

Universidade Federal do Rio de Janeiro

SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA COMO PRODUTO

Hugo Pelle Ferreira

2019



SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA COMO PRODUTO

Hugo Pelle Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Rio de Janeiro

Março de 2019

SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA COMO PRODUTO

Hugo Pelle Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

Prof. José Andrés Santisteban Larrea, D.Sc.

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2019

Ferreira, Hugo Pelle

Sistema de Levitação Magnética como Produto / Hugo Pelle Ferreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2019.

XVII, 88 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 63-70.

1. Introdução. 2. Análise e Modelagem do Sistema de Levitação Eletromagnética. 3. Projeto dos Elementos do Sistema de Levitação. 4. Análise de Mercado. 5. Conclusões e Trabalhos Futuros. I. Stephan, Richard Magdalena. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sua infinita misericórdia e força que me ajudaram a chegar até aqui e enfrentar todos os desafios.

Agradeço ao Professor Richard Magdalena Stephan por ter me selecionado como aluno de iniciação científica do Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) e do Laboratório de Máquinas (LabMaq), o que me permitiu ter a primeira oportunidade de colocar em prática os conhecimentos vistos ao longo do curso, ampliar os horizontes e ter acesso ao estado da arte da tecnologia de levitação magnética, com os mancais magnéticos e o projeto *MagLev-Cobra*, além de participar de duas conferências internacionais sobre o tema. Agradeço também por sua paciência, confiança e didática para a orientação deste trabalho e ao longo da graduação e mestrado, que contribuíram muito para minha formação como engenheiro e ser humano.

Agradeço ao Professor José Andrés Santisteban Larrea e ao Professor Luís Guilherme Barbosa Rolim por aceitarem o convite para participar da banca de avaliação deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço à CAPES, CNPq e FAPERJ pelo apoio financeiro.

Agradeço ao programa de iniciação ao empreendedorismo *Academic Working Capital* (AWC) do Instituto TIM por auxiliarem este trabalho financeiramente e com mentoria que abriu os horizontes para este mundo da inovação. Agradeço em especial aos representantes Diogo Dutra, Marcos Barreto e Roberto Falcão.

Agradeço a empresa *Kryo*, em especial ao Bruno, pela produção do protótipo de alta qualidade e dos belos designs para novas linhas de produto. Agradeço à *Texas Instruments* pelo fornecimento gratuito dos circuitos integrados que foram aplicados na placa de teste do protótipo.

Agradeço à minha mãe, Lenita, pelo imenso apoio, amor, carinho e incentivo incondicionais para alcançar meus objetivos e cumprir mais uma etapa de minha vida. Não há palavras suficientes para expressar meu agradecimento!

Agradeço ao meu pai, José Manuel, por me ensinar a importância da matemática e estímulo para as ciências exatas. Agradeço à minha irmã, Carolina, por sua ajuda nesta caminhada. Agradeço aos demais familiares que sempre torceram por mim.

Agradeço a todos os amigos que tive a oportunidade de encontrar ao longo dos anos e compartilhar vários momentos que tornaram esta caminhada mais leve, em especial Andrei, Bruno, Carlos Augusto, Carolina, Fábio, Felipe, Leonardo, Marcelo Lopes, Marcello, Rafaela, Rodrigo, Samuel e Yuri.

Agradeço aos meus companheiros por essa jornada empreendedora, os engenheiros Alan Endalécio, e Vinícius Rodrigues, que além de serem grandes amigos, muito me auxiliaram nas atividades do laboratório e a quem estarei sempre em débito. Agradeço também aos demais participantes deste projeto por um curto período, mas que deram contribuição significativa, como a *designer* Haline de Oliveira Pinto e a parceria da Escola de Belas Artes da UFRJ, e a Ryan Berriel e Guilherme Viamonte.

Agradeço à toda a equipe do LASUP e do LabMaq por me darem todas as condições e suporte para a realização deste trabalho em um excelente ambiente, em especial ao Professor Elkin Rodríguez, ao Professor Rubens de Andrade Jr., Sérgio Ferreira, Vina Guedes e aos engenheiros Felipe Costa, Felipe Sass e Marcos Dantas.

Agradeço aos Professores que me motivaram e demonstraram a importância do conhecimento e do estudo, ao longo de toda minha vida, e cujos esforços se traduzem neste trabalho, em especial, Adriana Benazzi, Antonio Ribeiro, Almir Nogueira, Djalma Falcão, Glauco Taranto, Leila Schiesari, Miguel Bastos, Paulo Mendes, Rafael Pinheiro, Rosa Maria, Valmar Carneiro e Walter Suemitsu.

Agradeço ao empreendedor, Chuyao Peng e a empresa *crazybaby, Inc.*, pela permissão para utilizar a imagem de suas pesquisas e seus produtos neste trabalho e, assim, enriquecer o seu conteúdo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA COMO PRODUTO

Hugo Pelle Ferreira

Março/2019

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Programa: Engenharia Elétrica

Em trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses, é comum que os alunos desenvolvam seus protótipos para realizar experimentos. Geralmente, após a apresentação dos resultados do projeto, o protótipo é descontinuado, pois somente o aluno envolvido sabia operá-lo. Em muitos casos, o aperfeiçoamento destes projetos pode trazer resultados ainda mais significativos e tornar-se inclusive uma solução comercial, proporcionando inovações ao mercado e gerando valor para a sociedade.

O objetivo desta dissertação é a transformação de um projeto de graduação sobre levitação magnética, realizado na UFRJ, em um produto comercial de baixo custo inserido no mercado de bens de consumo eletrônicos, situado nos setores de decoração e didático, contribuindo para o avanço da tecnologia brasileira.

Neste sistema, um eletroímã é responsável por gerar uma força de atração em um globo e suspendê-lo. Dada a sua natureza mecatrônica, o sistema integra conhecimentos multidisciplinares das áreas de Eletromagnetismo, Sistemas de Controle, Eletrônica de Potência, Sensoriamento e Instrumentação, Programação de Microcontroladores, Simulação Computacional, Microeletrônica, Mecânica e *Design* de Produto.

