estiver selecionado.

O sinal referente à indicação do modo utilizado (EXECUÇÃO ou GRAVAÇÃO) é feito pelos pinos *B1* e *B2* do PIC. De forma que ao ativar o modo GRAVAÇÃO, o pino *B1* ficará em nível alto ligando o LED verde indicando o modo utilizado, ao mesmo tempo em que ativa o LED vermelho do modo EXECUÇÃO indicando o seu desligamento. Como os LEDs (verde e vermelho) de cada modo foram conectados em paralelo, necessitou-se colocar resistores de

100Ω ($R20$ e $R21$) em série com os LEDs vermelhos, pois verificou-se (experimentalmente) que a configuração sem os resistores atenuava a intensidade de luz verde.

Para realizar o comando dos relés pelo PIC, foram utilizados transistores. Esses componentes atuam como chaves no circuito da Figura 3.25, assim, quando se aplica uma tensão de $5V$ a base do transistor, ele permitirá a passagem de corrente entre o emissor e o coletor. Como os relés foram conectados em série com transistor, ele será ativado quando o pino do PIC (ligado a base do transistor) estiver em nível alto. Os transistores, utilizados são do modelo $BC548$ [10].

Foram colocados diodos de roda livre em paralelo com os relés a fim de amenizar o efeito transitório. São mostrados na Tabela 3.6 os valores das resistências do circuito da Figura 3.25. A versão final do módulo é mostrada na Figura 3.26.

Tabela 3.6: Resistências do circuito da Figura 3.25.

Resistor	Ω	Resistor	Ω	Resistor	Ω	Resistor	Ω
$R1$	$10 k$	$R6$	$1 k$	$R11$	$1 k$	$R16$	100
$R2$	$10 k$	$R7$	$1 k$	$R12$	330	$R17$	$10 k$
$R3$	$10 k$	$R8$	$1 k$	$R13$	$10 k$	$R18$	560
$R4$	$10 k$	$R9$	$1 k$	$R14$	330	$R19$	560
$R5$	$10 k$	$R10$	$1 k$	$R15$	$10 k$	-	-

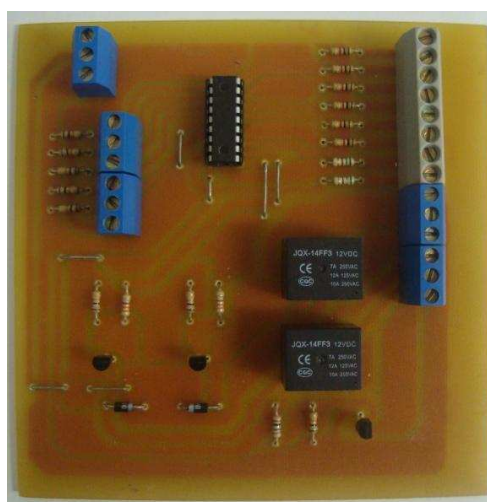


Figura 3.26: Módulo de Seleção.

3.6.6 Módulo de Acionamento

Este módulo foi desenvolvido para fazer o acionamento do atuador, uma vez que os sinais gerados pelos circuitos de controle não possuem potência suficiente. Este é o ultimo estágio do circuito desenvolvido para a bancada, o qual foi dividido em duas partes: terminal controlador e um amplificador. O circuito deste módulo foi montado de acordo com o esquemático da Figura 3.27.

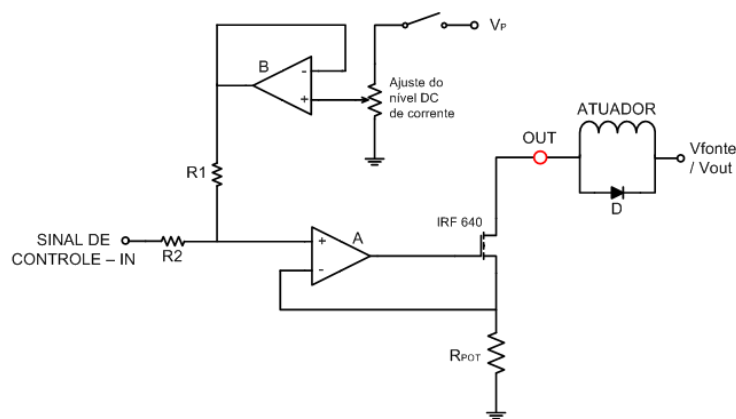


Figura 3.27: Circuito do Módulo de Acionamento.

O terminal controlado é um divisor de tensão ligado a um *buffer* e está conectado à entrada não-inversora do amplificador operacional (B) por um resistor, e tem a função de regular o nível DC de corrente que passa pelo eletroímã. Este estágio se faz necessário, pois o nível DC de corrente está diretamente relacionado ao ponto de equilíbrio do sistema dinâmico, conforme analisado no Capítulo 2. Uma chave é utilizada para habilitar ou desabilitar esta função.

O amplificador foi montado a partir de um transistor MOSFET ²⁰, modelo *IRF 640* [31]. Esse transistor funciona como uma fonte de corrente controlada por tensão. A porta do transistor está ligada a saída do amplificador operacional (A), onde o terminal negativo é conectado à fonte do transistor.

O resistor R_{POT} , é uma rede de dois resistores de potência de $20W$, em paralelo, com resistência equivalente de 5Ω . Esses resistores são necessários para limitar a corrente, permitindo um controle linear da bobina.

A fonte de alimentação do eletroímã fornece cerca de $2A$. Entretanto, a corrente máxima que circula pela bobina está por volta de $1,4A$ (para a bobina do Eletroímã 1, com o *offset* de corrente máximo – $19,4V$) quando o corpo cai ($x \rightarrow \infty$).

²⁰Transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor

Outro componente importante é o diodo de roda livre (D), que tem a finalidade de amenizar o efeito transitório decorrente do carregamento ou descarregamento do eletroímã [7]. Os resistores R1 e R2 são de $10k\Omega$. A versão final do módulo é mostrada na Figura 3.28.

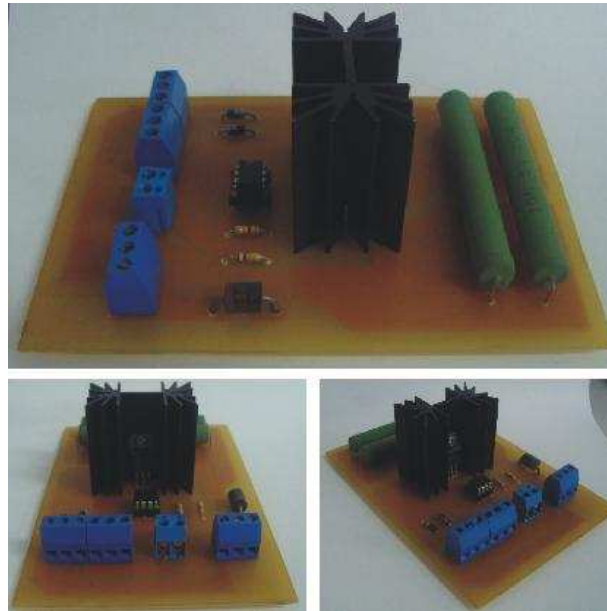


Figura 3.28: Módulo de Acionamento.

3.7 Painel de comando

O painel de comando é o componente que realiza a interação do usuário com a bancada, de modo a facilitar o entendimento do processo. Ele foi planejado com o propósito de ser simples e amigável.

Este componente possibilita o controle do sistema através da introdução de controladores ou a adequação de um previamente colocado na malha do sistema. Sobre ele estão ilustradas as ligações dos controladores e de outros dispositivos úteis ao funcionamento do sistema. A Figura 3.29 mostra o desenho do painel.

O funcionamento pode ser entendido segundo o percurso da malha, da esquerda para a direita, indicadas pela direção das setas no desenho. Além disso, para diferenciar os terminais, foram instalados conectores de cores diferentes: azul para medição e preto para introdução de sinais. Os termos “somador” utilizados nas descrições a seguir se referem ao desenho do somador ilustrado no painel.

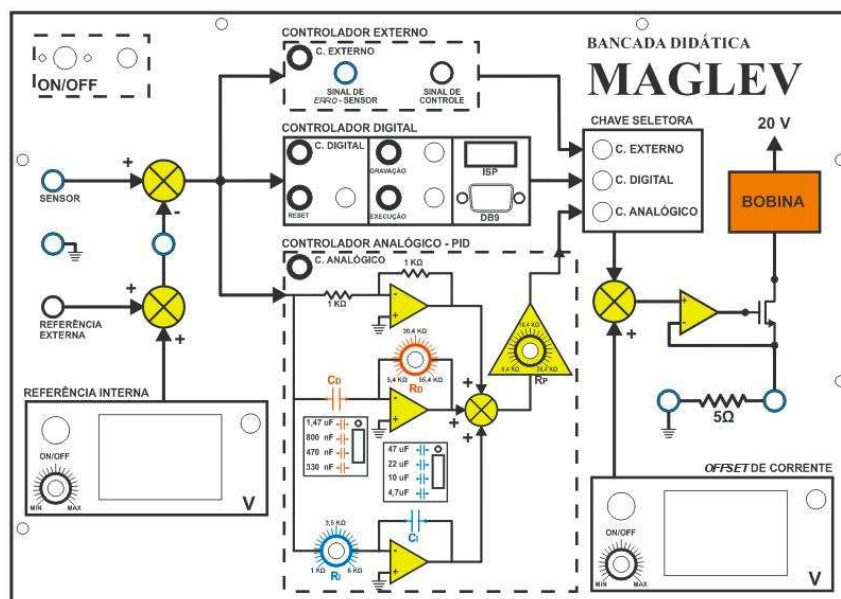


Figura 3.29: Desenho do painel de comando.

O Módulo do Sensor, o primeiro estágio, é representado pelos dois somadores iniciais onde estão ligados a referência interna e externa. A referência interna pode ser retirada ou adicionada através de uma chave e o seu valor é regulado por um potenciômetro, ao mesmo tempo em que um voltímetro digital indica seu valor no painel. Um LED de cor verde indica o seu estado de operação. A Referência Externa foi instalada em um terminal ligado ao somador, ao qual foi acrescentado um ponto para medição do sinal total de referência. Para medição do sinal do sensor foi instalado um ponto na entrada do primeiro somador.

Para utilização de outros controladores, o painel dispõe de um bloco denominado de CONTROLADOR EXTERNO. Este bloco disponibiliza ao usuário um ponto de saída proveniente do Módulo do Sensor (SINAL DE ERRO - SENSOR) e outro ligado a entrada do Módulo de Acionamento (SINAL DE CONTROLE).

O Módulo de Controle Digital é representado por um bloco no qual estão disponíveis dois conectores: um para gravação do programa no microcontrolador do Módulo de Controle Digital (ISP) e outro para comunicação da bancada com um computador (DB9). Neste bloco também estão disponíveis duas botoeiras, que comutam entre o modo de GRAVAÇÃO e o de EXECUÇÃO. Para reiniciar o programa do microcontrolador, uma botoeira de RESET foi colocada no diagrama do módulo.

O bloco do CONTROLADOR ANALÓGICO foi desenvolvido com a finalidade de representar o circuito da Figura 3.16, de modo a se obter uma melhor compreensão da ação do con-

trolador PID. O ajuste dos parâmetros do controlador é realizado pelos reostatos (R_D , R_I e R_P) e a seleção dos capacitores (C_D e C_I) através de chaves comutadoras.

Os sinais de controle são transmitidos para um bloco denominado de CHAVE SELETORA. Esse bloco tem a finalidade de indicar a comutação entre os controladores e seu estado funcional. A seleção dos controladores é feita através de botoeiras instaladas em cada bloco, de modo que a indicação do controle selecionado é realizada por meio luminoso (LEDs bicolores verde/vermelho). Quando se seleciona um módulo de controle, o LED indicativo deste controlador fica na cor verde, enquanto que os demais ficam em vermelho.

A saída do bloco CHAVE SELETORA é ligada a um somador, que recebe um sinal para regular o nível DC de corrente aplicado ao eletroímã. A regulação é feita através de um potenciômetro e medida por um voltímetro digital. Este bloco (assim como a referência interna) pode ser retirado ou inserido a qualquer instante através de uma botoeira. Seu estado funcional é indicado por um sinal luminoso.

O último estágio é ilustrado por um amplificador, que regula o nível de corrente sobre o atuador. Os dois estágios (ajuste do nível DC de corrente e amplificador) foram demonstrados no painel de modo a representar o circuito da Figura 3.27. Um ponto foi instalado com o intuito de medir a queda de tensão sobre o resistor R_{POT} (5Ω), através do qual pode-se obter o nível de corrente que passa pelo eletroímã. A versão final do painel de comando é ilustrada na Figura 3.30.

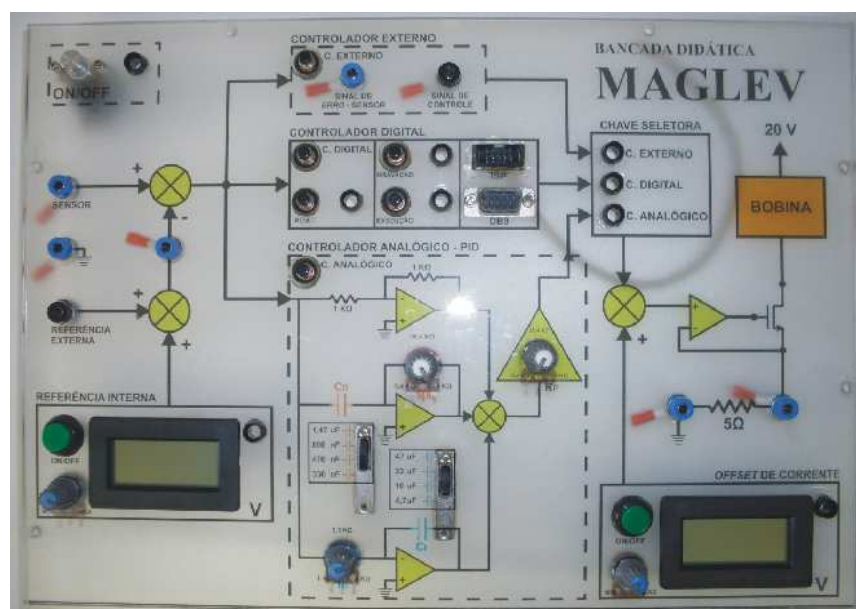


Figura 3.30: Painel de comando da bancada.

3.8 Estrutura física

Para constituir a bancada foi construída uma estrutura em madeira, com o propósito de efetuar a fixação dos dispositivos e acomodação dos módulos. A madeira foi escolhida como material devido a sua fácil manipulação e baixo custo. Outro detalhe que pode ser ressaltado, com relação à redução de custos, se trata da mão-de-obra, pois a estrutura foi desenvolvida pelos próprios alunos.

A estrutura é dividida em duas partes: uma móvel, para sustentar o sensor de posição e uma fixa, para sustentar o eletroímã.

Estrutura móvel

A parte móvel foi elaborada com a intenção de variar a posição do sensor, facilitando seu ajuste. Para isso, foi desenvolvida uma estrutura (fixada à parte que sustenta o atuador) na qual se pode variar a posição do sensor em três dimensões. As partes que a constituem e a forma como foi incorporada ao protótipo são mostradas na Figura 3.31.



Figura 3.31: Estrutura móvel.

Estrutura fixa

Consiste da estrutura que mantém o atuador suspenso, fixado através de uma rosca de metal, incorporada à sua parte superior. É esta peça que permite remover o ímã quando conveniente. Ela também é responsável pelo suporte da parte móvel que sustenta o sensor, percorrendo a estrutura através de uma ranhura feita na parte de trás. Foram ainda, instaladas canaletas para ocultar os cabos, além de terminais (borneiras de pressão) para as ligações elétricas do ímã.

Para absorção do impacto proveniente da queda do corpo, foi feita uma saliência na base da estrutura e colocada uma espuma. O seu modelo final é mostrado na Figura 3.32.



Figura 3.32: Estrutura fixa.

Bancada

A estrutura foi desenvolvida para acomodar os módulos do protótipo, o painel e os demais componentes. Em sua parte superior é acomodada a estrutura fixa e a móvel, de forma que elas possam ser retiradas. Em sua parte frontal é fixada o painel, que pode ser removido para manutenção de seus componentes. Foram adicionados à estrutura, para ventilação das partes internas, dois orifícios nos quais foram instaladas ventoinhas para facilitar a circulação do ar. Também foi construído um cubículo, para acomodar os dispositivos que não estão sendo utilizados, por exemplo, o outro atuador.

Desta forma, é mostrada na Figura 3.33 a estrutura da bancada em seu estado acabado, enquanto que a Figura 3.34 exibe as três estruturas montadas.



Figura 3.33: Bancada.



Figura 3.34: Estrutura física montada.

3.9 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os aspectos construtivos da Bancada Didática MAGLEV. Todo o planejamento e diretrizes de construção foram adotados com base no primeiro protótipo construído.

A limitação de ajustes no compensador do protótipo MAGLEV (descrito na Seção 3.2) e a sugestão de utilizar outros métodos de controle de forma mais versátil, foram alguns dos fatores que levaram ao desenvolvimento da bancada.

Decidiu-se construir os circuitos de comando e controle sob a forma de módulos, o que facilita a manutenção e montagem. Todos os módulos estão conectados entre si e com o painel, disponibilizando elementos para realizar a interação entre a bancada e o usuário de forma amigável.

No painel é mostrado um diagrama demonstrando o funcionamento do sistema, que permite controlá-lo através de três técnicas de controle, sendo duas incorporadas à bancada, uma analógica e outra digital.

Uma estrutura em madeira foi construída com a finalidade de fixar o eletroímã, o sensor e acomodar os módulos. Ela também é responsável por dar um aspecto final do equipamento.

É importante mencionar que, experimentalmente foi observado, que quando se desconecta o Atuador 1 para conexão do Atuador 2 ²¹, é necessário ajustar um pouco a altura do sensor (aumentar a distância em relação ao núcleo do eletroímã). Trata-se apenas de um problema estrutural, pois a rosca de encaixe do Atuador 2 não apresenta uma excursão suficiente para acoplá-lo em uma altura igual a do Atuador 1.

A Bancada Didática MAGLEV, em seu estado final, é apresentada na Figura 3.35.



Figura 3.35: Bancada Didática MAGLEV.

²¹Atuador 1 - bobina de $96\mu H$; Atuador 2 - bobina de $350\mu H$.

Capítulo 4

Projeto do controlador analógico da bancada

4.1 Introdução

A Bancada Didática MAGLEV possui um controlador incorporado a sua malha, permitindo rápida estabilização e desenvolvimento de experimentos. A estratégia de controle utilizada na bancada é do tipo PID analógico. Neste capítulo é mostrada a utilização e o funcionamento deste tipo de controlador na bancada, que também é amplamente utilizado na indústria [46, 52]. É apresentado também o projeto de controle, baseado no LGR ¹ da planta, na tentativa de atrair os pólos de malha fechada do sistema para uma região de estabilidade no semi-plano esquerdo.

Como não era conhecido o modelo da planta, o controlador foi sintonizado experimentalmente através de um ensaio descrito na Seção 4.3.1. Com base neste ensaio, estabeleceram-se valores para os parâmetros do compensador. Após a parametrização do controlador, foram analisadas as respostas do sistema para referências senoidais, utilizadas em [22], para determinar um modelo para a planta através de um ensaio de resposta em frequência.

¹Lugar Geométrico das Raízes: é uma técnica gráfica no domínio da frequência que representa a posição dos pólos de malha fechada de um sistema, para valores de ganho variando de zero a infinito. Construído diretamente a partir dos pólos e zeros da função de transferência de malha aberta [45, 46].

4.2 Controladores PID

Controladores PID são amplamente utilizados em diversos tipos de aplicações devido a sua simplicidade e principalmente pela significância que seus parâmetros físicos possuem. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, portanto, métodos analíticos de projeto são mais difíceis de serem utilizados, controladores PID se mostram bastante úteis [46].

É importante ressaltar que mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente utilizam esquemas de controle PID [46]. Como a maioria desses controladores são ajustados em campo, o emprego de protótipos didáticos na graduação garante ao aluno uma experiência inicial com sistemas utilizando este tipo de controlador. Isto é um dos motivos que justificam a adoção do controlador PID como a ação de controle contínuo na bancada.

Esta estratégia age através da união de três ações: proporcional, integral e derivativo.

- O ganho proporcional, dependendo da planta, pode influenciar diferentes parâmetros, tais como, amortecimento (transitório), frequência natural (transitório) ou ganho DC (regime permanente). No entanto, a ação proporcional pura, em geral, produz um erro de regime estacionário ²;
- A ação integral é utilizada para corrigir o erro de estado estacionário, podendo deixar o sistema robusto a distúrbios e incertezas. A ação de controle integral, embora remova o erro residual, pode conduzir a uma resposta oscilatória com uma amplitude sempre crescente ou lentamente decrescente [46, 52];
- A ação derivativa depende da taxa de variação de erro, corrigindo-o, antes que o seu valor se torne expressivo. O controle derivativo possui caráter antecipativo, o que tende a aumentar a estabilidade do sistema através de uma ação corretiva prematura, alterando principalmente o estado transitório. No entanto, o processo de derivação puro amplifica o ruído (sempre presente no processo), por isto é utilizada em conjunto com uma ação proporcional ou proporcional-integral [46]. Ainda que a ação derivativa não influencie inteiramente no erro estacionário, ela amplia o amortecimento do sistema, com isso, permitindo o uso de um valor de ganho proporcional mais elevado [46, 52].

Portanto, o controlador PID é capaz de atuar em regime transitório e permanente de forma relativamente independente. Uma função que representa a ação combinada deste controlador, no

²Esta característica, geralmente, depende do tipo de sistema em que o controlador está inserido.

domínio do tempo, é dada pela Eq. 4.1 [46, 45, 52].

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(t) dt + K_P T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

onde K_P é o ganho proporcional, T_I é o *tempo integrativo* e T_D é o *tempo derivativo*. Sua função de transferência é demonstrada pela Eq. (4.2), a qual é classicamente utilizada na teoria de Sistemas de Controle para descrever controladores PID [46, 45, 52].

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + T_D s + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (4.2)$$

A Eq. (4.2) pode também ser escrita no formato racional, Eq.(4.3) [46, 45, 52], demonstrando que este tipo de controlador introduz dois zeros e um pólo a malha.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \frac{(T_I T_D s^2 + T_I s + 1)}{T_I s} \quad (4.3)$$

Desta forma, o sistema da Eq. (4.3) é dito não-causal, pois apresenta um número de zeros maior do que de pólos. Isto implica dizer que o sinal de saída depende de entradas futuras, o que caracteriza um sistema antecipativo [58].

4.2.1 Variações do algoritmo PID

O algoritmo básico de um controlador PID é dado pela Eq. (4.2), a qual é usualmente apresentada em textos didáticos [45, 46, 52]. Pode-se representar este algoritmo pelo diagrama de blocos da Figura 4.1 [46, 52]. Contudo, ele é utilizado com pouca frequência em aplicações industriais, pois seu desempenho pode ser melhorado a partir de algoritmos modificados [52].

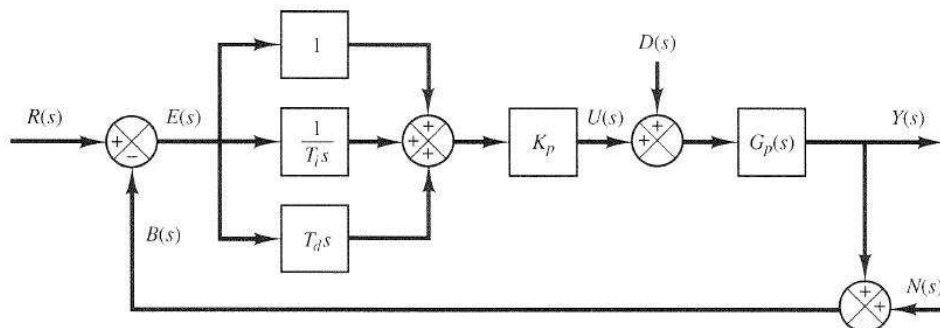


Figura 4.1: Diagrama de blocos de um sistema com um controlador PID básico.

Admitindo que a referência do sistema ($R(s)$) da Figura 4.1) seja uma função degrau, uma parcela do sinal de controle $U(s)$ será uma função impulso, devido a presença do termo derivativo [46]. Dessa forma, o controlador com ação derivativa apresentará uma alteração brusca no sinal $U(s)$, produzindo uma “sobrelevação” excessiva indesejada no processo, podendo causar a saturação do sinal de controle [28]. Este fenômeno, é denominado *set point kick*³ [46].

A ação derivativa com filtro pode amenizar este problema. Assim, em alguns casos, controladores PID aplicados a indústria que utilizam o sistema da Figura 4.1, tem seu termo derivativo puro $T_d s$ ⁴ substituído por:

$$\frac{T_d s}{1 + \gamma T_d s}$$

onde γ é normalmente em torno de 0,1 [46]. Quanto menor o valor deste parâmetro, mais próxima da ação derivativa pura este filtro ficará. Em alguns projetos, γ é um parâmetro de ajuste⁵ [46, 28].

Uma forma de evitar o fenômeno de *set point kick*, é colocar a ação derivativa do controlador no ramo de realimentação, para que a diferenciação aconteça somente no sinal $B(s)$ (Figura 4.2), este esquema é denominado controle PI-D [46]. Um sistema com este tipo de controlador é mostrado na Figura 4.2 [46], no qual pode-se representar o sinal de controle $U(s)$ pela Eq. (4.4).

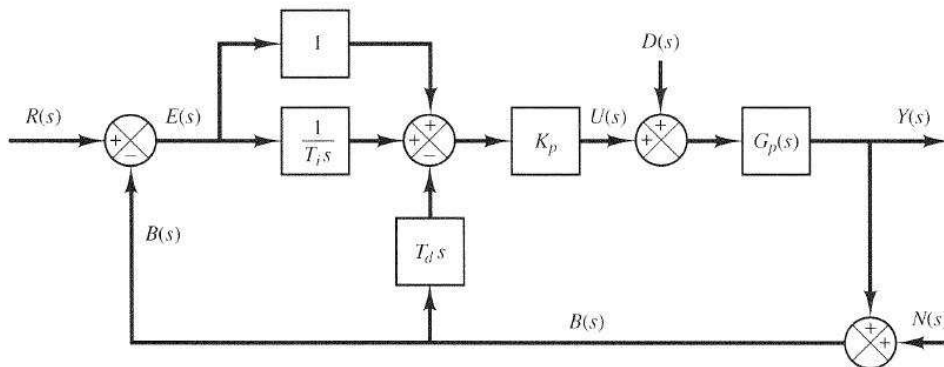


Figura 4.2: Diagrama de blocos de um sistema com um controlador PI-D.

³Salto do valor de referência.

⁴Nesta seção, os termos T_i e T_d serão utilizados no lugar de T_I e T_D apenas para explicar os diagramas de blocos aqui apresentados.

⁵Em [52] é sugerida uma faixa de valores para γ , que variam entre 0.3 – 20.

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) R(s) - K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) B(s) \quad (4.4)$$

Ao aplicar uma referência degrau em $R(s)$ nos sistemas das Figuras 4.1 e 4.2, observa-se que os controladores PID e PI-D também apresentam uma função degrau modificada (pelos controladores) no sinal $U(s)$. Em alguns casos, essa alteração no sinal de controle pode ser indesejável [46].

A fim de contornar este problema, pode-se mover para o ramo de realimentação a ação proporcional e a derivativa do controlador, na intenção de interferir somente no sinal de realimentação $B(s)$. Este tipo de estratégia é denominada controle I-PD. A Figura 4.3 [46] mostra o diagrama de blocos de um sistema utilizando este tipo de estratégia. O sinal de controle $U(s)$ deste controlador pode ser representado pela Eq. (4.5). Desta forma, a ação integral do controlador afeta apenas no sinal $R(s)$.

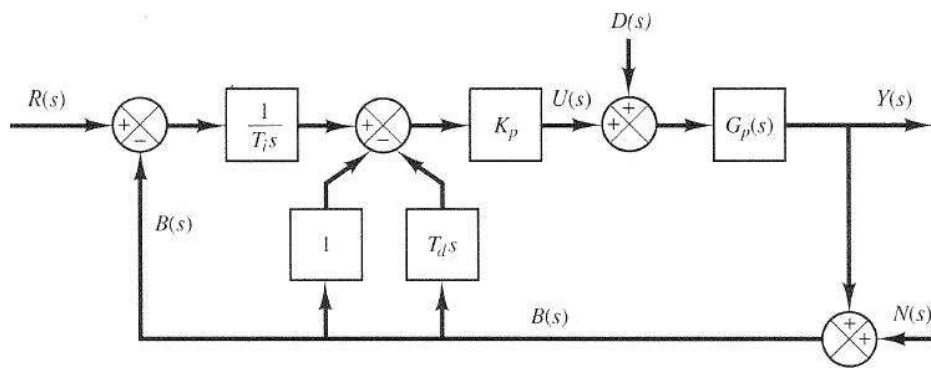


Figura 4.3: Diagrama de blocos de um sistema com um controlador I-PD.

$$U(s) = K_p \left(\frac{1}{T_i s} \right) R(s) - K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) B(s) \quad (4.5)$$

Pode-se notar que o algoritmo PID é alterado movendo-se a ação de controle derivativa ou proporcional, ou somente parte delas, para o ramo de realimentação, mantendo as proporções restantes no ramo direto. Isto é demonstrado nas nomenclaturas dos controladores apresentados, a qual é dividida em duas partes: a primeira, antes do hífen, está vinculada ao ramo direto; a segunda, após o hífen, refere-se ao ramo de realimentação. Assim, para um controlador PI-PD [46], a parte PI situa-se no ramo direto e a PD no ramo de realimentação. O mesmo serve para

o PID-PD, de maneira que as características desses controladores (PI-PD e PID-PD) situam-se entre o controle PID e o I-PD [46].

Estas duas ultimas modificações no algoritmo de controle (PI-PD e PID-PD) levam a um esquema mais geral, com dois graus de liberdade [46]. A Figura 4.4 mostra sistemas controlados por este tipo de estratégia, em que $G_{c1}(s)$ e $G_{c2}(s)$ são controladores independentes [46].

As modificações do algoritmo PID apresentam vantagens quanto à tentativa de melhorar o sinal de controle, deixando-o menos susceptível a variações abruptas que dependem da referência de entrada. Entretanto, para o controlador analógico da bancada, decidiu-se utilizar o esquema apresentado na Figura 4.1, pois trata-se de um algoritmo básico e de melhor compreensão quanto as suas ações de controle.

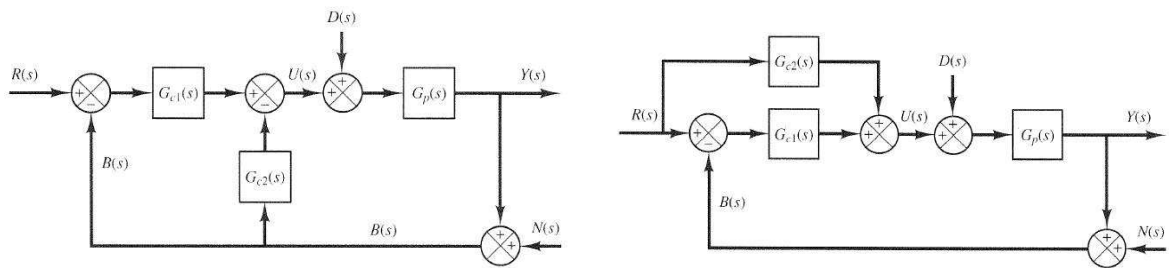


Figura 4.4: Sistemas utilizando controladores a dois graus de liberdade.

4.3 Projeto do controlador PID

Quando o modelo matemático do sistema é conhecido, é possível utilizar varias técnicas de projeto para determinar os parâmetros do controlador. Entretanto, existem situações onde não se dispõe da representação da planta e o método analítico para o projeto do controlador torna-se difícil. Nesses casos, abordagens experimentais para sintonia do controlador são de grande utilidade [46].

Alguns métodos podem ser adotados para sintonia de controladores PID, como por exemplo, Ziegler-Nichols [45, 46, 52] ou variações deste método: *Tuning Maps* (Ajuste de Mapas) ou CHR (*Chien, Hrones and Reswick method*) [52]. O método de Ziegler-Nichols propõe regras para ajustes dos parâmetros do controlador (K_P , T_I e T_D), nas quais são baseadas na resposta experimental do sistema a uma excitação (geralmente um degrau) como referência, sendo convenientemente aplicado nos casos em que o sistema é estável em malha aberta, enquanto que o modelo do processo pode ser ou não conhecido [45, 46, 52].