Nesse trabalho, o *hardware* do sistema de levitação foi melhorado para que se tornasse compacto e estivesse adequado às exigências estéticas de um produto. Além das características técnicas, novos *designs* foram desenvolvidos, tornando o produto mais atraente, incluindo funcionalidade e praticidade.

A análise de mercado utilizando metodologias de comportamento de usuários, como o *Design Thinking*, e de verificação de oportunidades e ameaças, revelou a existência de um grande potencial para um produto tecnológico baseado na levitação magnética, como o proposto, destinado a entusiastas da tecnologia e aos segmentos de decoração, iluminação e entretenimento, além de equipamentos didáticos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MAGNETIC LEVITATION SYSTEM AS A PRODUCT

Hugo Pelle Ferreira

March/2019

Advisor: Richard Magdalena Stephan

Department: Electrical Engineering

It is very often in undergraduate and graduate thesis, the development of prototypes for experiment purposes by students. Commonly, these prototypes are discontinued after their works are published because they are the only people able to operate it. In many occasions, a project's improvement can bring better results and become a commercial solution, providing innovation to the market and adding value to society.

The aim of this thesis is the conversion of an undergraduate project about magnetic levitation, developed in UFRJ, on a low-cost product placed at the consumer electronics' goods market in the decoration and didactic sectors and contribute to the Brazilian technology progress.

In this system, an electromagnet produces an attraction force on a globe and suspends him. Its mechatronics nature provides the integration of multidisciplinary knowledges', as Electromagnetism, Control Systems, Power Electronics, Sensing and Instrumentation, Microcontrollers' programming, Computational Simulation, Microelectronics, Mechanics and Product Design.

In this work, the levitation system hardware was improved to become compact and suitable to aesthetic requirements consistent to a product development. Beside its technical characteristics, new designs were introduced making it more attractive and including functionality and practicality.

The market analysis using the users' behavior, like Design Thinking, and the opportunities and threats, revealed a great potential for technological products based on magnetic levitation, as proposed, destined to technology enthusiasts, and to decoration, lighting, entertainment and didactic sectors.

Sumário

Sumário	viii
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xii
Lista de Símbolos.....	xiii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xvi
1. Introdução	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Tema.....	1
1.3. Objetivos e Justificativa.....	2
1.4. Metodologia	2
1.5. Trabalhos Anteriores.....	4
1.6. Organização do Trabalho	5
2. Análise e Modelagem do Sistema de Levitação Eletromagnética.....	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Princípio de Funcionamento da Levitação Eletromagnética Tradicional.....	7
2.3. Sistema de Levitação Eletromagnética com Ímãs Permanentes	12
2.3.1. Descrição do Sistema	12
2.3.2. Análise Matemática do Sistema.....	15
2.4. Conclusão	18
3. Projeto dos Elementos do Sistema de Levitação.....	19
3.1. Introdução.....	19
3.2. Sensor.....	21
3.2.1. Sensores de Corrente	21
3.2.2. Sensores de Posição	22
3.2.3. Escolha do Sensor.....	27
3.3. Circuito de Eletrônica de Potência	28
3.4. Controlador	33
3.4.1. Hardware.....	33
3.4.2. Projeto do Sistema de Controle	35
3.5. Placa de Circuito Eletrônico	38
3.5.1. Circuito Eletrônico do Protótipo Funcional.....	38
3.5.2. Projeto do <i>Layout</i> da Placa de Circuito Impresso do Produto	40
3.6. Conclusão	43
4. Análise de Mercado	44

4.1.	Introdução.....	44
4.2.	Produtos Baseados em Levitação Magnética e o Segmento de Eletrônica de Consumo 45	
4.2.1.	Produtos de decoração, <i>design</i> e iluminação	45
4.2.2.	Produtos de consumo mecatrônicos e de entretenimento	47
4.2.3.	Produtos de ensino e aprendizagem.....	49
4.3.	Desenvolvimento do Produto – <i>Design</i> e Estratégia.....	50
4.3.1.	<i>Design Thinking</i>	50
4.3.2.	Análise SWOT	56
4.4.	Conclusão	58
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros	60
	Referências Bibliográficas	63
	Apêndice A – Projeto do Atuador e dos Ímãs Permanentes.....	71
A.1.	Dimensionamento Geométrico do Eletroímã	71
A.2.	Determinação do Número de Espiras e Bitola dos Condutores.....	74
A.3.	Escolha do Atuador e do Ímã Permanente	75
	ANEXO I – Desenho Técnico da Estrutura do Produto	76
	ANEXO II – Rotina de Controle implementada no Microcontrolador ATMEGA 328P	79
	ANEXO III – Circuito Esquemático do <i>Arduino</i> UNO	81
	ANEXO IV – Lista de Componentes Eletrônicos Utilizados no Produto	83
	ANEXO V – Formulário da Entrevista da Pesquisa de Mercado.....	84
	ANEXO VI – Tabela de Núcleos de Ferrite Cilíndricos	86
	ANEXO VII – Tabela de Fios Esmaltados de Cobre	87
	ANEXO VIII – Tabela de Ímãs Permanentes Cilíndricos de Neodímio-Ferro-Boro (Formato de Disco)	88