Por ser instável em malha aberta e seus parâmetros não serem fáceis de medir, o modelo do MAGLEV torna-se de difícil determinação. No Capítulo 2 foi apresentada uma função de transferência genérica para o sistema, Eq. (2.22), com a qual é possível fazer uma estimativa da estrutura da função de transferência do controlador a ser utilizado, através da análise do LGR da planta, Figura 4.5. Concluiu-se que a função de transferência do MAGLEV possui pólos reais e distintos, simétricos em relação ao eixo imaginário ($\pm\lambda$). O pólo no semi-plano direito ($+\lambda$) é responsável pela instabilidade do sistema em malha aberta.

Vale lembrar que este sistema só pode ser estabilizado através de um controle por realimentação. Assim, o modelo proposto no Capítulo 2 sugere uma realimentação positiva à malha, devido ao sinal negativo do termo k_0 , Eq.(2.19).

É importante mencionar que, posteriormente ao ajuste por tentativas do controlador, foi, de fato, levantado um modelo matemático, através de dois ensaios realizados em [22]⁶: um de resposta em frequência, para determinação da curva de Bode do sistema; e um semi-estático, para estimação de parâmetros do modelo não-linear.

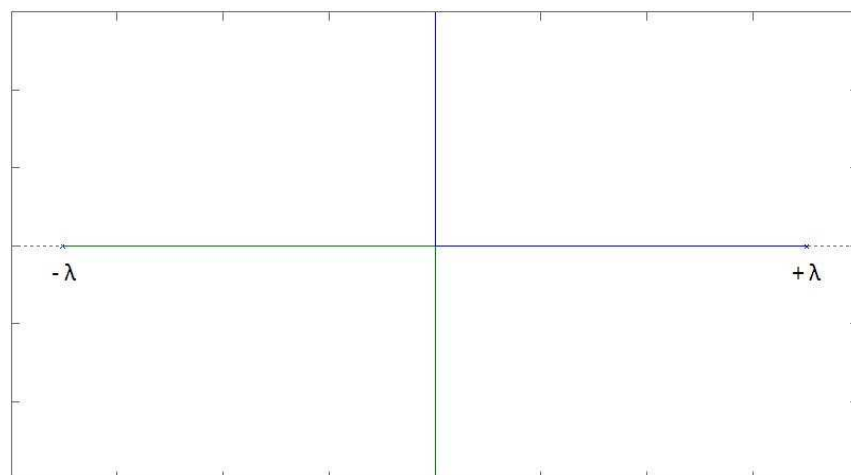


Figura 4.5: LGR da planta MAGLEV, sem compensação.

Portanto, após a análise da Figura 4.5, foi possível estabelecer uma estratégia para projetar o controlador:

- Para tornar o sistema estável, deve-se acrescentar zeros no semi-plano esquerdo para atrair o LGR para a esquerda. Adicionar um zero é semelhante a adotar um controlador com uma ação derivativa;

⁶Este trabalho foi conduzido em paralelo a construção da bancada.

- A condição de erro estacionário nulo exige um pólo de malha aberta na origem (integrador). Isso também implica em deixar o sistema robusto a distúrbios.

Deste modo, a utilização de um controlador PID mostra-se conveniente, pois incorpora todas as ações planejadas em um único compensador. Além disso, como o modelo da planta não era conhecido, a sintonia do controlador foi feita por tentativas e o reconhecimento de como cada característica do compensador atua auxiliou bastante o sucesso do ajuste. Ao final foi realizado um ensaio com a planta para validar os parâmetros do controlador PID.

4.3.1 Ensaio para sintonia do controlador

Como já foi explanado anteriormente, o controlador utilizado na bancada é do tipo PID analógico, e foi sintonizado experimentalmente. Esta seção descreve o ensaio realizado para determinar os parâmetros deste controlador, de maneira a definir valores de capacitâncias e resistências, para o circuito da Figura 3.16, que desloquem os pólos de malha fechada do sistema para a zona de estabilidade do LGR.

Alguns equipamentos de instrumentação (como: osciloscópio, multímetro e um gerador de função) foram utilizados no experimento. Eles foram necessários, pois foi preciso introduzir distúrbios na malha, medir as referências (interna, externa e *offset* de corrente) e visualizar algumas formas de onda, além de salvá-las para posterior análise. O corpo ferromagnético utilizado no ensaio, como massa levitante, foi um cilindro de 30g.

Vale ressaltar que este experimento é um procedimento longo e trabalhoso, exigindo cautela, paciência e concentração, visto que o sistema nem sempre estabiliza nas primeiras tentativas, e o tempo que o usuário leva para adquirir experiência (para realizar os ajustes) é relativamente grande.

Como já foi comentado na Seção 4.2, os parâmetros do controlador PID apresentam um significado físico, ou seja, quando são alterados observa-se uma modificação significativa na resposta do sistema. No caso deste ensaio, estas alterações podem ser analisadas em dois momentos:

- No primeiro, as modificações dos parâmetros do controlador foram feitas apenas no intuito de estabilizar o sistema. Entretanto, à análise quantitativa do quanto estes parâmetros deveriam ser alterados, foram realizadas de forma empírica, até que se notasse a tentativa do controlador em estabilizar a malha;
- Em um segundo momento, após estabilizar o sistema, foram realizados pequenos ajustes a fim de melhorar o desempenho do controlador. Deste modo, com a ajuda do osciloscópio,

foi possível observar as modificações da resposta da planta à medida que eram alterados os resistores e os capacitores do circuito da Figura 3.16.

Desta forma, pôde-se estabelecer os parâmetros do controlador comparando as Eqs. (4.2) e (3.2), onde:

$$K_P = R_P/R \quad (4.6)$$

$$T_D = (R_D \cdot C_D) \quad (4.7)$$

$$T_I = (R_I \cdot C_I) \quad (4.8)$$

$$1 = R_B/R_A \quad (4.9)$$

são estes parâmetros que são determinados neste experimento. A seguir, é apresentada a metodologia adotada para realização do ensaio:

1. Inicialmente, a amplitude do sinal da Referência Externa (neste caso, o gerador de função) é ajustado em $0V$. Em seguida, a Referência Interna (*offset* de posição) e o *offset* de corrente são ajustados. O *offset* de corrente é alterado até que se perceba que a força magnética é realmente significativa para o equilíbrio do cilindro; o *offset* de posição é ajustado observando-se no osciloscópio o sinal de posição y (Figura 3.14), verificando se o deslocamento do cilindro produz valores positivos e negativos consideráveis. O ganho do controlador é ajustado quando se percebe o momento em que o compensador começa a atuar de forma coerente, isto é, ao aproximar o cilindro do núcleo a corrente diminui e vice-versa;
2. Para as capacitâncias C_I e C_D foram inicialmente utilizados os mesmos valores de capacitância usados no controlador do primeiro protótipo (discutido no Capítulo 3). A cada amostra esses valores são reajustados, e avaliadas as respostas do sistema (com relação à estabilidade e o aparecimento de oscilações). Esses parâmetros também são estipulados com base no LGR da planta, na intenção de deslocar os pólos de malha fechada para o semi-plano esquerdo.
3. Todos os potenciômetros do circuito da Figura 3.16, exceto os da referência interna e do *offset* de corrente, são ajustados para que as constantes de tempo do controlador (T_I e T_D) e o ganho K_P assumam um valor mínimo;
4. O corpo é posicionado sob o eletroímã, a uma distância pequena em relação ao núcleo. Regulam-se os potenciômetros R_P e R_D (através deles pode-se alterar o ganho K_P e a

constante de tempo T_D), conferindo se o compensador tenta estabilizar o sistema. Isto é feito até que se constate a presença de pequenas vibrações em alta frequência, que aparecem quando a malha está prestes a estabilizar;

5. Regula-se R_D , tentando atenuar pequenas oscilações que venham a aparecer. Isso também é feito para melhorar o amortecimento da malha. Em seguida, regula-se R_I a fim de diminuir o erro de regime permanente;
6. Através de um procedimento simples, é testada a robustez ⁷ do controlador: são produzidas pequenas perturbações mecânicas no cilindro, e é observado o sinal de posição. Desta forma, é visto se o controlador (já parametrizado) é suficientemente robusto a ponto de fazer o corpo rastrear, novamente, o sinal de referência aplicado ao sistema. Caso o procedimento apresentado neste item falhe, o ensaio é novamente iniciado a partir do segundo passo;
7. Constatada a ausência/atenuação das oscilações e da robustez do controlador, é inserido na malha um sinal externo conhecido (onda senoidal ou quadrada), a fim de verificar se o corpo o excursiona;
8. Aumenta-se a frequência do sinal da Referência Externa, até que a malha se torne instável. Isto é feito com a intenção de determinar a frequência máxima (do sinal externo) suportada pelo controlador (em todas as amostras, foram aplicados sinais de onda senoidal e quadrada). Depois, mede-se a frequência e a amplitude deste sinal;
9. Após estes passos, são medidas todas as grandezas referentes ao circuito da Figura 3.16 (R_P , R_D , R_I , C_D , C_I), além do *offset* de corrente do imã e da referência de posição (referência interna). No ensaio da bancada, os dados das dez melhores amostras que estabilizaram o sistema, são mostrados na Tabela 4.1. A Figura 4.6 mostra um dos sinais observados no osciloscópio.

A Figura 4.6 mostra a resposta do sistema (sem filtragem), para referências do tipo senoidal e onda quadrada, para o controlador PID parametrizado a partir dos dados da primeira amostra da Tabela 4.1. O sinal de posição consegue acompanhar razoavelmente bem o sinal de referência, apesar de pequenos desvios que, no momento, são atribuídos à perturbações não-modeladas, ruído e não-linearidades.

⁷Neste trabalho, o termo robustez está associado a idéia de rejeição a distúrbios e rastreamento de um sinal de referência, não sendo, portanto, utilizado no contexto da teoria de controle robusto.

Tabela 4.1: Parâmetros encontrados no ensaio. Em que: A_{mt} - amostra, i - corrente, x - posição, RE. - Referência Externa, A - Tensão de pico a pico e f - Frequência.

Amt	R_P ($k\Omega$)	R_D ($k\Omega$)	R_I ($k\Omega$)	C_D (nF)	C_I (μF)	offset de i (V)	offset de x (V)	RE.- Senoide		RE.- Quadrada	
								A (V)	f (Hz)	A (V)	f (Hz)
01	7,7	28,0	5,1	330	4,7	1,6	6,8	1,3	2,2	1,3	2,4
02	9,1	27,9	7,1	510	10,0	1,6	6,8	2,3	3	2,8	3,0
03	8,2	28,0	3,7	398	22,0	1,6	6,8	2,5	14,1	1,0	1,0
04	10,6	6,8	3,8	800	47,0	1,6	6,8	2,4	15,6	1,4	1,0
05	15,3	32,0	2,9	470	10,0	3,4	7,1	1,6	95,0	1,6	7,2
06	7,8	21,7	3,6	1470	14,7	4,2	6,8	1,3	25,0	1,3	1,0
07	6,5	26,9	0,5	765	22,0	4,2	6,8	2,4	8,6	1,9	3,2
08	6,4	15,7	3,5	330	32,0	4,2	6,8	2,7	6,5	1,1	4,0
09	17,7	35,5	1,0	510	47,0	2,3	2,2	3,2	1,0	1,0	1,0
10	23,3	22,8	4,1	610	36,7	5,9	2,3	1,7	14,0	1,2	1,0

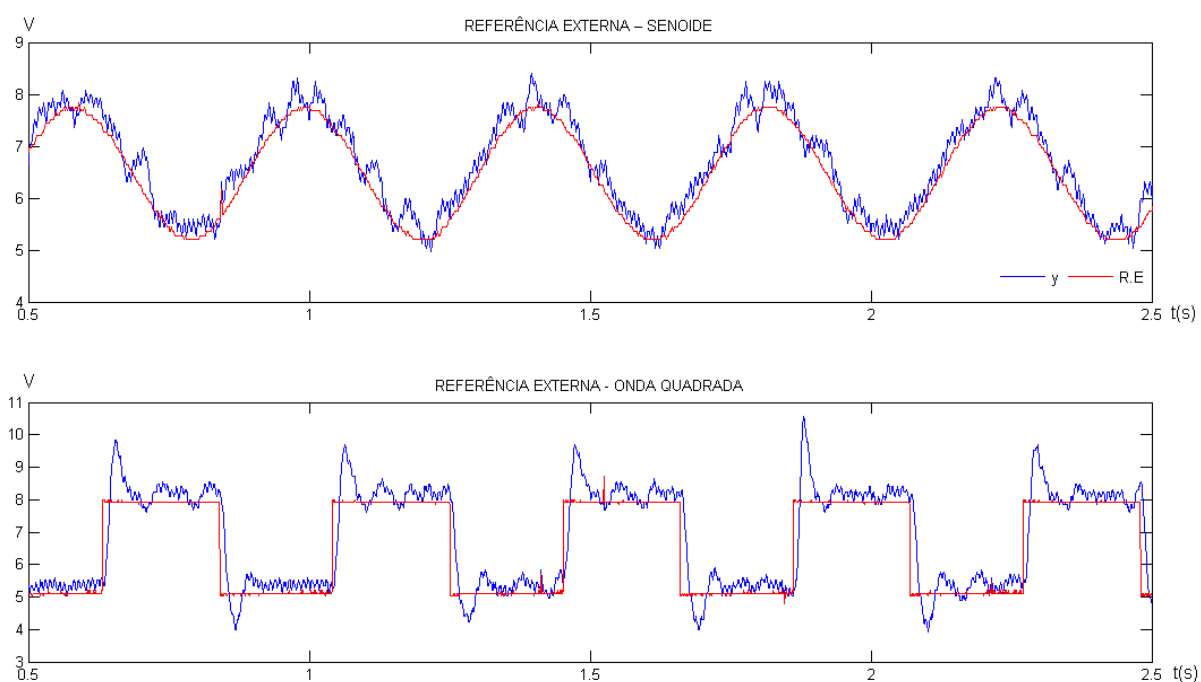


Figura 4.6: Resposta do sistema para referências tipo senoidal e onda quadrada. Em que: y - sinal de posição do sensor, R.E - Referência Externa.

4.3.2 Determinação dos parâmetros do controlador

Para a construção do painel da bancada e do circuito do controlador (ambos discutidos no Capítulo 3) eram necessários apenas quatro valores de capacitância de cada parâmetro. Visto que foi planejada a utilização de uma chave de quatro posições para realizar a comutação entre esses valores.

Desta forma, com base na Tabela 4.1, foi estabelecido (para os parâmetros C_I e C_D) valores dentro de uma faixa em que foi observada uma boa resposta ⁸ do controlador. A Tabela 4.2 mostra esses valores de capacitâncias adotados para o controlador.

Tabela 4.2: Valores das capacitâncias C_I e C_D , adotados para o controlador.

Nº	Capacitâncias	
	C_D (nF)	C_I (μ F)
1	1470	47
2	800	22
3	470	10
4	330	4,7

De forma similar, foram estabelecidos os valores das resistências variáveis (R_P , R_D e R_I) do circuito do controlador (Figura 3.16). Para facilitar o uso da bancada, os circuitos foram projetados para que as variações nos potenciômetros produzam parâmetros que estejam sempre dentro de uma faixa onde o sistema em malha fechada é estável. Isto é importante, pois o usuário poderá usar a bancada sem perder tempo com o procedimento de estabilização. As variações das resistências adotadas são mostradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores das resistências R_P , R_D e R_I , variações máximas e mínimas.

Variação	Resistências		
	R_P (k Ω)	R_D (k Ω)	R_I (k Ω)
Máx.	26,4	55,4	6,0
Mín.	6,4	5,4	1,0

A partir dos valores das Tabelas 4.2 e 4.3, foi possível determinar os valores dos parâmetros do controlador analógico, os quais podem ser aplicados na Eq. (3.2). Estes valores são mostrados no painel (Figuras 3.29 e 3.30), na intenção de ilustrar as variações de cada componente do circuito da Figura 3.16.

⁸A classificação desta resposta, em boa ou ruim, tem base no sinal de posição observado no osciloscópio. A resposta é considerada boa se o sinal de posição rastreia o sinal de referência dentro de limites considerados aceitáveis.

4.3.3 Considerações sobre o controlador analógico parametrizado

A fim de verificar o comportamento do controlador, ajustado com os parâmetros estipulados na Seção 4.3.2, analisou-se as respostas dos sinais de posição para o ensaio de resposta em frequência realizado em [22], e do apresentado na Seção 4.3.1. Com base nestes ensaios foi possível observar algumas características gerais do desempenho da malha.

Quando a amplitude do sinal de referência é pequena, em torno de $1,6V_{PP}$, pode-se excursionar uma larga faixa espectral sem observar grandes distorções harmônicas no sinal de posição (é possível ultrapassar 100 Hz de frequência⁹). Para estas amplitudes, observa-se um comportamento dinâmico razoavelmente linear, com geração de poucos harmônicos, Figura 4.7.

Devido à não-linearidade da planta, é esperado o aparecimento de harmônicos de ordem par no sinal de posição quando a perturbação (referência) for de grande amplitude. Especula-se que isto ocorra devido ao termo quadrático do modelo, Eq. (2.22). Portanto, para sinais com amplitudes altas, próximas de $3V_{PP}$, a faixa de frequências rastreáveis¹⁰ é reduzida significativamente, com a geração de harmônicos consideráveis em baixas frequências, Figura 4.8.

Para referências do tipo onda quadrada, a observação do fenômeno, com relação à ocorrência de harmônicos, é equivalente as das respostas analisadas anteriormente. Entretanto, as faixas de frequências rastreáveis reduz-se devido a variação abrupta deste sinal, não ultrapassando os $3Hz$ para amplitudes de $1V_{PP}$, Figura 4.9.

Uma tentativa de estudar estas oscilações, em mais detalhes, podem ser feitas através de modelos que consigam reproduzir o comportamento não-linear do processo. Para isso, podem-se utilizar modelos NARX (*Non-linear AutoRegressive with eXogenous inputs*) [6] ou métodos de resposta em frequência pra sistemas não-lineares [34].

⁹Conseguiu-se, após um bom ajuste do controlador, chegar aos 220 Hz.

¹⁰Frequências nas quais o corpo excursiona o sinal de referência.

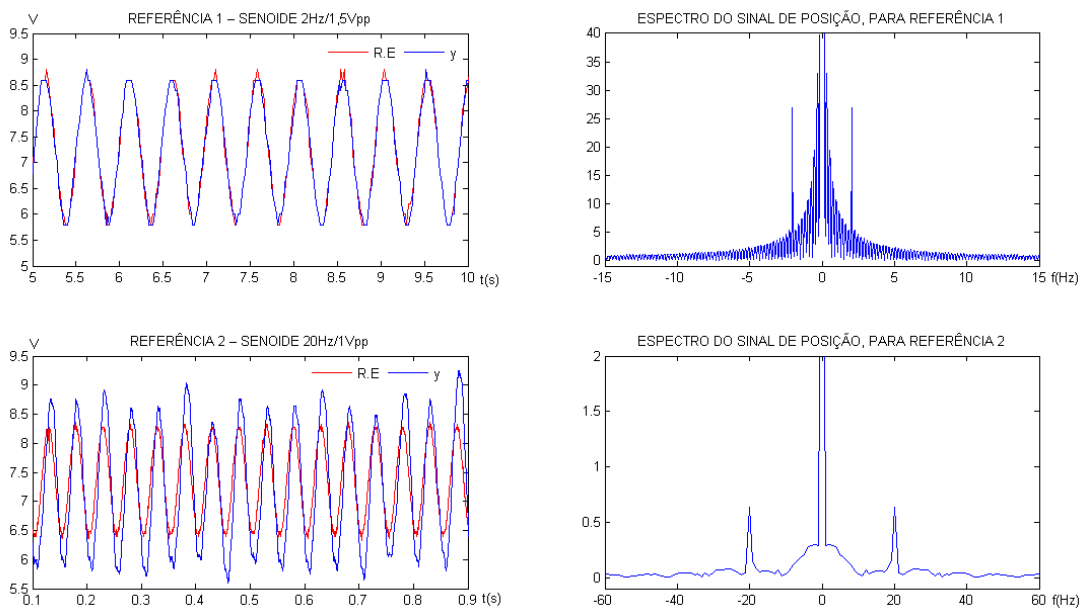


Figura 4.7: Resposta do sistema para referências do tipo senoide, com pequenas amplitudes, e seus respectivos espectros. Em que: y - sinal de posição do sensor, R.E - Referência Externa.

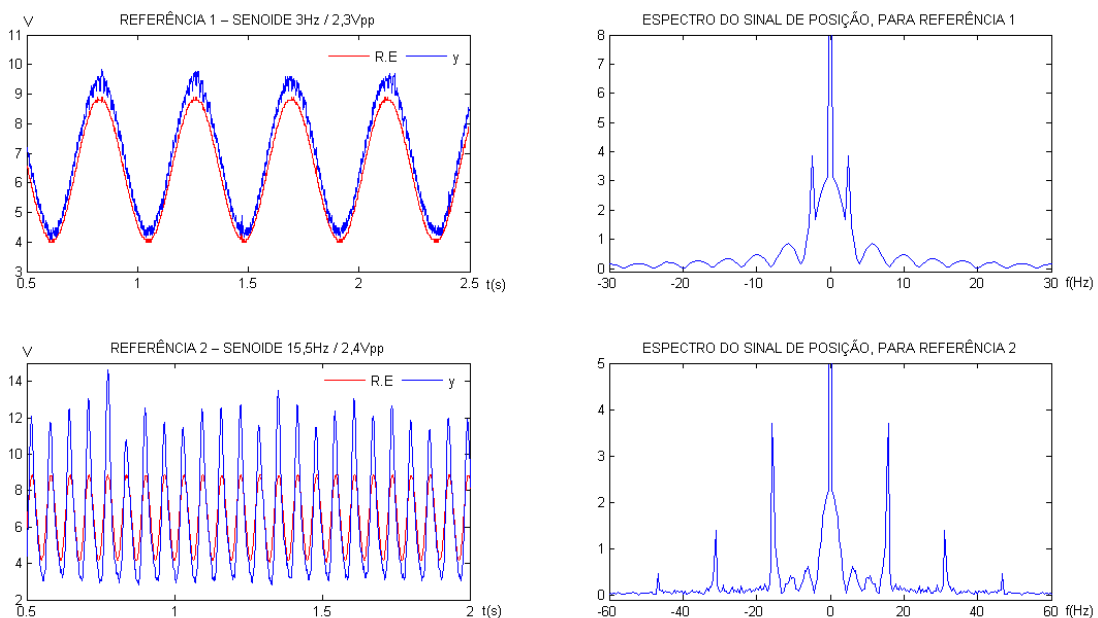


Figura 4.8: Resposta do sistema para referências do tipo senoide, com amplitudes altas, e seus respectivos espectros. Em que: y - sinal de posição do sensor, R.E - Referência Externa.

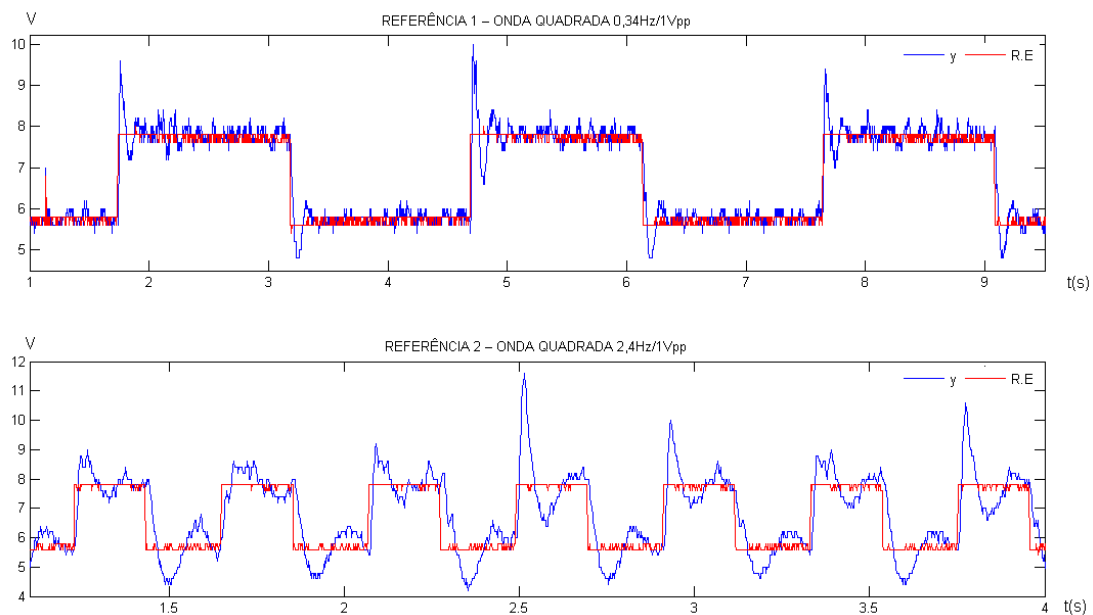


Figura 4.9: Resposta do sistema para referências do tipo onda quadrada. Em que: y - sinal de posição do sensor, R.E - Referência Externa.

4.4 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se a estratégia de controle contínuo utilizada na bancada que é do tipo PID analógico, tendo sido discutida brevemente sua utilização e funcionamento: foram apresentadas variações deste algoritmo, as quais são empregados com a intenção de melhorar o sinal de controle.

Foi também descrito um ensaio realizado para parametrização do controlador PID. Com base nele foram estabelecidas faixas de variações para os ganhos do compensador, com a finalidade de facilitar o ajuste e estabilização da malha. Este controlador, já parametrizado, propiciou o equilíbrio do corpo utilizando os dois atuadores, o que mostra certa robustez, visto que a alteração desses atuadores altera significativamente o modelo da planta.

Por fim, foram discutidas as características da malha quanto a faixas de frequências e amplitudes para sinais de referência senoidais, utilizadas no ensaio de resposta em frequência para determinação do modelo da planta [22].

Capítulo 5

Conclusão

Neste trabalho foi proposta a construção de um equipamento didático para auxílio ao ensino de Sistemas de Controle, através de um processo de levitação magnética. Os objetivos gerais de construção foram atingidos com êxito e houve sucesso na estabilização do sistema (Figura 5.1). A bancada mostrou ser de melhor utilização que o protótipo MAGLEV anteriormente construído, devido ao uso de uma *interface* mais elaborada para realizar a interação entre a bancada e o usuário.



Figura 5.1: Bancada Didática MAGLEV em funcionamento.

A pesquisa bibliográfica ofereceu uma expressiva quantidade de informação, possibilitando compreensão do processo através de um modelo matemático, além de sugestões para construção do processo. O sistema MAGLEV é instável em malha aberta e as grandezas que caracterizam o modelo são de difícil medição. Apesar do trabalho não oferecer uma representação definitiva, como se usualmente dispõe em projetos de sistemas de controle, a estimativa apresentada no Capítulo 2 permitiu que um controlador preliminar fosse desenvolvido, com êxito no equilíbrio do corpo, para os dois atuadores (Figuras 5.2 e 5.3).



Figura 5.2: Sistema em operação utilizando o Atuador 1.



Figura 5.3: Sistema em operação utilizando o Atuador 2.

O controlador analógico funciona como esperado. É possível alterar seus parâmetros através da alternância entre vários valores de capacitâncias e resistências, sem que o sistema perca a estabilidade. O ajuste desses parâmetros, realizado através do painel, oferece melhor compreensão ao usuário sobre o funcionamento de controladores PID, uma vez que é possível visualizar prontamente seus efeitos na malha, como ilustrado na Figura 5.4.

Para empregar estratégias de controle discreto, foi desenvolvido o *hardware* Módulo de Controle Digital, que permite carregar algoritmos de controle para um microcontrolador incorporado à bancada. Os detalhes da modelagem, projeto e implementação de controladores digitais na bancada é um tema bastante abrangente e permitiu o desenvolvimento de uma monografia paralela [22], que demonstrou, com sucesso, a viabilidade do uso da bancada em pesquisa e ensino na área de Sistemas de Controle.

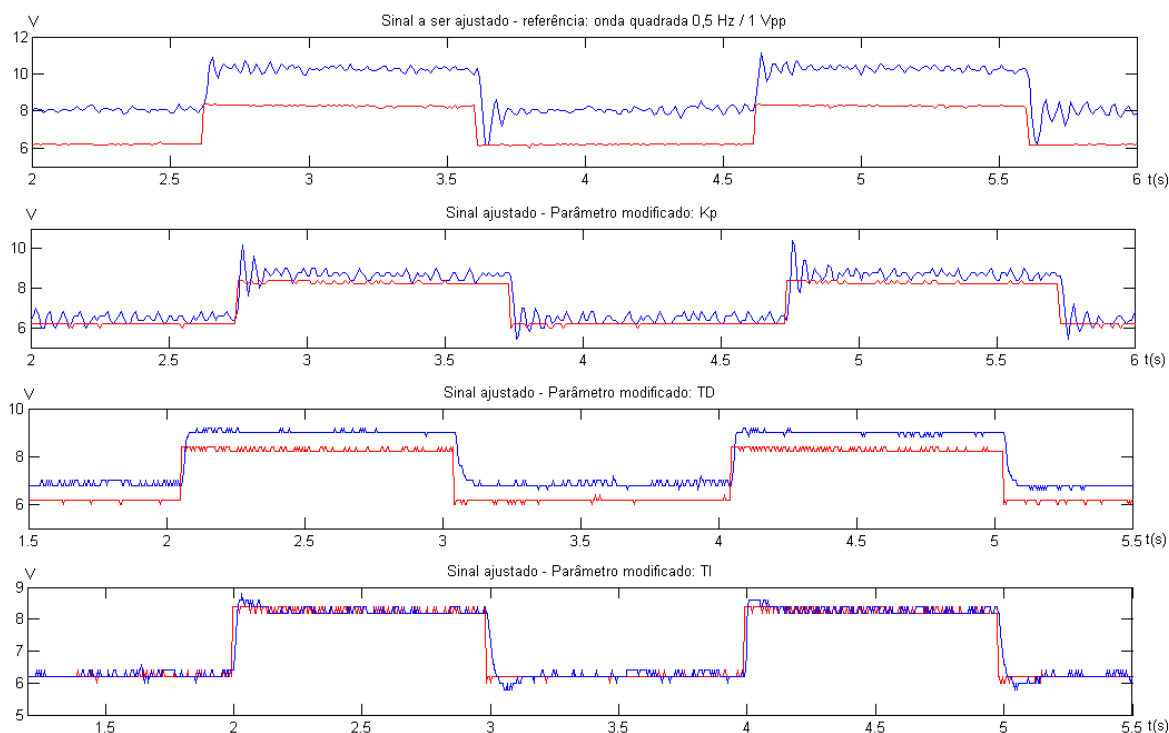


Figura 5.4: Ajuste dos parâmetros do controlador PID analógico.

Os circuitos que permitem testar um Controlador Externo também estão funcionando como planejado, tendo sido testados controladores analógicos do tipo PID com sucesso no equilíbrio do corpo.

O sensor de posição apresentou bom desempenho no processo de medição ¹. Contudo, para objetos com geometria muito diferente da cilíndrica, houve dificuldade em se sintonizar o controlador ². Em um experimento posterior onde houve troca da fonte de alimentação do ímã (para uma faixa de 27 – 30V), o controlador PID analógico equilibrou uma esfera com massa de aproximadamente 30g ³. Cogita-se que talvez, o problema possa estar relacionado ao nível DC de corrente ajustado no Módulo de Acionamento.

Apesar do sensor de infravermelho apresentar uma boa resposta, é importante considerar a possibilidade de testar outros dispositivos para medição da posição do objeto levitado, como sensores capacitivos ou de Efeito Hall. Os níveis de ruído e precisão parecem estar compatíveis

¹ Suspeita-se que a excursão do corpo cilíndrico (utilizado nos ensaios) seja de 1mm - 0,5mm acima e 0,5mm abaixo do ponto de operação.

² Foram testados outros objetos, com formas geométricas distintas, na tentativa de equilibrar-los, como: esferas, parafusos com porcas e moedas.

³ Massa próxima ao do cilindro utilizado nos ensaios e testes.

com o observado em outras referências.

Há um pequeno equívoco no painel de comando que é importante esclarecer. O Módulo de Controle Digital (representado no painel por CONTROLADOR DIGITAL) recebe o sinal diretamente do sensor (sinal y , Figuras 3.12 e 3.14), ao invés do sinal *ERRO* (Figura 3.14), como é sugerido no desenho. Se este módulo estivesse conectado ao Módulo do Sensor, poderiam surgir sinais com níveis fora da faixa aceitável pelo conversor *A/D* do PIC, inclusive com a possibilidade de danificá-lo. Desta maneira, o *layout* mais adequado ao painel seria o apresentado na Figura 3.11.