Lista de Figuras

Figura 1.1. Elementos básicos para o desenvolvimento de um produto de base tecnológica.....	3
Figura 2.1. Diagrama esquemático de um sistema de levitação eletromagnética.	8
Figura 2.2. Malha de controle tradicional em um sistema de levitação EML.....	11
Figura 2.3. Sistema de Levitação Eletromagnética utilizado.	12
Figura 2.4. Diagrama de blocos do sistema de controle para um sistema de levitação magnética com ímãs permanentes.	14
Figura 2.5. Campo magnético produzido por uma espira circular.	15
Figura 3.1. Sistema de Levitação Eletromagnética como protótipo funcional.....	19
Figura 3.2. Representação gráfica do sistema de levitação como um produto.....	20
Figura 3.3. Princípio de funcionamento do efeito Hall.	22
Figura 3.4. Sensor de efeito Hall para medição de posição.....	26
Figura 3.5. Diagrama do circuito de Eletrônica de Potência.	31
Figura 3.6. Sinais de controle e de saída do circuito de eletrônica de potência.	32
Figura 3.7. Diagrama de blocos do circuito de eletrônica de potência.....	32
Figura 3.8. Placa de Controle do <i>Arduino UNO</i>	34
Figura 3.9. Diagrama de blocos do sistema de controle.....	36
Figura 3.10. Diagrama de lugar das raízes do sistema de controle em malha fechada com controlador <i>Lead</i>	37
Figura 3.11. Simulação da resposta em degrau para o sistema de controle.	37
Figura 3.12. Circuito eletrônico do protótipo funcional.....	38
Figura 3.13. Diagrama de conexões elétricas do circuito eletrônico do protótipo funcional.	39
Figura 3.14. Circuito esquemático do circuito eletrônico básico do produto comercial.	41
Figura 3.15. Layout da placa de circuito impresso do circuito eletrônico básico do produto comercial.	43
Figura 4.1. Lâmpada Flutuante.....	47
Figura 4.2. Alto falante <i>Mars</i>	49
Figura 4.3. Diagrama de conjuntos representando o processo de <i>Design Thinking</i>	51
Figura 4.4. Protótipo da função crítica do sistema de levitação eletromagnética.	52
Figura 4.5. Protótipo proposto como produto do sistema de levitação eletromagnética.	53

Figura 4.6. <i>Design</i> para um produto de decoração residencial baseado na levitação magnética.....	55
Figura 4.7. <i>Design</i> para um produto de decoração de escritório baseado na levitação magnética.....	55
Figura A.1. Seção transversal do eletroímã.....	71
Figura A.2. Vista superior do eletroímã.....	73

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Relação de custo de sensoriamento para sistemas de levitação eletromagnética.....	28
Tabela 3.2. Tabela Verdade dos pinos de controle do LMD18201.....	29
Tabela 3.3. Parâmetros do modelo do sistema de levitação eletromagnética com ímãs permanentes.....	35
Tabela 4.1. Matriz SWOT para uma <i>startup</i> no setor de decoração.	57
Tabela A.1. Dimensões do eletroímã, FMM e potência dissipada para diferentes diâmetros de núcleo ferromagnético ($f_p = 0,8$ e $J = 2 A/mm^2$).	74
Tabela A.2. Número de espiras em função do diâmetro do núcleo ferromagnético e da bitola do fio.....	74
Tabela A.3. Corrente de operação no eletroímã em função do diâmetro do núcleo ferromagnético e da bitola do fio.....	74
Tabela A.4. Projeto do atuador e dos ímãs permanentes.....	75

Lista de Símbolos

A	Área da seção transversal do circuito magnético (m ²)
A_{Cu}	Área da seção transversal preenchida pelos enrolamentos de cobre (m ²)
a	Raio médio do eletroímã (m)
a_{Cu}	Área da seção transversal do enrolamento de cobre de bitola circular (m ²)
$\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$	Vetores unitários nas coordenadas cartesianas x, y, z
\vec{B}	Vetor densidade de fluxo magnético (T)
\vec{B}_g	Vetor densidade de fluxo magnético no entreferro (T)
D_c	Comprimento da seção transversal dos enrolamentos do eletroímã (m)
D_n	Diâmetro do núcleo ferromagnético (m)
D_p	Diâmetro do ímã permanente (m)
d	Distância entre o sensor e o ímã permanente inferior (m)
E	Transformada de Laplace do sinal erro do sistema de controle
e	Sinal de erro do sistema de controle (m)
\vec{F}_M	Vetor força de atração eletromagnética entre o eletroímã e o ímã (N)
\vec{f}	Vetor força eletromagnética (N)
f_p	Fator de preenchimento do enrolamento de cobre de bitola circular
\vec{g}	Vetor aceleração da gravidade (m/s ²)
\vec{H}	Vetor campo magnético (A.m)
\vec{H}_g	Vetor campo magnético no entreferro (A.m)
h_c	Altura do eletroímã (m)
h_n	Altura do núcleo ferromagnético (m)
h_p	Altura do ímã permanente (m)
I	Transformada de Laplace da corrente elétrica
$I_{máx}$	Corrente elétrica máxima admitida no condutor (A)
i	Corrente elétrica no eletroímã (A)
i_0	Corrente elétrica no ponto de equilíbrio (A)
i_{ref}	Corrente elétrica de referência (A)
J	Densidade de corrente superficial do enrolamento de cobre (A/m ²)
K_c	Ganho do controlador Lead

K_i	Constante de linearização da força em relação à corrente (N/A)
K_z	Constante de linearização da força em relação à posição (N/m)
k_h	Coefficiente do sensor de efeito Hall (V/A.T)
L	Indutância do eletroímã (H)
l	Comprimento total do enrolamento do eletroímã (m)
l_m	Comprimento médio percorrido por uma espira circular do eletroímã (m)
$l_{m,maior}$	Comprimento de maior caminho percorrido por uma espira circular do eletroímã (m)
$l_{m,menor}$	Comprimento de menor caminho percorrido por uma espira circular do eletroímã (m)
\vec{M}	Vetor momento de dipolo magnético do ímã permanente (A.m ²)
m	Massa do objeto que levita (kg)
N	Número de espiras
n	E-ésima amostra do sinal digital
P	Potência elétrica dissipada no eletroímã (W)
P_e	Potência elétrica (W)
P_m	Potência mecânica (W)
p_c	Polo do controlador Lead (rad/s)
R	Resistência elétrica do eletroímã (Ω)
T_a	Período de amostragem (s)
T_s	Período de chaveamento (s)
t_a	Instante de tempo do sinal amostrado (s)
t_{off}	Intervalo de tempo em que a chave semicondutora permanece aberta (s)
t_{on}	Intervalo de tempo em que a chave semicondutora permanece aberta (s)
V_g	Volume do entreferro (m ³)
U	Transformada de Laplace da tensão elétrica
U_m	Valor médio da tensão elétrica no eletroímã (V)
u	Tensão elétrica no eletroímã (V)
u_c	Tensão do sinal de controle (V)
u_{ds}	Tensão do sinal com forma de dente de serra (V)
u_h	Tensão de saída do sensor de efeito Hall (V)
u_{pwm}	Tensão modulada por largura de pulso (V)