Sobre o *hardware* da bancada, o sucesso das etapas de desenvolvimento podem ser atribuídos ao tempo dedicado à pesquisa, projeto e construção, além de todos os módulos do circuito que integram a bancada terem passado por uma minuciosa etapa de testes antes de serem montados. A título de trabalhos futuros, são sugeridas algumas modificações, visando melhorar o desempenho da bancada:

- **Construção de uma nova fonte de alimentação para o eletroímã:** com a finalidade de eliminar o problema da queda de tensão em virtude da conexão da carga;
- **Adoção de um procedimento de gravação automática do PIC do Módulo de Controle Digital:** levando-se em consideração que o Módulo de Seleção não prevê o fim do processo de gravação, pode-se contornar o problema utilizando o pino V_{PP} da gravadora (que sai de $5V$ para $12V$ no momento da gravação) em um circuito comparador, com $6V$ em uma de suas entradas. O circuito sugerido é mostrado na Figura 5.5, em que: $R1 = R2 = R3 = R4$, e $R5 = 10k\Omega$.

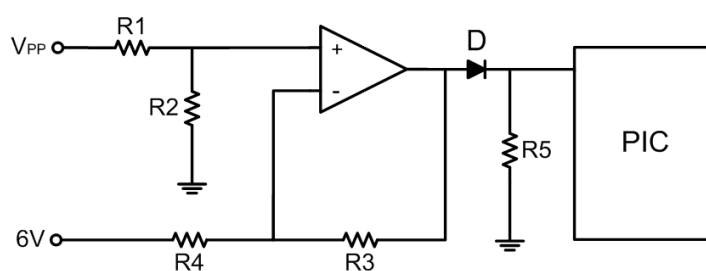


Figura 5.5: Circuito sugerido para automatizar o processo de gravação.

A respeito do funcionamento deste circuito; pode-se considerar que no momento em que a gravação do PIC for ativada, o terminal V_{PP} ficará em $12V$, surgindo uma tensão de cerca de $5,3V$ no resistor R_5 (ligado ao PIC) devido a queda de tensão de $0,7V$ no diodo D . Este sinal, em nível lógico alto para o PIC, pode ser usado para iniciar o algoritmo que

comanda o estado do RELÉ 3 (Figura 3.23). No momento em que o processo de gravação é finalizado V_{PP} retornar para $5V$, surgindo uma DDP de $0V$ no resistor R_6 (pelo fato do diodo D estar diretamente polarizado), desativando o algoritmo que comanda o estado do relé RELÉ 3. Cogita-se na possibilidade deste aparato não funcionar como o planejado, devido ao algoritmo do PIC, responsável pelo comando do RELÉ 3, ter um tempo de processamento grande, tornando-se lento diante do tempo em que a gravadora envia o sinal de $12V$ para checar o estado do PIC a ser gravado.

- **Utilização de um conversor D/A paralelo, no circuito do Módulo de Controle Digital:** observou-se que a rotina que gera o sinal serial (do PIC para o conversor D/A) consome muito tempo de processamento para um PIC que trabalha com menos de 16 bits. O uso de um conversor paralelo pode permitir uma redução considerável deste tempo de processamento, quando o Módulo Digital estiver em uso. Alguns modelos de CIs podem ser sugeridos: DAC0808 - conversor D/A paralelo de 8 bits [19]; DAC1208 - conversor D/A paralelo de 12 bits [20]. Contudo, outros modelos podem ser pesquisados;
- **Utilização de um display LCD, controlado por um PIC, no lugar dos voltímetros do painel:** uma vez que, os voltímetros utilizados não proporcionam uma medida precisa, e algumas vezes apresentam erro de uma casa decimal. O LCD propicia a leitura de outros sinais, convenientes ao estudo do sistema, além daqueles aferidos pelos voltímetros. Para isso, pode-se utilizar um PIC com canais A/D no lugar do PIC16F628A (que não apresenta esta função [2]) do Módulo de Seleção ⁴, para fazer a leitura desses sinais e enviá-los para o LCD ⁵, contudo o uso deste dispositivo fica limitado a valores que estão fixos na bancada, como os *offsets*. Para mostrar o sinal de posição, de controle ou perturbação, pode-se sugerir uma proposta um pouco mais audaciosa, a utilização um LCD gráfico para mostrar as formas de onda desses sinais.

Com relação ao desenvolvimento do processo, pode-se exaltar a simplicidade e o baixo custo econômico do experimento. A bancada foi construída pelos próprios alunos da faculdade, o que reduziu os custos de construção e agrega um importante valor, uma vez que valoriza e estimula a comunidade discente em geral. Mesmo somando os gastos com a mão-de-obra do bolsista, o custo final do protótipo ainda é inferior ao de algumas plantas adquiridas recentemente pela faculdade, para o Laboratório de Sistemas de Controle, as quais não oferecem tanta flexibilidade

⁴É sugerida a utilização de um PIC16F877 [3] ou mesmo outro PIC18F4520 [4], que são microcontroladores que apresentam a função de conversão A/D.

⁵LCD alfanumérico 16x2, ou com número superior de caracteres.

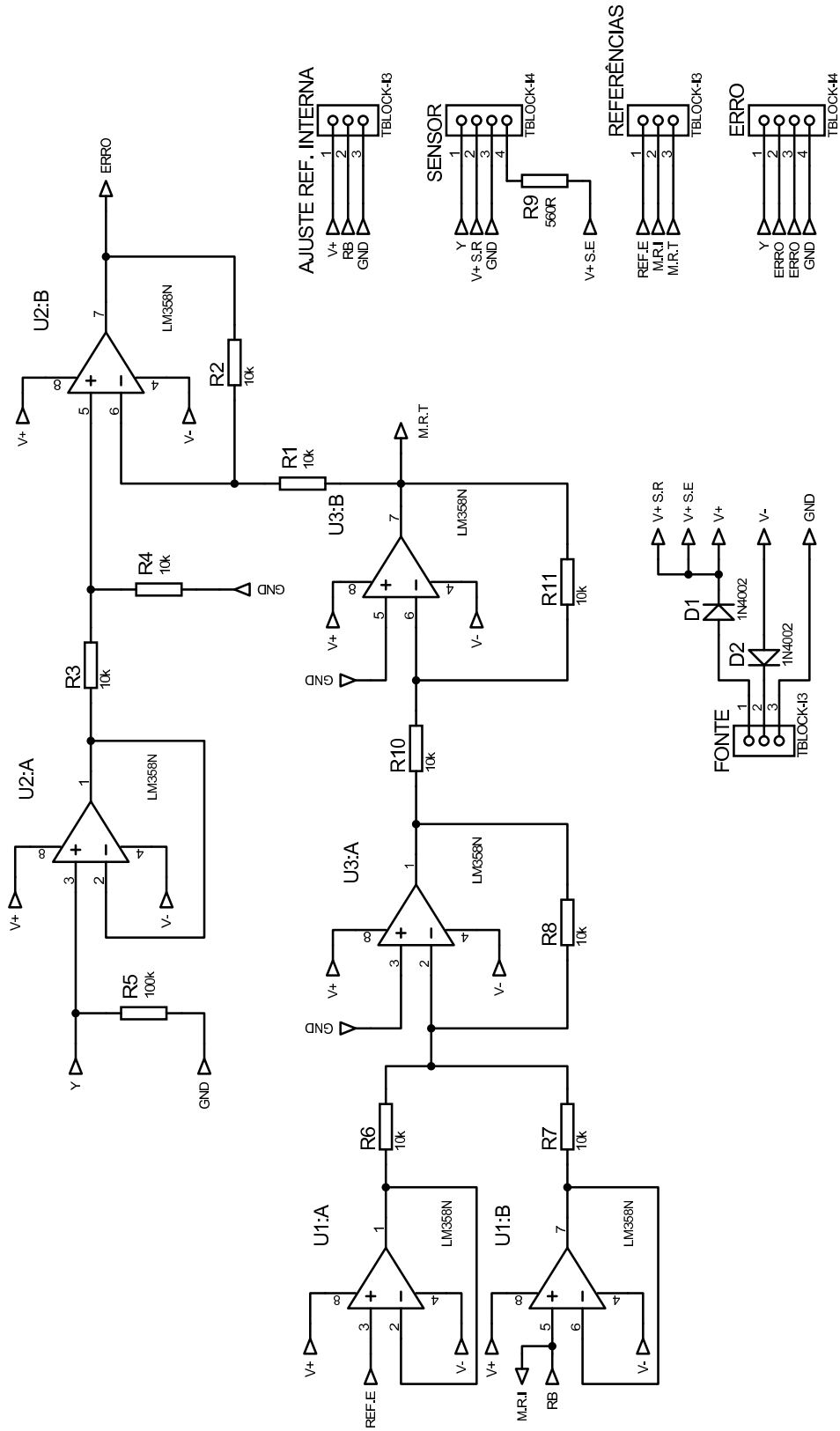
de uso quanto à bancada. Todos os componentes utilizados na construção deste equipamento e preços são mostrados no Apêndice D. Somando-se apenas os gastos com componentes e serviços, o custo do equipamento foi de R\$ 940,60 ; agregando-se a mão-de-obra do bolsista, o custo total foi de R\$ 4444,60.

A Bancada Didática MAGLEV serve como base para o desenvolvimento de outros trabalhos, como por exemplo, a determinação de modelos lineares e não-lineares que expliquem a sua dinâmica. Vale ressaltar que o processo desenvolvido neste trabalho é um experimento relativamente complexo, do ponto de vista científico. É possível que ele seja objeto de estudo em trabalhos de diversas outras áreas de pesquisa, como: controle linear, não-linear, inteligente, robusto e ótimo.

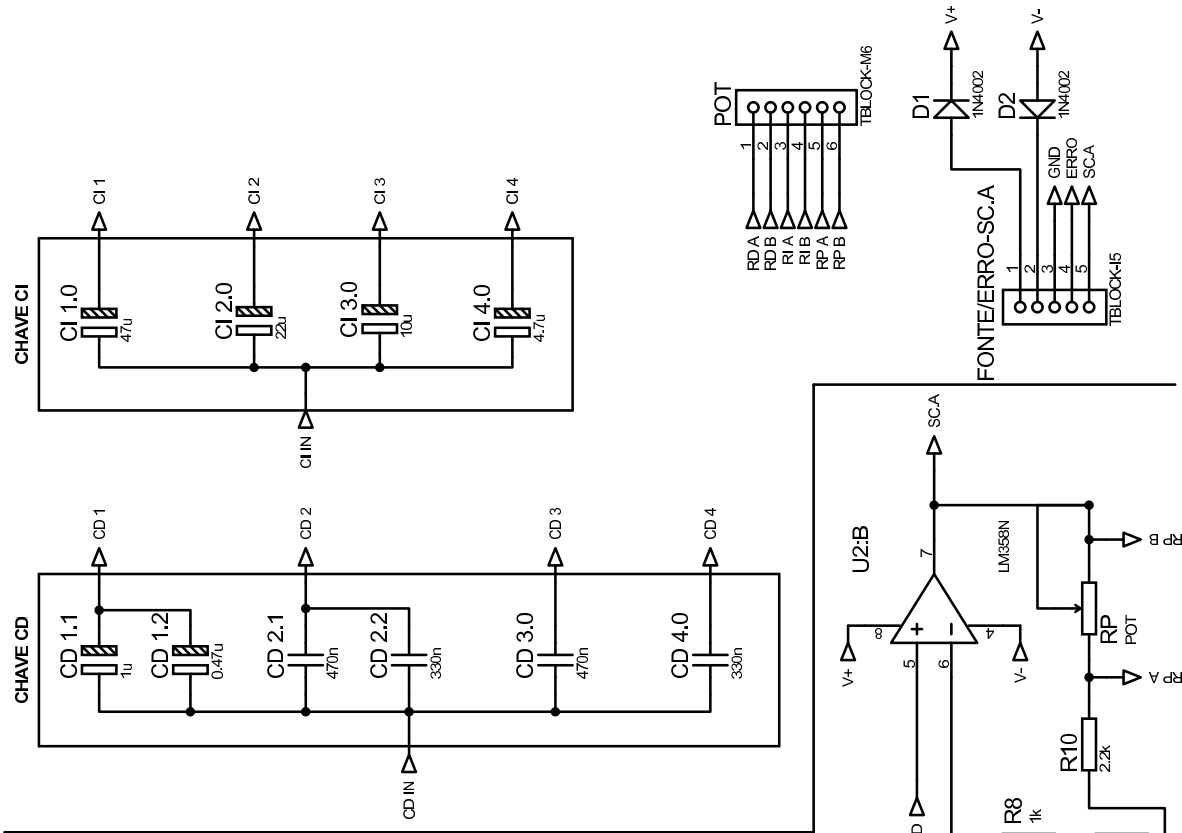
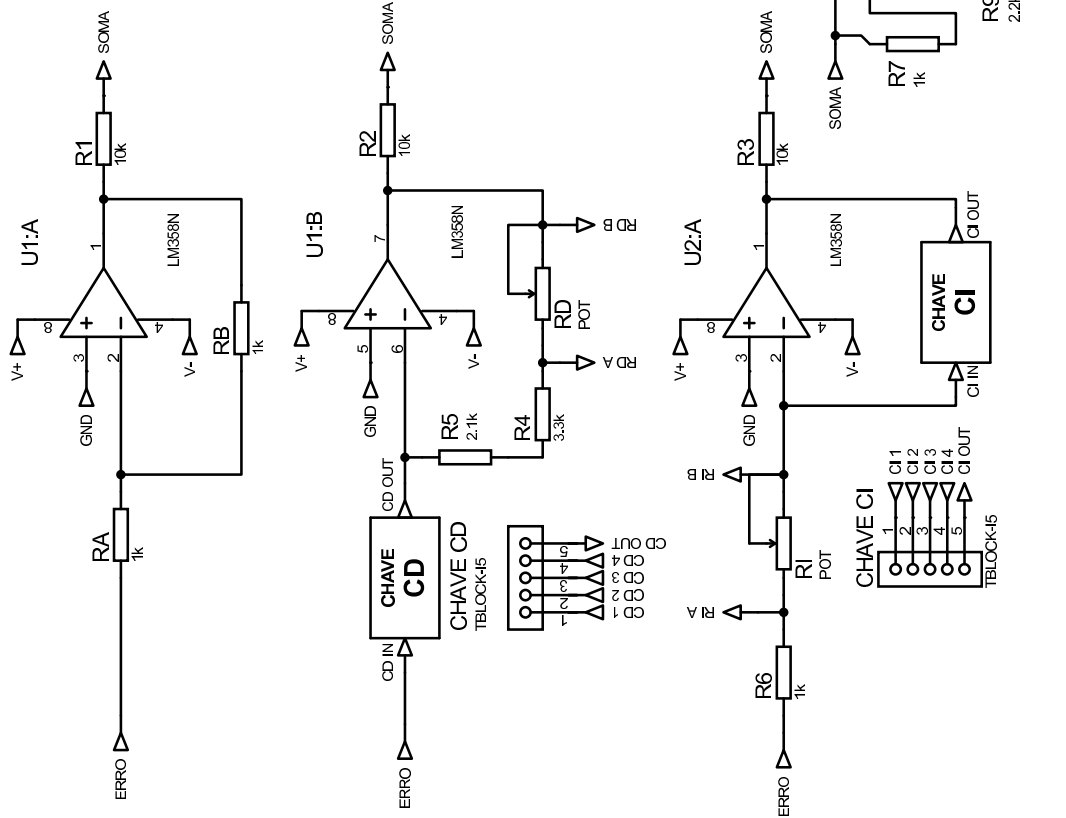
Apêndice A