\vec{v}	Vetor velocidade de deslocamento (m/s)
W_{arm}	Energia magnética armazenada (J)
Z	Transformada de Laplace da distância de entreferro
z	Distância de entreferro (m)
z_0	Distância de entreferro no ponto de equilíbrio (m)
z_c	Zero do controlador Lead (rad/s)
z_{ref}	Distância de entreferro de referência (m)
λ	Fluxo magnético enlaçado (Wb.espira)
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo (H/m)
ρ	Resistividade elétrica do cobre ($\Omega.m$)
Φ	Fluxo magnético (Wb)
\mathcal{F}	Força magnetomotriz (A.espira)

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMB – *Active Magnetic Bearing*

AWC – *Academic Working Capital*

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CC – Corrente Contínua

CI – Circuito Integrado

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CTI – Ciência, Tecnologia e Inovação

DEE – Departamento de Engenharia Elétrica da UFRJ

DSP – *Digital Signal Processor*

EBA – Escola de Belas Artes da UFRJ

EDL – *Electrodynamic Levitation*

EML – *Electromagnetic Levitation*

FAPERJ – Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro

FEM – *Finite Element Method*

FMM – Força Magnetomotriz

FPGA – *Field Programmable Gate Array*

ISMB – *International Symposium on Magnetic Bearings*

LabMaq – Laboratório de Máquinas Elétricas (POLI/UFRJ)

LADIF – Laboratório Didático do Instituto de Física da UFRJ

LASUP – Laboratório de Aplicações de Supercondutores (COPPE/UFRJ)

MagLev – *Magnetic Levitation*

MIT – *Massachusetts Institute of Technology*

MOSFET – *Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*

MVP – *Minimum Viable Product*

Nd-Fe-B – Neodímio-Ferro-Boro

PCI – Placa de Circuito Impresso

PD – Proporcional-Derivativo

PEE – Programa de Engenharia Elétrica (COPPE/UFRJ)

PESTE – *Political, Economic, Social, Technological, Environmental*

POLI – Escola Politécnica da UFRJ

PWM – *Pulse-Width Modulation*

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

RH – Recursos Humanos

SML – *Superconducting Magnetic Levitation*

STEAM – *Science, Technology, Engineering, Arts and Math*

SWOT – *Strengths, Weakness, Opportunities and Threats*

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

TPP – *Technological Product & Process*

UEL – Universidade Estadual de Londrina

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UnB – Universidade de Brasília

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

1. Introdução

1.1. Motivação

Em trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses, é comum que os alunos desenvolvam seus protótipos para realizar experimentos. Geralmente, após a apresentação dos resultados do projeto, o protótipo é descontinuado, pois somente o aluno envolvido sabe operá-lo. Em muitos casos, o aperfeiçoamento destes projetos pode trazer resultados ainda mais significativos e tornar-se inclusive uma solução comercial, proporcionando inovações ao mercado e gerando valor para a sociedade.

Em face dessa realidade, o Laboratório de Máquinas Elétricas (LabMaq) [1] do DEE (POLI/UFRJ) e o Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) [2] do PEE (COPPE/UFRJ) desenvolvem importantes pesquisas nas áreas de levitação magnética e supercondutividade, sempre observando o grau de relevância de seus trabalhos, com perspectivas para futuras soluções inovadoras, entre outros, nos setores de transporte, industrial e de consumo.

1.2. Tema

A levitação magnética, além de seu aspecto fascinante da suspensão de objetos, tem atraído grande interesse de pesquisadores da academia e da indústria devido às suas inúmeras vantagens, como a eliminação de atrito mecânico, contaminação e desgaste de elementos de contato e o consequente aumento da eficiência de equipamentos, aliada à capacidade de sustentar cargas elevadas, rotativas ou lineares.

Estas características têm levado empresas a apresentar produtos para as mais variadas aplicações, como as indústrias de alimentos, de óleo e gás, centrífugas para enriquecimento de urânio, bombeamento para corações artificiais [3], turbo máquinas e muitas outras [4, 5].

Além destas, o desenvolvimento de trens de levitação magnética, como o MagLev-Cobra [6], apresenta tecnologia promissora para o transporte urbano ou de longas distâncias de passageiros, aliando o baixo consumo de energia e de produção de ruído ao custo reduzido de construção, além da possibilidade de atingir altas velocidades.

Recentemente, a evolução dos materiais magnéticos, dos dispositivos semicondutores e de sensores tornou viável e acessível a confecção de produtos destinados ao mercado de bens de consumo, notadamente para os setores de decoração [7], de iluminação [8], de entretenimento [9] e educacionais [10], explorando

o apelo estético da flutuação de objetos e o conhecimento tecnológico por trás do fenômeno.

1.3. Objetivos e Justificativa

Este trabalho tem como ponto de partida, o projeto de graduação de ENDALÉCIO [11], desenvolvido no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP), que trata da implementação de um sistema de levitação eletromagnética utilizando sensores de efeito Hall.

O sistema em questão consiste na levitação de um objeto ferromagnético por atuação de um eletroímã. Esta interação entre objetos magnetizados é instável, pois a tendência é que os mesmos se atraiam, tal qual ímãs permanentes posicionados um frente ao outro com polaridades diferentes. Para contornar este problema, emprega-se um sistema de controle em malha fechada, utilizando circuitos eletrônicos e apenas um sensor de efeito Hall de baixo custo que mantêm o objeto flutuando no ar.

Dada a sua natureza mecatrônica, o sistema integra conhecimentos multidisciplinares das áreas de Eletromagnetismo, Sistemas de Controle, Eletrônica de Potência, Sensoriamento e Instrumentação, Programação de Microcontroladores, Simulação Computacional, Microeletrônica, Mecânica e *Design* de Produto.

Assim, o objetivo deste trabalho é a transformação do sistema de levitação descrito acima em um produto comercial de baixo custo inserido no mercado de bens de consumo eletrônicos, situado nos setores de decoração e didático, contribuindo para o avanço da tecnologia brasileira.

Para atingir essa meta, são necessárias modificações técnicas, em relação ao original, como a melhora na estabilidade da levitação, um novo projeto do circuito eletrônico de controle e de potência de modo a atender aos novos requisitos de dimensão compatíveis com um produto.

Além disso, são necessários estudos na área de *Design*, de forma a se conceber uma estrutura robusta, esteticamente atraente, adicionando funcionalidade, praticidade e facilidade de operação por parte de um usuário.

Torna-se ainda importante, na elaboração de um produto realizar análise de mercado, através da observação de concorrentes, verificação de oportunidades e ameaças e comportamento do usuário para elaboração de um plano de negócios.

1.4. Metodologia

De maneira didática, o processo de desenvolvimento de um produto de base tecnológica pode ser representado pela Figura 1.1. Ele envolve a soma de esforços em múltiplas áreas para a sua concepção:

- O conhecimento e a inovação tecnológica que propiciam a criação de um produto;
- A formulação de um *design* criativo e centrado no usuário;
- A formação de recursos humanos (RH) capacitados para a fabricação e a sua exploração comercial;
- A propriedade intelectual que protege e resguarda a utilização desta tecnologia;
- A existência de um mercado bem definido em que o produto seja economicamente viável e agregue valor aos consumidores.

Por fim, deseja-se que o produto atenda às normas técnicas necessárias para sua comercialização e seja submetido a um processo de certificação e avaliação de conformidade.

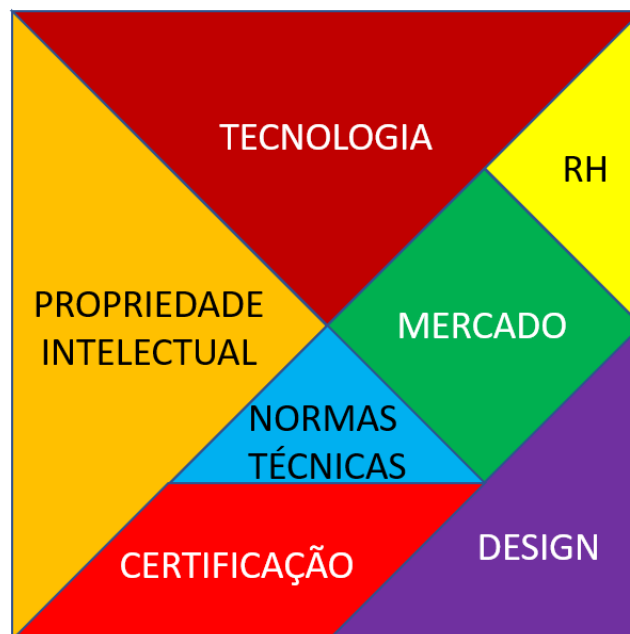


Figura 1.1. Elementos básicos para o desenvolvimento de um produto de base tecnológica.

Dos itens mencionados acima, este trabalho abordará três pontos fundamentais: o conhecimento e a inovação tecnológica; o aspecto estético do *Design* de produtos; e a visão comercial e de mercado.

No quesito de tecnologia, este trabalho apresentará todos os tópicos necessários para a descrição e operação de um sistema de levitação magnética ativa. Inicialmente, será apresentado o modelo matemático da planta, baseada nos princípios de Eletromagnetismo e Conservação Eletromecânica de Energia. Em seguida, serão descritos o atuador e o sensor utilizados no sistema, considerando para a sua escolha as variadas restrições de projeto, tanto técnicas, como, por

exemplo, níveis de tensão e corrente, temperatura, quanto comerciais, por exemplo, relativas às dimensões do produto e custo, ressaltando também as vantagens da utilização do sensor de efeito Hall.

Para o correto funcionamento do sistema, torna-se importante ainda utilizar um ambiente de programação apropriado e amigável, no caso, a plataforma de código aberto *Arduino* [12], que integra *hardware* e *software*, muito utilizada em projetos de prototipagem e eletrônica embarcada. O projeto do circuito eletrônico de potência de atuação do sistema também será destacado.

O processo de *Design* de produtos também merece especial atenção. Neste trabalho, serão considerados os itens de estética e funcionalidade que o compõem. Para este tópico, será considerado o método do *Design Thinking* [13], que contempla uma maior proximidade e entendimento do comportamento do usuário durante a etapa de prototipagem, aliando o desejo dos consumidores à viabilidade técnica e econômica do empreendimento.

A análise de mercado será observada considerando aspectos de estratégia de negócios, a partir do modelo tradicional, apresentando as vantagens competitivas em relação a concorrentes, oportunidades de parcerias e a análise pela matriz SWOT (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças).

1.5. Trabalhos Anteriores

Desde da criação do LASUP e, antes dele, o grupo de pesquisa de mancais magnéticos da UFRJ têm se notabilizado no estudo das técnicas de levitação magnética, através da realização de diversos experimentos e projetos. Em particular, a levitação eletromagnética tem sido objeto de interesse, produzindo diversos artigos, projetos de graduação, dissertações e teses.

Em cada um destes trabalhos, procurou-se analisar as mais diversas variações dos elementos que caracterizam os sistemas de levitação magnética ativa: atuadores, sensores, controladores analógicos ou digitais, objeto flutuante, circuitos de controle e acionamento. Desta forma, foi possível obter variadas configurações destes sistemas, afim de se adquirir o domínio tecnológico deste princípio de levitação. Entre os trabalhos nesta área, destacam-se os projetos desenvolvidos em [14 – 23].

O estudo feito por ORTIZ SALAZAR *et al* [14] utilizou sensores de posição capacitivos em mancais magnéticos. SANTISTEBAN e STEPHAN [15] elaboraram um sensor de posição óptico com características lineares. Os sensores ópticos por LED's infravermelho também foram utilizados por STEPHAN *et al* [16], GOMES *et al* [17] e GOMES e STEPHAN [18] na suspensão de uma esfera ferromagnética. VALLE *et al*

[19], no entanto, empregaram sensores de posição ultrassônico na levitação de um disco ferromagnético.

Quanto ao método de controle, STEPHAN *et al* [16] realizou uma experiência de levitação eletromagnética utilizando um microprocessador Hitachi 7045F. GOMES [20] aplicou um controlador do tipo PD implementando via software, com a ferramenta de tempo real do MATLAB. O mesmo procedimento de controle foi definido por MOTA [21], para o controle de uma esfera, e por VALLE [22], para o controle de um disco. Em seguida, NEVES [23] aprimorou a suspensão do disco, incorporando um controle adaptativo.