Projeto dos circuitos dos Módulos da Bancada

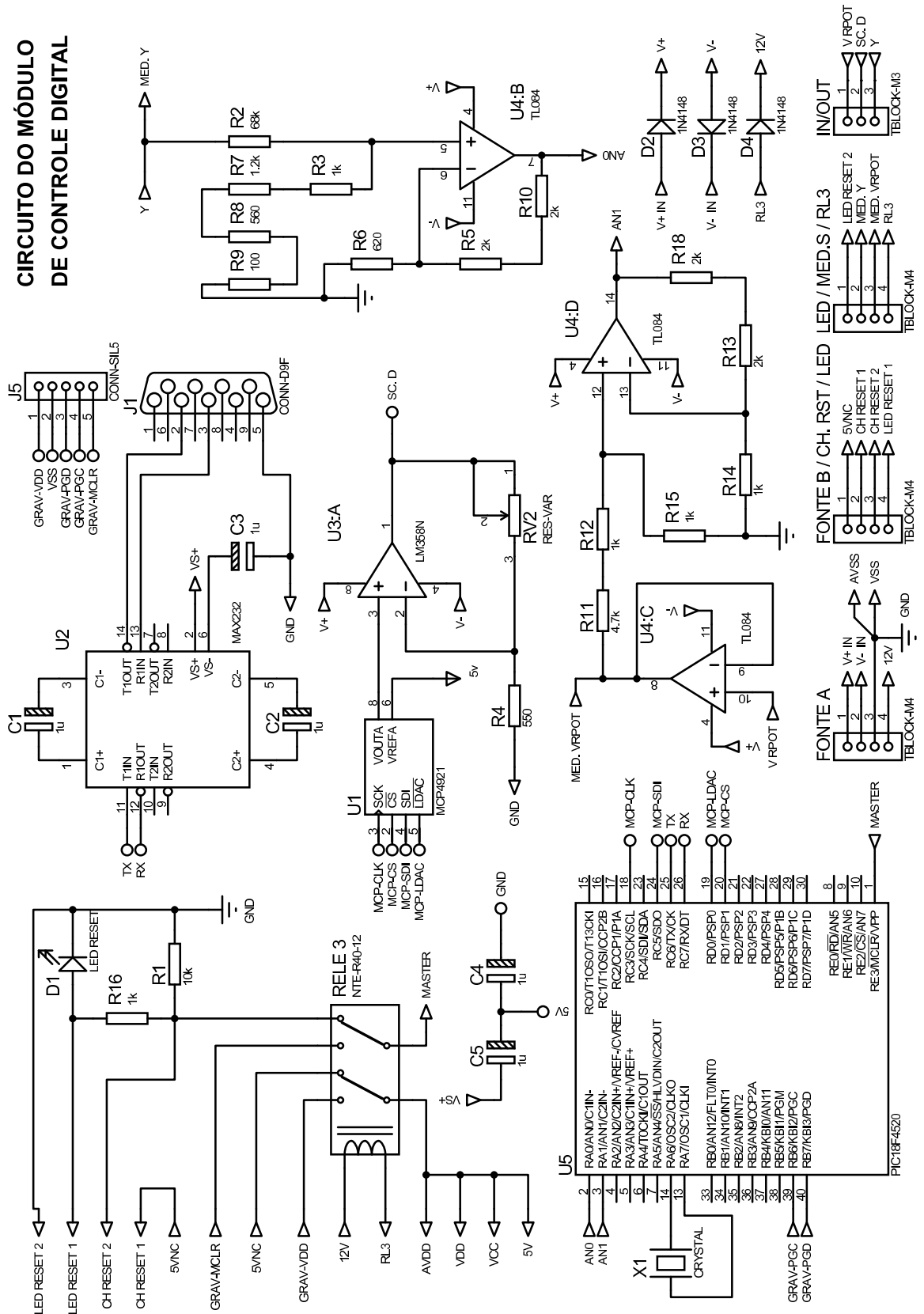
CIRCUITO DO MÓDULO DO SENSOR

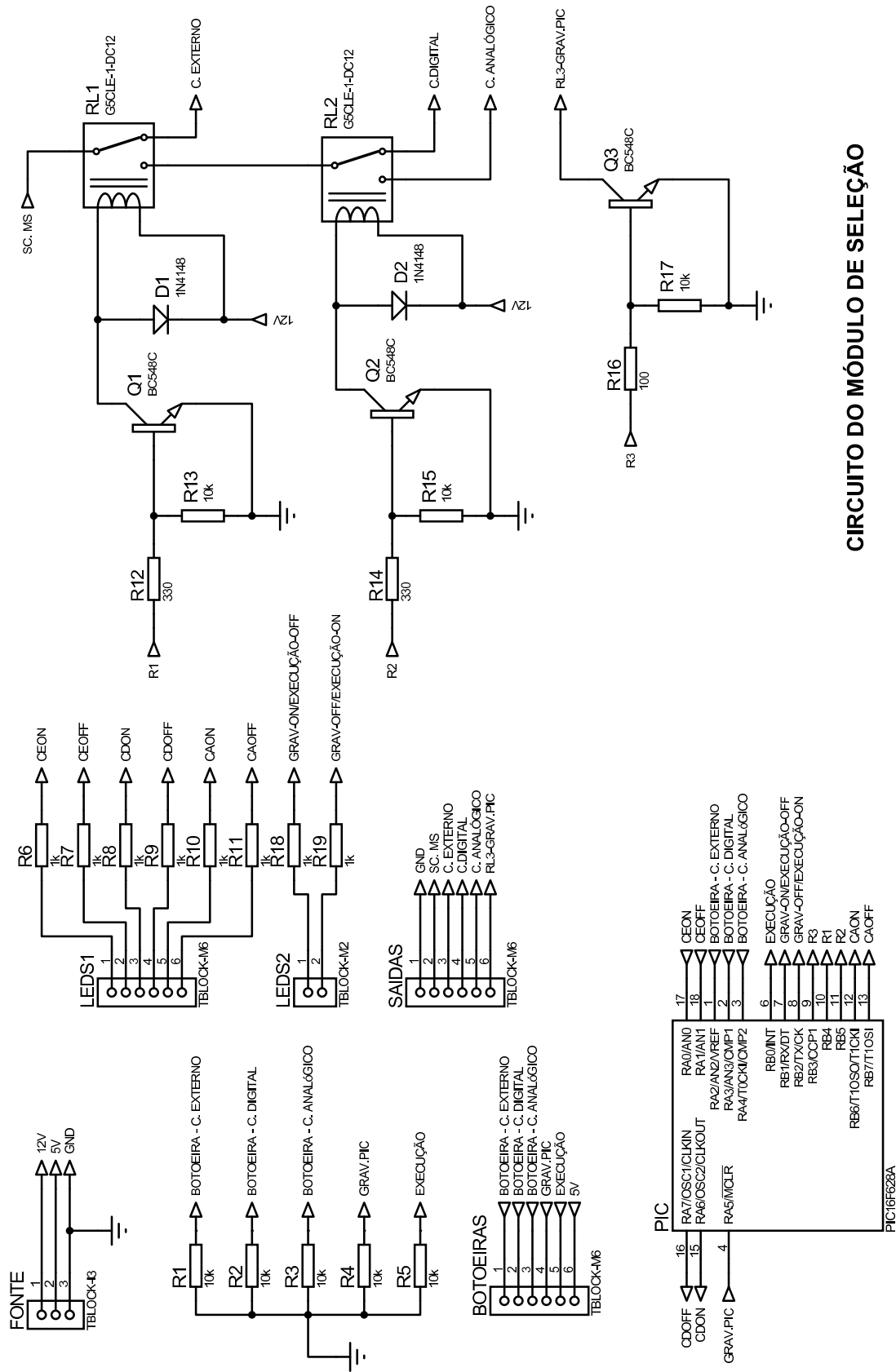


CIRCUITO DO MÓDULO DE CONTROLE ANALÓGICO

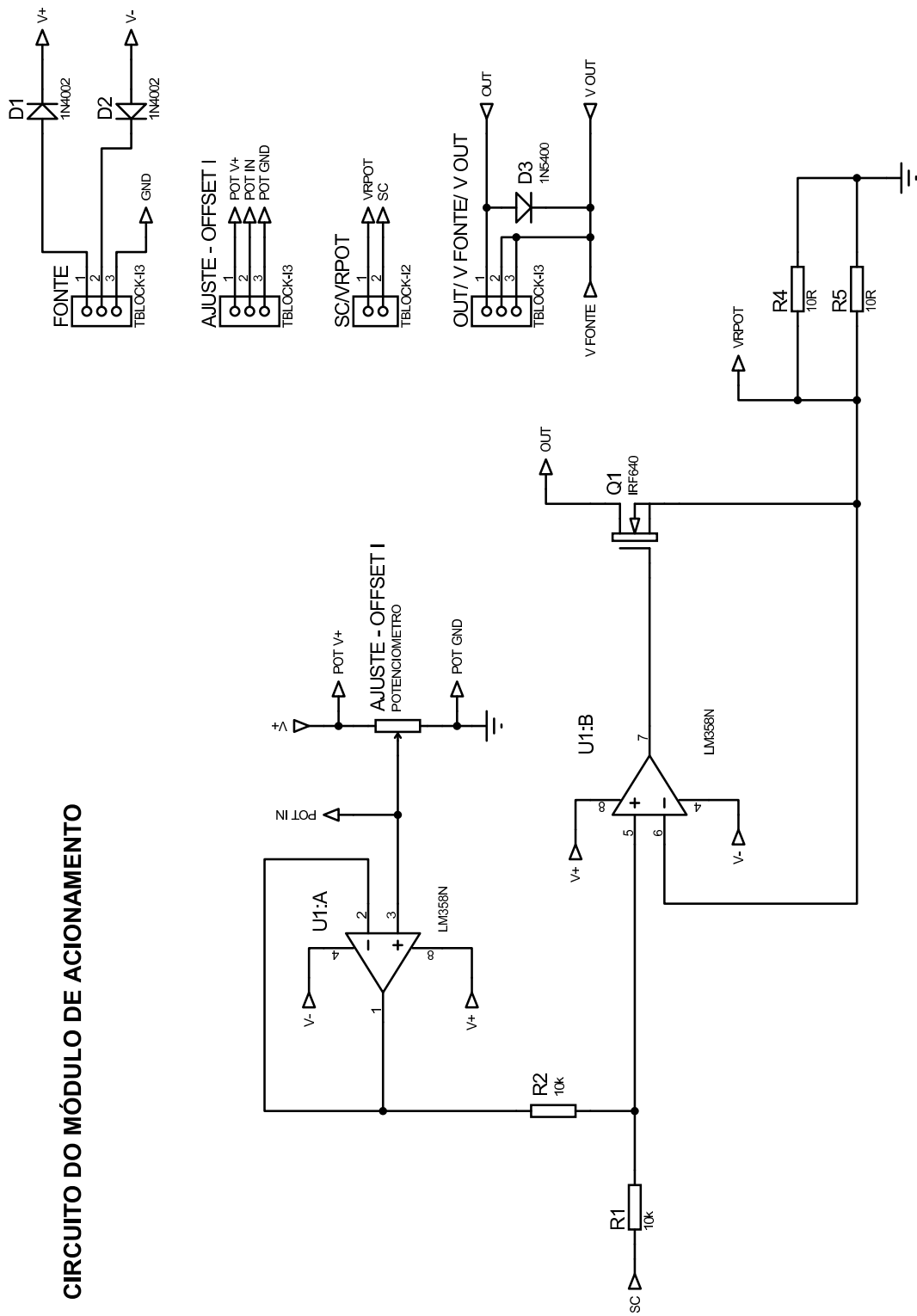


CIRCUITO DO MÓDULO DE CONTROLE DIGITAL



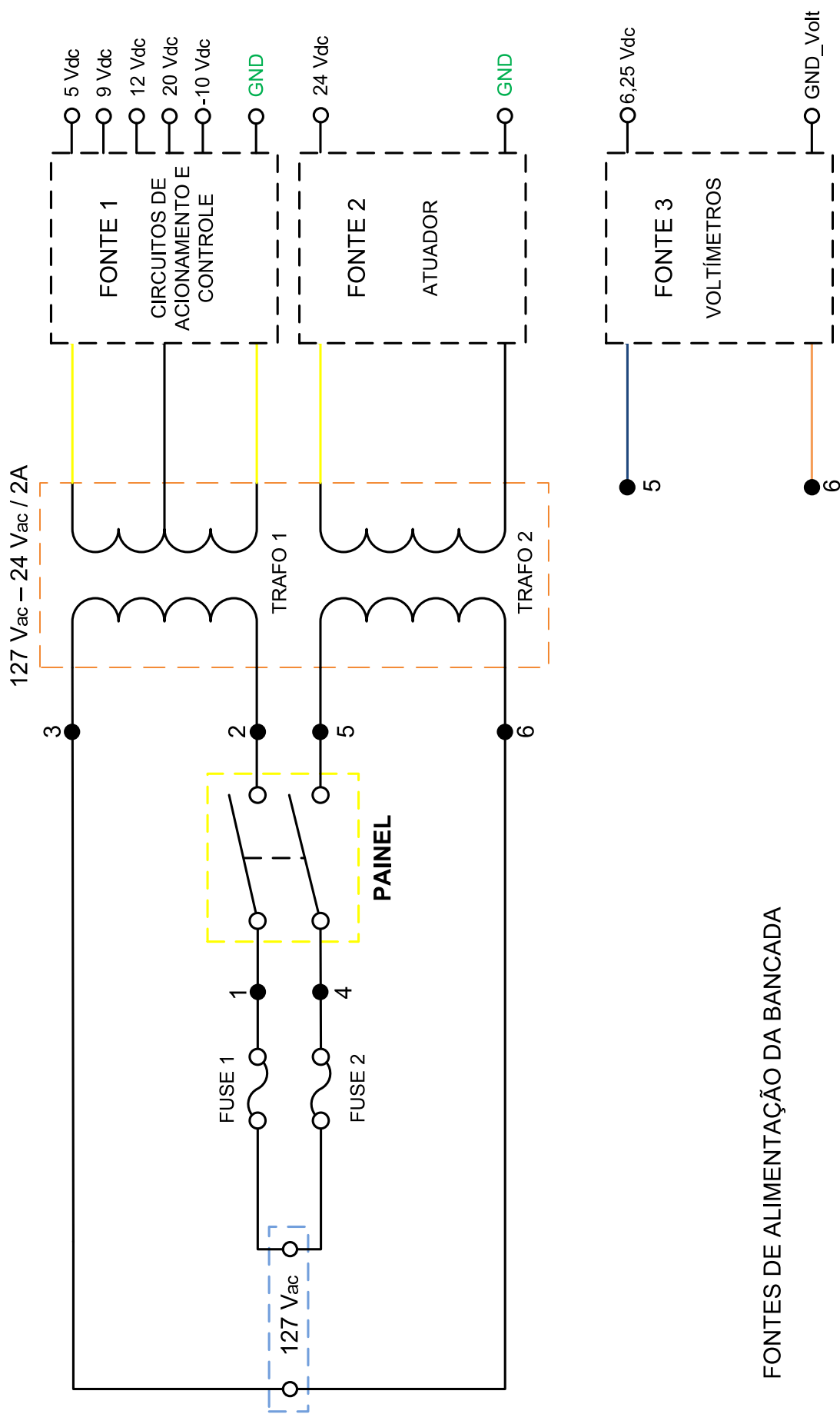


CIRCUITO DO MÓDULO DE ACIONAMENTO



Apêndice B

Diagrama de conexões



FONTES DE ALIMENTAÇÃO DA BANCADA

NOTA: A SAÍDA DA FONTE DOS VOLTÍMETROS É ISOLADA DO RESTANTE DAS FONTES DO SISTEMA.