Em todos estes trabalhos, os protótipos constituíam *hardwares* que ocupavam grandes volumes, fixos em um local, pesados, com sistemas de controle, sensores de posição e de correntes caros, pouco confiáveis, devido à possibilidade de interferência eletromagnética e fiação esparsa.

O projeto de graduação de ENDALÉCIO [11], entretanto, proporcionou um grande avanço em relação aos anteriores em dois aspectos. Primeiro, apenas um sensor, o de efeito Hall, de baixo custo, foi necessário para a operação do sistema. A utilização da plataforma de controle *Arduino* permitiu ampliar a robustez e a flexibilidade do sistema de controle. Com essas mudanças foi possível obter um protótipo leve, compacto, flexível, barato e mais confiável.

1.6. Organização do Trabalho

Este capítulo introduziu a motivação, o tema e os objetivos deste trabalho. Em seguida, foram apresentadas as metodologias utilizadas e os trabalhos anteriores realizados pelo LASUP.

O capítulo 2 descreverá a modelagem matemática dos sistemas de levitação eletromagnética tradicionais e dos que utilizam ímãs permanentes, revelando as características de cada um deles e a malha de controle necessária para sua estabilização.

O capítulo 3 apresentará o sistema de levitação anteriormente concebido [11] e os itens de ordem técnica e comercial levados em consideração para sua transformação em um produto. Em seguida, serão demonstrados o projeto e o processo de escolha de todos os componentes utilizados, tais como o atuador, o sensor e o controlador.

O capítulo 4 realizará uma análise de mercado para os produtos baseados em levitação magnética e os nichos em que estão inseridos, especificamente no setor de bens de consumo eletrônicos, e as etapas de desenvolvimento do produto definidos para o segmento de decoração, design e iluminação.

O capítulo 5 apresentará as considerações finais e os trabalhos futuros que contribuirão para a melhoria do produto e das perspectivas de negócio.

2. Análise e Modelagem do Sistema de Levitação Eletromagnética

2.1. Introdução

Conforme descrito no capítulo anterior, a levitação magnética tem atraído bastante interesse para aplicações variadas ao longo dos últimos anos, sobretudo nas áreas de transporte e de equipamentos industriais, através dos trens de levitação magnética e dos mancais magnéticos, que buscam o aumento da confiabilidade, flexibilidade e robustez em seus projetos. Uma análise extensa de todos os métodos de levitação e de suas aplicações foi apresentada por FERREIRA [24].

Na levitação magnética, destaca-se a levitação eletromagnética (EML) que possui o maior grau de maturidade tecnológica com diversas aplicações comerciais tanto em mancais magnéticos ativos (AMB) para equipamentos industriais e médicos [25], quanto em trens de levitação magnética operando atualmente na China [26, 27], na Coreia do Sul [28] e no Japão [29]. Recentemente, outros setores, como de iluminação, decoração, publicidade e entretenimento [7 – 9] também têm explorado este conceito como forma de divulgar e diferenciar os seus produtos em relação aos seus concorrentes, agregando valor com o apelo estético e visual surpreendente de uma tecnologia disruptiva da flutuação de objetos, que atrai os consumidores.

Uma das formas tradicionalmente encontradas em produtos desta natureza que utilizam este princípio de levitação magnética, baseia-se na suspensão de um objeto associado à um ímã permanente que flutua por ação de um eletroímã e seu sistema de controle. Este capítulo é dedicado a apresentar a análise matemática e a modelagem deste sistema de levitação.

Inicialmente, será realizada uma análise matemática dos sistemas de levitação eletromagnética tradicionais, apresentando os seus principais elementos e características. Em seguida, será apresentado o sistema de levitação eletromagnética com ímãs permanentes e a sua respectiva modelagem, destacando as suas semelhanças e diferenças em relação ao primeiro.

2.2. Princípio de Funcionamento da Levitação Eletromagnética Tradicional

Esta levitação consiste na força de atração exercida por um eletroímã sobre um material ferromagnético, que possui a tendência de se magnetizar facilmente. A interação entre objetos magnetizados, de maneira estática, é naturalmente instável, pois a tendência é que eles se atraiam, tal qual ímãs com faces de diferentes polaridades posicionados um frente ao outro. Para contornar este efeito, emprega-se um sistema de controle em malha fechada, utilizando circuitos eletrônicos e sensores,

que mantém o objeto ferromagnético afastado do eletroímã e suspenso no ar, sob uma distância desejada.

Uma representação simplificada de um circuito esquemático tradicional desta técnica pode ser vista na Figura 2.1. Ela apresenta os elementos básicos que constituem a levitação eletromagnética: um atuador, representado pelo eletroímã e seu circuito magnético, um objeto ferromagnético atraído por ele, um sensor para medir a posição deste objeto, além de um controlador e um amplificador de potência responsável por transmitir os sinais de controle em um nível adequado para a atuação do eletroímã [30, 31].

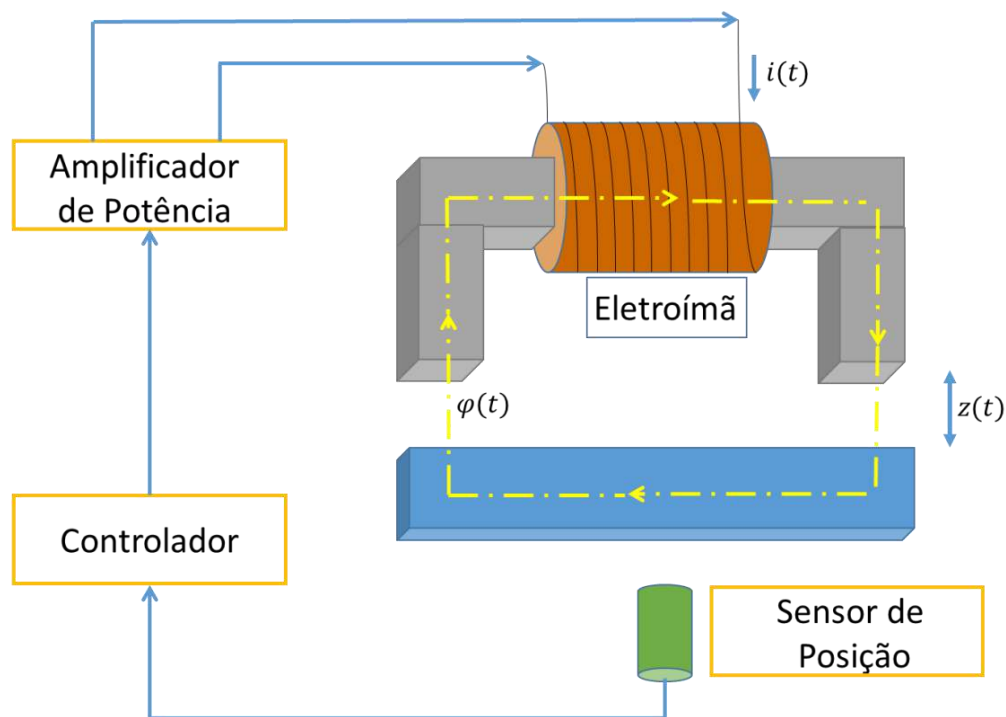


Figura 2.1. Diagrama esquemático de um sistema de levitação eletromagnética.

O eletroímã consiste em um fio enrolado, no qual circula uma corrente elétrica $i(t)$, em volta de um núcleo ferromagnético. Esta, por sua vez, produz um campo magnético, cujas linhas de campo e seu fluxo magnético $\varphi(t)$ se concentram e circulam pelo material magnético, em um caminho de menor relutância, representado pela linha amarela tracejada na Figura 2.1, que desconsidera efeitos de saturação, dispersão e espriamento. A corrente elétrica provoca uma força de atração no material ferromagnético ilustrado em azul, no sentido de eliminar o entreferro $z(t)$ e reduzir a relutância total do circuito magnético.

Para manter o objeto flutuando sob um entreferro desejado, no entanto, é necessário controlar a corrente elétrica que circula na bobina, de modo a reduzir ou aumentar sua magnitude quando necessário. Isto é feito empregando-se uma malha

de controle fechada simplificada, dotada de um sensor que registra e envia para o controlador a posição do objeto flutuante. Esta informação é, em seguida, processada e é implementado um método de controle com realimentação negativa, de modo a corrigir o valor da corrente elétrica necessária para a levitação desejada, sob a forma de sinais de controle, que são amplificados em um circuito de potência, produzindo a corrente elétrica no nível desejado.

A análise matemática do sistema de levitação da Figura 2.1 pode ser desenvolvida utilizando os princípios de conversão eletromecânica de energia. Neste caso, a energia elétrica produzida pelo eletroímã é convertida em energia mecânica, energia armazenada no campo magnético e em perdas por aquecimento. Desprezando este último componente, esta relação pode ser expressa por [32]:

$$P_e = \frac{dW_{arm}}{dt} + P_m \quad (2.1)$$

A potência elétrica P_e , desconsiderando as perdas na resistência do eletroímã, é equivalente a:

$$P_e(t) = u(t).i(t) = i(t) \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (2.2)$$

E a potência mecânica é equivalente a:

$$P_m(t) = f(t).v(t) = f(t) \frac{dz(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Combinando as equações (2.2) e (2.3) em (2.1), tem-se:

$$dW_{arm} = i. d\lambda - f. dz \quad (2.4)$$

Considerando que a energia armazenada pode ser considerada como uma função de duas variáveis, o fluxo enlaçado e o entreferro, pode-se estabelecer que:

$$dW_{arm}(\lambda, z) = \frac{\partial W_{arm}}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial W_{arm}}{\partial z} dz \quad (2.5)$$

Comparando-se as equações (2.4) e (2.5) pode-se determinar que:

$$i = \frac{\partial W_{arm}}{\partial \lambda} \quad (2.6a)$$

e

$$f = -\frac{\partial W_{arm}}{\partial z} \quad (2.6b)$$

Assim, a força de levitação exercida pelo eletroímã sobre o objeto ferromagnético pode ser determinada a partir da equação (2.6b). Sabe-se que a energia magnética é expressa por:

$$W_{arm} = \frac{1}{2} \iiint \vec{B} \cdot \vec{H} \, dV \quad (2.7)$$

Considerando o material magnético do núcleo com permeabilidade magnética muito alta, e desprezando efeitos de espraiamento das linhas de fluxo magnético no entreferro, ou seja, operando com um entreferro pequeno, a energia magnética armazenada no circuito magnético da Figura 2.1 é:

$$W_{arm} = \frac{1}{2} B_g H_g V_g = \frac{1}{2} B_g H_g A (2z) \quad (2.8)$$

Sabendo-se que a relação entre o campo magnético e a densidade de fluxo magnético no entreferro é $\vec{B}_g = \mu_0 \vec{H}_g$, tem-se que:

$$W_{arm} = \frac{B_g^2 A z}{\mu_0} \quad (2.9)$$

Substituindo-se (2.9) em (2.6b), tem-se:

$$f = -\frac{B_g^2 A}{\mu_0} \quad (2.10)$$

A análise do circuito magnético da Figura 2.1 permite obter a seguinte relação pela Lei de Ampère:

$$H_g(2z) = Ni \quad (2.11)$$

A expressão (2.11) pode ser reescrita da seguinte maneira

$$B_g = \frac{\mu_0 Ni}{2z} \quad (2.12)$$

Substituindo (2.12) em (2.10), obtém-se a expressão da força de levitação em um sistema eletromagnético

$$f(i, z) = -\frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i}{z}\right)^2 = k \left(\frac{i}{z}\right)^2 \quad (2.13)$$

Onde $k = -\frac{1}{4}\mu_0 N^2 A$

Assim, observa-se que a força de levitação em um sistema eletromagnético tradicional é proporcional ao quadrado da corrente elétrica que circula na bobina e inversamente proporcional ao quadrado da distância de entreferro.

A Figura 2.2, apresenta um diagrama de blocos de uma malha de controle tradicional para sistemas de levitação eletromagnética, que emprega uma malha interna de controle da corrente elétrica que circula na bobina e uma malha externa de controle da posição do objeto ferromagnético, de forma a manter o mesmo em uma posição de referência z_{ref} , sob uma corrente de referência i_{ref} .