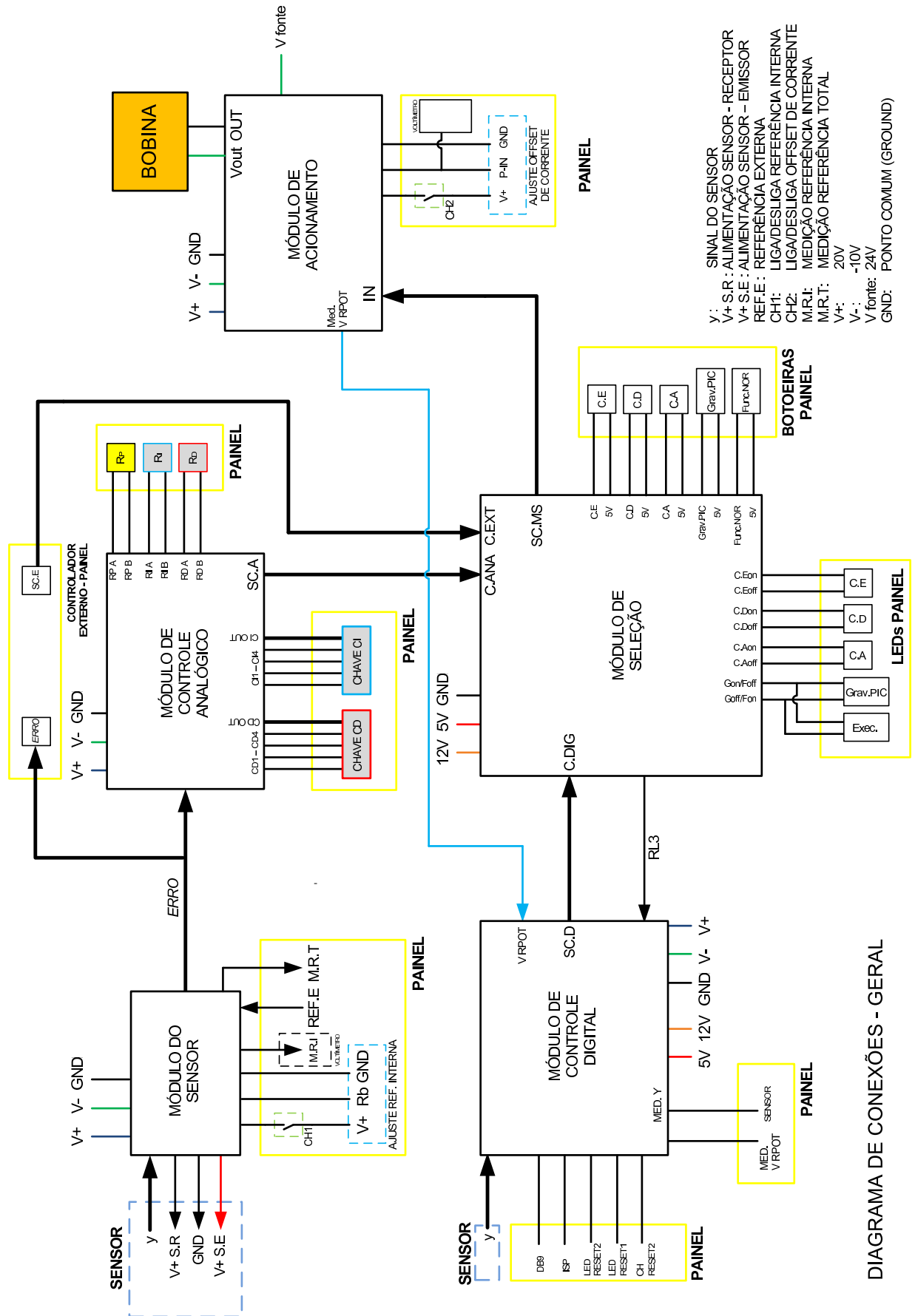


DIAGRAMA DE CONEXÕES - GERAL

Apêndice C

Programa do PIC16F628A para o Módulo de Seleção

```
////////////////////////////////////  
////      UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA      ////  
////      CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ      ////  
////      ////  
////      CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA      ////  
//////DE PROCESSO DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA - MAGLEV ////  
////      ////  
////      ////  
//////ESTE PROGRAMA FOI DESENVOLVIDO PARA SER      ////  
//////UTILIZADO EM UM PIC MODELO 16F628A, DO      ////  
//////MÓDULO DE SELEÇÃO DA BANCADA.      ////  
////////////////////////////////////  
  
////////////////////////////////////Inicio //////////////////////////////////////  
  
#include <16F628a.h>  
#use delay(clock=4000000)  
#fuses INTRC, NOWDT, NOPUT,BROWNOUT, NOMCLR  
#include <math.h>
```

```
void main() {
int chaexter, chadigit, chanalog; //Ch. dos controladores
int chagrav, chafunc;           //Ch. do modulo digital
int r1, r2, r3, r4, r5, cond;   //Cond. p/ funcionamento
int CEon, CEmoff, CDon, CDoff;  //Ind. luminosos - LEDs
int CAon, CAoff, GonFoff, GoffFon; //Ind. luminosos - LEDs

// Condições iniciais de funcionamento do sistema
// Controlador Analógico ligado - conf. natural dos relés

r1=0;           //Cond. inicial nula p/ C.E
r2=0;           //Cond. inicial nula p/ C.D
r3=1;           //Cond. inicial favoravel p/ C.A
r4=0;           //Cond. inicial nula p/ Grav. do PIC
r5=1;           //Cond. inicial favoravel p/
                //funcionamento normal de C.D

CEon=0;        //Desliga luz verde do LED indicador
CEoff=1;       //Liga luz vermelha do LED indicador

CDon=0;        //Desliga luz verde do LED indicador
CDoff=1;       //Liga luz vermelha do LED indicador

CAon=1;        //Liga luz verde do LED indicador
CAoff=0;       //Desliga luz vermelha do LED indicador

GonFoff=0;     //Liga luz verde do LED indicador da
                //gravação/Liga a luz vermelha do
                //funcionamento normal
GoffFon=1;     //Liga luz vermelha do LED indicador
                //da gravação/Liga luz verde do
                //funcionamento normal
```

```
while(1){

// Ler as chaves de seleção dos controladores

chaexter=input(pin_a2); //lé o estado de RA2 - C. Externo
chadigit=input(pin_a3); //lé o estado de RA3 - C. Digital
chanalog=input(pin_a4); //lé o estado de RA4 - C. Analógico

// Ler as chaves de seleção da gravação do modulo digital

chagrav=input(pin_a5); //lé o estado de RA5 - Grav. do PIC
chafunc=input(pin_b0); //lé o estado de RB0 - Exec. normal

//Bloco do selo do Controlador Externo
//Condição para o controlador externo
if ((chaexter==0)&(chadigit==1)&(chanalog==1)){

r1=1; //Relé 1 ligado
r2=0; //Relé 2 desligado
r3=0; //Cond. p/ funcionamento
//do C.A - Desligado
r4=0; //Relé 3 desligado
r5=1;

CEon=1; //Liga luz verde do LED indicador
CEoff=0; //Desliga luz vermelha do LED indicador

CDon=0; //Desliga luz verde do LED indicador
CDooff=1; //Liga luz vermelha do LED indicador

CAon=0; //Desliga luz verde do LED indicador
CAoff=1; //Liga luz vermelha do LED indicador
}
```



```
//Bloco do selo do Controlador Digital
//Condição para o controlador digital
if ((chaexter==1)&(chadigit==0)&(chanalog==1)){

r1=0;           //Relé 1 ligado
r2=1;           //Relé 2 desligado
r3=0;           //Condição p/ o funcionamento do C.
                //Analógico - Desligado

CEon=0;         //Desliga luz verde do LED indicador
CEoff=1;        //Liga luz vermelha do LED indicador

CDon=1;         //Liga luz verde do LED indicador
CDooff=0;       //Desliga luz vermelha do LED indicador

CAon=0;         //Desliga luz verde do LED indicador
CAoff=1;        //Liga luz vermelha do LED indicador

}

//Bloco do selo do Controlador Analógico
//Condição para o controlador analógico
if ((chaexter==1)&(chadigit==1)&(chanalog==0)){

r1=0;           //Relé 1 desligado
r2=0;           //Relé 2 desligado
r3=1;           //Condição p/ o funcionamento do C.
                //Analógico - Ligado
r4=0;           //Relé 3 desligado
r5=1;

CEon=0;         //Desliga luz verde do LED indicador
CEoff=1;        //Liga luz vermelha do LED indicador

CDon=0;         //Desliga luz verde do LED indicador
CDooff=1;       //Liga luz vermelha do LED indicador
```

```
CAon=1;           //Liga luz verde do LED indicador
CAoff=0;          //Desliga luz vermelha do LED indicador
}

//Bloco do selo da chave de seleção - GRAVAÇÃO /
//EXECUÇÃO do modulo digital

//Condição para a gravação do PIC
if ((chagrav==0)&(chafunc==1)&(r2==1)) {
r4=1;             //Relé 3 ligado
r5=0;

GonFoff=1;        //Liga luz verde do LED indicador
GoffFon=0;        //Liga luz vermelha do LED indicador
}

//Condição P/ funcionamento normal do modulo
if ((chagrav==1)&(chafunc==0)&(r2==1)) {

r4=0;             //Relé 3 desligado
r5=1;

GonFoff=0;        //Liga luz vermelha do LED indicador
GoffFon=1;        //Liga luz verde do LED indicador
}

//////////////////// Saida de dados //////////////////////////////////

//Relés

output_bit(pin_b4,r1); //coloca o pino especifico do
                       //pic no nivel da variavel r1
                       //(ON/OFF Relé 1)
output_bit(pin_b5,r2); //coloca o pino especifico do
                       //pic no nivel da variavel r2
                       //(ON/OFF Relé 2)
```

```
output_bit (pin_b3,r4); //coloca o pino especifico do
                        //pic no nivel da variavel r4
                        //(ON/OFF Relé 3)

//LEDs - Seleção do controlador

output_bit (pin_a0,CEon); //Liga/Desliga a luz indicativa
                        //(verde) do controle - RA0
output_bit (pin_a1,CEoff); //Liga/Desliga a luz indicativa
                        //(vermelha) do controle - RA1

output_bit (pin_a6,CDon); //Liga/Desliga a luz indicativa
                        //(verde) do controle - RA6
output_bit (pin_a7,CDoff); //Liga/Desliga a luz indicativa
                        //(vermelha) do controle - RA7

output_bit (pin_b6,CAon); //Liga/Desliga a luz indicativa
                        //(verde) do controle - RB6
output_bit (pin_b7,CAoff); //Liga/Desliga a luz indicativa
                        //(vermelha) do controle - RB7

//LEDs - EXECUÇÃO/GRAVAÇÃO

output_bit (pin_b1,GonFoff); //Liga/Desliga a luz indicativa
                        //da gravação - RB1
output_bit (pin_b2,GoffFon); //Liga/Desliga a luz indicativa
                        //do funcionamento - RB2

}
}
//////////////////////////////////// FIM //////////////////////////////////////
```

Apêndice D

Análise de custos - Relação de componentes

COMPONENTES PARA MONTAGEM DA BANCADA

Nº	DESCRIÇÃO	QUNT	PREÇO UNT.	TOTAL
1	Cooler 12x12 cm 250mA/12 V	1	R\$ 12,00	R\$ 12,00
2	Cooler 8x8 cm 150mA/12 V	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
3	Porta Fusível P/ Painel Grande Preto	2	R\$ 1,36	R\$ 2,72
4	Tomada AC Modelo AS02 para painel	1	R\$ 2,40	R\$ 2,40
5	Canaleta (sem ventilação) para passagem de fios (metro)	0,4	R\$ 3,00	R\$ 1,20
6	Canaleta perfurada para passagem de fios	1	R\$ 5,50	R\$ 5,50
7	Placa de PCI - 20X30 cm - Fenolite (fibra) cobreado/ Face simples	2	R\$ 22,00	R\$ 44,00
8	Placa de PCI - 15X20 cm - Fenolite (fibra) cobreado/ Face simples	1	R\$ 19,00	R\$ 19,00
9	Placa de PCI - 10X20 cm - Fenolite (fibra) cobreado/ Face simples	1	R\$ 17,00	R\$ 17,00
10	Atuador (Eletroímã) - Bobinagem e fio esmaltado 22 AWG	2	R\$ 40,00	R\$ 80,00
11	Cabo simples (0,75 mm) azul (metro)	5	R\$ 0,80	R\$ 4,00
12	Cabo simples (0,75 mm) branco (metro)	3	R\$ 0,80	R\$ 2,40
13	Cabo simples (0,75 mm) preto (metro)	5	R\$ 0,80	R\$ 4,00
14	Cabo simples (0,75 mm) verde (metro)	3	R\$ 0,80	R\$ 2,40
15	Cabo simples (0,75 mm) vermelho (metro)	3	R\$ 0,80	R\$ 2,40
16	Cabo tripolar p/ polar hoto (metro)	1,5	R\$ 0,50	R\$ 0,75
17	Cabo coaxial RGC 58 (metro)	1,5	R\$ 2,50	R\$ 3,75
18	Cabo philips 3 vias 3x3,20 (metro)	1,5	R\$ 2,56	R\$ 3,84
19	Cabinho de telefone (metro)	1,5	R\$ 0,80	R\$ 1,20
20	Terminal - tipo agulha	100	R\$ 0,70	R\$ 70,00
21	Sindal p/ conexão	1	R\$ 1,90	R\$ 1,90
22	Adesivo Eóxil - Araldite	1	R\$ 14,79	R\$ 14,79
			Total	R\$ 300,25

CIRCUITO - MÓDULO DE CONTROLE ANALÓGICO PID

Nº	DESCRIÇÃO	QUNT	PREÇO UNT.	TOTAL
1	Capacitor poliester - 330 nF	2	R\$ 0,18	R\$ 0,36
2	Capacitor poliester - 470 nF	2	R\$ 0,18	R\$ 0,36
3	Capacitor eletrolítico - 0,47 μ F / 50V	1	R\$ 0,12	R\$ 0,12
4	Capacitor eletrolítico - 1 μ F / 50V	3	R\$ 0,12	R\$ 0,36
5	Capacitor eletrolítico - 4,7 μ F / 50V	1	R\$ 0,12	R\$ 0,12
6	Capacitor eletrolítico - 10 μ F / 50V	1	R\$ 0,15	R\$ 0,15
7	Capacitor eletrolítico - 22 μ F / 50V	1	R\$ 0,32	R\$ 0,32
8	Capacitor eletrolítico - 47 μ F / 50V	1	R\$ 0,43	R\$ 0,43
9	Resistor 0,6W - 1 K Ω	5	R\$ 0,08	R\$ 0,40
10	Resistor 0,6W - 2,1 K Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
11	Resistor 0,6W - 2,2 K Ω	2	R\$ 0,08	R\$ 0,16
12	Resistor 0,6W - 3,3 K Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
13	Resistor 0,6W - 10 K Ω	3	R\$ 0,08	R\$ 0,24
14	Potenciometro de 5K Linear Eixo de Ferro (Fixado no painel)	1	R\$ 2,50	R\$ 2,50

15	Potenciometro de 20K Linear Eixo de Ferro (Fixado no painel)	1	R\$ 2,50	R\$ 2,50
16	Potenciometro de 50K Linear Eixo de Ferro (Fixado no painel)	1	R\$ 2,50	R\$ 2,50
17	Amplificador Operacional - LM 358	2	R\$ 2,30	R\$ 4,60
18	Soquete para CI torneado - 8 pinos	2	R\$ 0,60	R\$ 1,20
19	Borne retangular para PCI - 5 terminais (Borne KF-301 5T)	3	R\$ 0,66	R\$ 1,98
20	Borne retangular para PCI - 6 terminais (KF-3000 KRE3)	1	R\$ 0,90	R\$ 0,90
21	Diodo 1N4002	2	R\$ 0,13	R\$ 0,26
			Total	R\$ 19,62

CIRCUITO - MÓDULO DE CONTROLE DIGITAL

Nº	DESCRIÇÃO	QUNT	PREÇO UNT.	TOTAL
1	Capacitor eletrolítico - 1 μ F / 50V	5	R\$ 0,12	R\$ 0,60
2	Resistor 0,6W - 100 Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
3	Resistor 0,6W - 550 Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
4	Resistor 0,6W - 560 Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
5	Resistor 0,6W - 620 Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
6	Resistor 0,6W - 1 K Ω	4	R\$ 0,08	R\$ 0,32
7	Resistor 0,6W - 1,2K Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
8	Resistor 0,6W - 2 K Ω	4	R\$ 0,08	R\$ 0,32
9	Resistor 0,6W - 4,7 K Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
10	Resistor 0,6W - 10 K Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
11	Resistor 0,6W - 68 K Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
12	Microcontrolador PIC (18F4520)	1	R\$ 27,65	R\$ 27,65
13	Soquete para CI estampado - 16 pinos	1	R\$ 0,21	R\$ 0,21
14	Soquete para CI estampado - 40 pinos	1	R\$ 0,51	R\$ 0,51
15	CI Max 232	1	R\$ 2,96	R\$ 2,96
16	CI MCP 4921- Conversor D/A 12 BIT	1	R\$ 8,72	R\$ 8,72
17	Capa para conector DB9 com kit curto	1	R\$ 0,63	R\$ 0,63
18	Conector DB9 fema 180 graus - solda placa	1	R\$ 1,56	R\$ 1,56
19	Cristal oscilador 20MHz	1	R\$ 2,40	R\$ 2,40
20	Amplificador Operacional - TL084	1	R\$ 2,30	R\$ 2,30
21	Trimpot 10 K Ω	1	R\$ 1,50	R\$ 1,50
22	Borne retangular para PCI - 4 terminais (Borne KF-301 4T)	3	R\$ 0,66	R\$ 1,98
23	Borne retangular para PCI - 3 terminais (Borne KF-301 4T)	1	R\$ 0,66	R\$ 0,66
24	Relé 6 contatos 12V	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
25	Diodo 1N4002	3	R\$ 0,13	R\$ 0,39
			Total	R\$ 58,35

FONTE DE ALIMENTAÇÃO - CIRCUITOS DE ACIONAMENTO E CONTROLE

Nº	DESCRIÇÃO	QUNT .	PREÇO UNT.	TOTAL
1	Transformador para Fonte de Alimentação com Primário de 110/220 Volts e Secundário de: 2 A com - 24V/+24V	1	R\$ 26,00	R\$ 26,00
2	Ponte de Diodo Retificadora (D3SBA60)	1	R\$ 2,39	R\$ 2,39
3	Capacitor Eletrolítico - 2200 µF/50V	2	R\$ 2,82	R\$ 5,64
4	Capacitor Poliéster - 100 nF	5	R\$ 0,15	R\$ 0,75
5	Regulador de tensão - LM 7820	1	R\$ 1,50	R\$ 1,50
6	Regulador de tensão - LM 7812	1	R\$ 1,50	R\$ 1,50
7	Regulador de tensão - LM 7809	1	R\$ 1,04	R\$ 1,04
8	Regulador de tensão - LM 7805	1	R\$ 0,99	R\$ 0,99
9	Regulador de tensão - LM 7910	1	R\$ 2,00	R\$ 2,00
10	Fusível pequeno (vidro) - 1A	5	R\$ 0,25	R\$ 1,25
11	Porta fusível (para placa de circuito impresso com tampa)	5	R\$ 0,43	R\$ 2,15
12	Borne retangular para PCI (Borne KF-3000 KRE3) - 3 terminais	3	R\$ 0,90	R\$ 2,70
			Total	R\$ 47,91

FONTE DE ALIMENTAÇÃO - ELETROÍMÃ

Nº	DESCRIÇÃO	QUNT .	PREÇO UNT.	TOTAL
1	Transformador para Fonte de Alimentação com Primário de 110/220 Volts e Secundário de: 2 A com - 24V/+24V	1	R\$ 26,00	R\$ 26,00
2	Ponte de Diodo Retificadora (D5SBA20)	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
3	Capacitor Eletrolítico - 2200 µF/50V	1	R\$ 2,82	R\$ 2,82
4	Capacitor Poliéster - 100 nF	1	R\$ 0,15	R\$ 0,15
5	Regulador de tensão - LM 7824	2	R\$ 1,13	R\$ 2,26
6	Fusível pequeno (vidro) - 1A	2	R\$ 0,25	R\$ 0,50
7	Porta fusível (para placa de circuito impresso - exposto)	2	R\$ 2,25	R\$ 4,50
8	Borne retangular para PCI (Borne KF-301 2T) - 2 terminais	2	R\$ 0,66	R\$ 1,32
			Total	R\$ 42,55

CIRCUITO - MÓDULO DO SENSOR

Nº	DESCRIÇÃO	QUNT .	PREÇO UNT.	TOTAL
1	Resistor 0,6W - 560 Ω	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
2	Resistor 0,6W - 100 KΩ	1	R\$ 0,08	R\$ 0,08
3	Resistor 0,6W - 10 KΩ	9	R\$ 0,08	R\$ 0,72
4	Amplificador Operacional - LM 358	3	R\$ 0,74	R\$ 2,22
5	Soquete para CI torneado - 8 pinos	3	R\$ 0,60	R\$ 1,80
6	Borne retangular para Circuito Impresso KRE 3- 3 terminais	3	R\$ 0,92	R\$ 2,76
7	Borne retangular para Circuito Impresso KRE 4- 4 terminais	2	R\$ 2,85	R\$ 5,70

8	Potênciometro de 100K Linear Eixo de Ferro (Fixado no painel)	1	R\$ 3,99	R\$ 3,99
9	LED INFRAVERMELHO TIL32 (Emissor Infravermelho)	1	R\$ 0,48	R\$ 0,48
10	Fototransistor Infravermelho TIL78 (Receptor Infravermelho)	1	R\$ 0,72	R\$ 0,72
11	Montagem sensor - Luva eletroduto 1/2"	2	R\$ 0,35	R\$ 0,70
12	Montagem sensor - Nipel rosqueavel 1/2"	2	R\$ 0,45	R\$ 0,90
13	Montagem sensor - Capa PVC Rosqueavel 1/2"	2	R\$ 0,45	R\$ 0,90
14	Diodo 1N4002	2	R\$ 0,13	R\$ 0,26
			Total	R\$ 21,05

CIRCUITO - MÓDULO DE ACIONAMENTO

Nº	DESCRIÇÃO	QUNT .	PREÇO UNT.	TOTAL
1	Soquete para CI torneado - 8 pinos	1	R\$ 0,60	R\$ 0,60
2	Transistor MOSFET IRF 640	1	R\$ 2,39	R\$ 2,39
3	Resistor de Potência 10W - 10Ω (10W10Rj)	2	R\$ 2,07	R\$ 4,14
4	Resistor 0,6W - 10 KΩ	2	R\$ 0,08	R\$ 0,16
5	Amplificador Operacional - LM 358	1	R\$ 0,74	R\$ 0,74
6	Potênciometro de 100K Linear Eixo de Ferro (Fixado no painel)	1	R\$ 3,99	R\$ 3,99
7	Borne retangular para PCI - 2 terminais (Borne KF-301 2T)	1	R\$ 0,66	R\$ 0,66
8	Borne retangular para Circuito Impresso KRE 3- 3 terminais	3	R\$ 0,92	R\$ 2,76
9	Diodo UF54404	1	R\$ 0,65	R\$ 0,65
10	Diodo 1N4002	2	R\$ 0,13	R\$ 0,26
			Total	R\$ 16,35

CIRCUITO - MÓDULO DE SELEÇÃO

Nº	DESCRIÇÃO	QUNT .	PREÇO UNT.	TOTAL
1	Microcontrolador PIC (16F628A)	1	R\$ 8,59	R\$ 8,59
2	Resistor 0,6W - 10 KΩ	8	R\$ 0,08	R\$ 0,64
3	Resistor 0,6W - 1 KΩ	6	R\$ 0,08	R\$ 0,48
4	Resistor 0,6W - 560 Ω	2	R\$ 0,08	R\$ 0,16
5	Resistor 0,6W - 330Ω	2	R\$ 0,08	R\$ 0,16
6	Resistor 0,6W - 100Ω (dois deles estão no painel)	3	R\$ 0,08	R\$ 0,24
7	Transistor BC 548	3	R\$ 0,15	R\$ 0,45
8	Relé - JQX-14FF3 (T73)	2	R\$ 3,50	R\$ 7,00
9	Borne Para Circuito Impresso KRE 6	3	R\$ 1,08	R\$ 3,24
10	Borne retangular para Circuito Impresso KRE 5- 5 terminais	1	R\$ 0,92	R\$ 0,92
			Total	R\$ 21,88

PAINEL DE COMANDO

Nº	DESCRIÇÃO	QUNT.	PREÇO UNT.	TOTAL
1	Borne P/ Pino Banana Azul Médio	6	R\$ 0,83	R\$ 4,98
2	Borne P/ Pino Banana Preto Médio	2	R\$ 0,83	R\$ 1,66
3	Knob azul para eixo estiado	5	R\$ 1,50	R\$ 7,50
4	Suporte para LED 5 mm preto	9	R\$ 0,33	R\$ 2,97
	LED 5 mm bicolor (verde/vermelho)	9	R\$ 0,54	R\$ 4,86
5	Chave seletora - 4 contatos (Seleção dos capacitores)	2	R\$ 4,00	R\$ 8,00
6	Chave Push Button (Com trava) - NA	1	R\$ 1,89	R\$ 1,89
	Chave Push Button (Com trava) - Chave ON/OFF- NA	2	R\$ 5,00	R\$ 10,00
7	Conector DB9 Fêmea Solda Fio	1	R\$ 0,45	R\$ 0,45
8	Conector header 10 pinos 180 graus	1	R\$ 0,25	R\$ 0,25
9	Chave Push Button DS-314 (Sem Trava Preta) - NF	6	R\$ 1,35	R\$ 8,10
10	Voltímetro digital (PM 438)	2	R\$ 25,99	R\$ 51,98
11	Placa de acrílico 37x26 cm (5 mm) - com desenho	1	R\$ 310,00	R\$ 310,00
			Total	R\$ 412,64

CUSTO TOTAL DO EQUIPAMENTO

Nº	DESCRIÇÃO	TOTAL
1	Bancada Didática MAGLEV	R\$ 940,60
2	Mão-de-obra do bolsista responsável pelo projeto - período de trabalho equivalente a 12 meses.	R\$ 3.504,00
3	Custo TOTAL	R\$ 4.444,60

Referências Bibliográficas

- [1] Conectando um microcontrolador a um pc. *Eletrônica Total nº 102*, Setembro/Outubro de 2004.
- [2] Datasheet PIC 16F62x. Flash-based 8-bit cmos microcontrollers. *Microchip*, 1999.
- [3] Datasheet PIC 16F87X. 28/40-pin 8-bit cmos flash microcontrollers. *Microchip*, 2001.
- [4] Datasheet PIC 18FXX2. High performance, enhanced flash microcontrollers with 10-bit a/d. *Microchip*, 2002.
- [5] Jr; Stephen D. Umans A. E. Fitzgerald; Charles Kingsley. *Máquinas Elétricas. 6.ed.* Bookman, Porto Alegre, 2006.
- [6] Luis Antonio Aguirre. *Introdução à identificação de sistemas*. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2004.
- [7] Ivo Barbi. *Eletônica de Potência. 6.ed.* Edição do Autor, Florianópolis, 2006.
- [8] M. Rothe-Neves; O. F. Silva; J. A. L. Barreiros. Metodologia para construção de protótipos didáticos para os cursos de controle e automação de sistemas. *Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, 2004.
- [9] Rafael Suzuki Bayma. *Construção de Protótipo Didático para Laboratório de Ensino e Pesquisa: Pêndulo Rotacional*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2005.
- [10] Datasheet BC548. Amplifier transistors npn silicon. *Motorola*, 1996.
- [11] Edson Bim. *Máquinas Elétricas e Acionamento*. Elsevier, Rio de Janeiro, 2009.
- [12] Julio Sanchez; Maria P. Canton. *Microcontroller Programming The Microchip PIC®*. CRC Press, New York, 2007.

- [13] Edmur Canzian. Minicurso comunicação serial - rs232. <http://www.cnz.com.br>, extraído em 15 de maio de 2010 às 14:00.
- [14] Rômulo L. Milhomem; Rafael S. Bayma; Cleison D. Silva; Adjan M. Castro. Desenvolvimento de um protótipo didático de levitação magnética. *XXXVII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*, 2009.
- [15] Angel Abusleme; Aldo Cipriano. Experiencia de levitación magnética de bajo costo para laboratorio de control automático. *Pontificia Universidad Católica de Chile*, 2003.
- [16] D.A.B.B Coelho, E.M.; Luís. *Construção de protótipo portátil para ensino e pesquisa*. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2003.
- [17] Eduardo Alves da Costa. Controle da suspensão eletromagnética de um veículo maglev. 2004.
- [18] Cleison Daniel Silva; Antonio da Silva Silveira. *Ferramenta Computacional em LabVIEW para uso do Protótipo Didático: Servomotor CC*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2006.
- [19] Datasheet DAC0808. 8-bit d/a converters. *National Semiconductor*, 1995.
- [20] Datasheet DAC1208. 12-bit, μ p compatible, double-buffered d to a converters. *National Semiconductor*, 1995.
- [21] Richard Magdalena Stephan; Eduardo Gonçalves David. *MAGLEV-COBRA: O TRANSPORTE URBANO SOBRE TRILHOS MAGNÉTICOS*. 2007.
- [22] Adjan Matos de Castro. *Modelagem e estratégias de controle digital aplicadas a um sistema de levitação magnética - MAGLEV*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Tucuruí - PA, 2010.
- [23] Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa. *Estudo de um Sistema Inteligente para o Controle de Posição do Plasma no Tokamak - ETE*. Dissertação de doutorado em Engenharia Eletônica e Computação. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos - SP, 2003.

- [24] Marcelo do Vale Coimbra. *MAGLEV, uma nova tecnologia aplicada para o transporte de massa*. Trabalho de Conclusão de Disciplina. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro - RJ, 2006.
- [25] Roberto Bairros dos Santos. *Regulador de tensão usando CI*. www.bairrospd.kit.net, extraído em 06 de agosto de 2009 às 17:54, 2009.
- [26] Samuel Earnshaw. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 3:97–112, 1842.
- [27] ELNEC. Picprog2 pic microcontrollers programmer. <http://www.elnec.com>.
- [28] Flávio Faccin. *Abordagem Inovadora no Projeto de Controladores PID*. Dissertação de mestrado em Engenharia de Controle de Processos. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA, Porto Alegre - RS, 2004.
- [29] Richard Stephan Guilherme Sotelo, Rafael Gomes. Comparação de configurações para um levitador eletromagnético pelo método dos elementos finitos. *Congresso Brasileiro de Automática*, 2003.
- [30] F. T. Holmes. Axial magnetic suspensions. *Rev. Phys. Instrum.*, 8:444–447, 1937.
- [31] Datasheet IRF640. N - channel 200v - 0.150 Ω - 18a to-220/to-220fp mesh overlay mosfet. *STMicroelectronics*, 1999.
- [32] Wilmar Lacerda Kauss. *Motor Mancal Magnético com controle ótimo implementado em um DSP*. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro - RJ, 2008.
- [33] J. Boehm; R.B Gerber; N. R. C. Kiley. Sensors for magnetic bearings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29:2962–2964, 1993.
- [34] S.A. Lang, Z.Q.; Billings. Energy transfer properties of nonlinear systems in the frequency domain. *Internacional Journal of Control*, 78:345–362, October 2004.
- [35] Datasheet LM78XX. Lm340/lm78xx series 3-terminal positive regulators. *National Semiconductor*, 2001.

- [36] Datasheet LM79XX. Lm79xx series 3-terminal negative regulators. *National Semiconductor*, 1994.
- [37] Datasheet LMx58. Low power dual operational amplifiers. *STMicroelectronics*, 2002.
- [38] K. A. Lilenkamp; K. Lundberg. *Low Cost Magnetic Levitation Project Kits For Teaching Feedback System Design*. American control conference, 2004.
- [39] Kent H. Lundberg; Katie A. Lilienkamp; Guy Marsden. Low-cost magnetic levitation project kits. *IEEE Control Systems Magazine*, pages 65–69, October 2004.
- [40] Datasheet MAX232. +5v-powered, multichannel rs-232 drivers/receivers. *Maxim*, 2000.
- [41] Datasheet MCP4921. 12-bit dac with spi interface. *Microchip*, 2007.
- [42] Rômulo L. Milhomem. Desenvolvimento de um protótipo didático de levitação magnética. *Relatório de Estágio Supervisionado*, 2009.
- [43] Luiz Henrique Alves Monteiro. *Sistemas Dinâmicos. 2.ed.* Livraria da Física, São Paulo, 2006.
- [44] Milica B. Naumovic. Modeling of a didactic magnetic levitation system for control education. 2003.
- [45] Norman S. Nise. *Engenharia de Sistemas de Controle. 3.ed.* LTC, São Paulo, 2003.
- [46] Katsuhiko Ogata. *Engenharia de Controle Moderno. 4.ed.* Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2003.
- [47] Datasheet PM438. Lcd panel meter. *JPR Electronics*.
- [48] Charles K. Alexander; Matthew N. O. Sadiku. *Fundamentos de Circuitos Elétricos*. Bookman, Porto Alegre, 2003.
- [49] Matthew N. O. Sadiku. *Elementos de Eletromagnetismo. 3ª.ed.* Bookman, São Paulo, 2004.
- [50] CCS Custom Computer Services. <http://www.ccsinfo.com/>. *Website*.
- [51] A. S. Sedra; K. C. Smith. *Microeletrônica. 4.ed.* Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2000.
- [52] Karl Johan Åström; Tore Hagglund. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2.ed.* 1994.

- [53] Wikipedia – Supercondutividade. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Supercondutividade>. *Website*, extraído em 24 de maio de 2009 às 19:32.
- [54] Raphael Barros Teixeira. *Desenvolvimento de um Protótipo de Levitação Magnética para Ensino e Pesquisa: Sistema de Levitação - MAGLEV*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2006.
- [55] Roberto A. Tenenbaum. *Dinâmica*. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.
- [56] Datasheet TL084. General purpose j-fet quad operacional amplifiers. *STMicroelectronics*, 2001.
- [57] V. A. Oliveira; M. L. Aguiar; J. B. Vargas. *Sistemas de controle: aulas de laboratório. Publicação EESC -USP*, 2005.
- [58] Simin Haykin; Barry Van Veen. *Sinais e Sistemas*. Bookman, Porto Alegre, 2001.
- [59] William G. Hurley; Werner H. Wolfle. Electromagnetic design of a magnetic suspension system. *IEEE Transactions on Education*, 40:124 – 130, 1997.
- [60] T. H. Wong. Design of a magnetic levitation control system - an undergraduate project. *IEEE Transactions on Education*, 29:196–200, 1986.