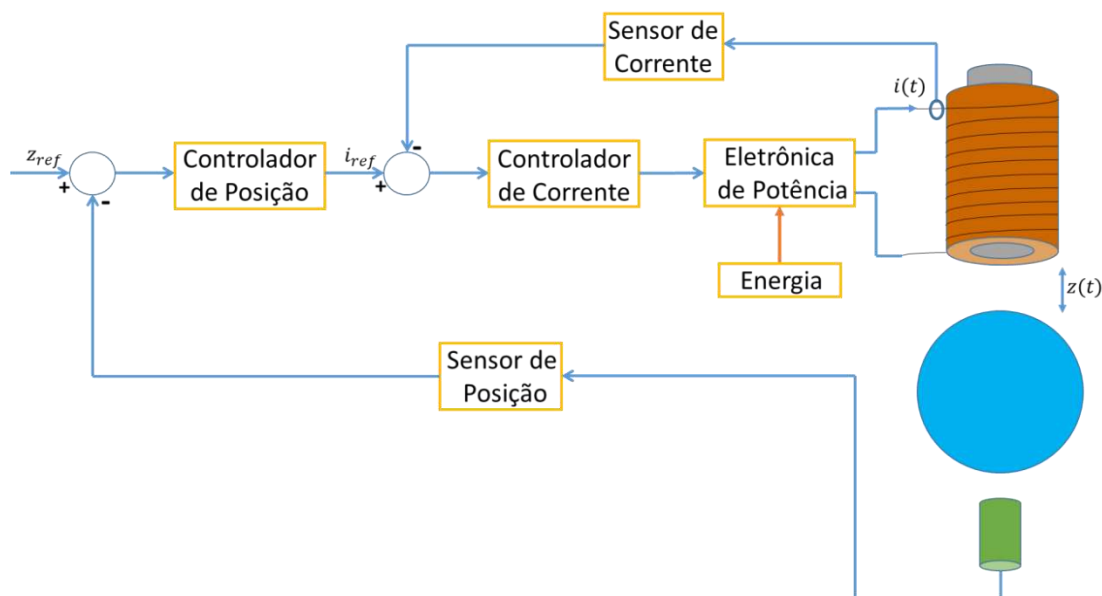


Figura 2.2. Malha de controle tradicional em um sistema de levitação EML.

O controle destes sistemas é executado em controladores implementados de maneira analógica ou digital, considerando o custo, a complexidade e os requisitos do projeto. A utilização de dois ou mais tipos de sensoriamento, como o de velocidade, quando necessária, também implica em aumento de custos e da sua robustez. O acionamento do eletroímã é geralmente realizado por circuitos de eletrônica de potência, que demandam uma fonte de energia externa, no qual dispositivos semicondutores operam no sentido de alterar a magnitude da corrente elétrica na bobina, sendo possível sua realização em operação linear ou em modo chaveado. Além disto, em geral, sistemas deste tipo apresentam entreferros da ordem de alguns milímetros [31].

2.3. Sistema de Levitação Eletromagnética com Ímãs Permanentes

Além da levitação eletromagnética tradicional, os trabalhos de LILIENKAMP, LUNDBERG *et al* [33, 34] apresentaram a construção de protótipos de baixo custo de um sistema de levitação magnética que consiste na atração de um eletroímã por um ímã atrelado à um material qualquer.

Este sistema e seus componentes, como amplificadores e sensores, foram transformados em um *kit* disponibilizado à cada um dos alunos da disciplina de Sistemas de Controle, do Departamento de Engenharia Elétrica e Ciência da Computação do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). O seu grande diferencial foi a introdução de um sensor por efeito Hall de baixo custo [35], responsável por medir o campo magnético do ímã e inferir a posição do objeto.

Este mesmo espírito educacional e princípio de funcionamento também foi explorado por ARTIGAS *et al* [36], que igualmente concebeu um sistema de baixo custo, incluindo o sensoriamento por efeito Hall.

2.3.1. Descrição do Sistema

Conforme apresentado em [33 – 36], o sistema de levitação eletromagnética utilizado se baseia no processo de atração entre um eletroímã e um ímã permanente. Esta técnica pode ser representada na Figura 2.3, em que o ímã, ilustrado em amarelo, está atrelado ao objeto em azul, que não exerce qualquer influência por não ser ferromagnético.

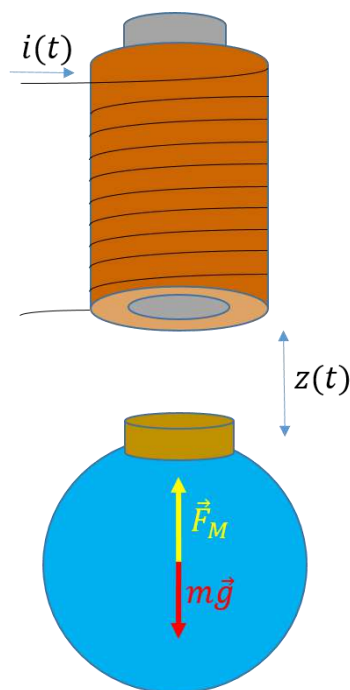


Figura 2.3. Sistema de Levitação Eletromagnética utilizado.

Neste sistema, um eletroímã é enrolado com N voltas ao redor de um núcleo ferromagnético, e por ele circula uma corrente elétrica $i(t)$, que por sua vez, produz um campo magnético responsável por interagir com o ímã permanente.

Esta interação entre o eletroímã e o ímã permanente dá origem a uma força magnética \vec{F}_M que se deseja contrabalançar o efeito da ação gravitacional sobre o objeto e mantê-lo flutuando a uma distância z desejada. Um aspecto relevante, que diferencia este sistema da sua forma tradicional, é a influência do sentido da corrente elétrica percorrida pela bobina proporcionar uma interação atrativa ou repulsiva com o ímã permanente, diferentemente dos sistemas tradicionais cujas relações entre o atuador e o objeto são sempre atrativas.

Da mesma forma que o sistema eletromagnético tradicional, este também é naturalmente instável, de modo que apenas os elementos da planta em malha aberta não são capazes de manter o objeto flutuando, sendo necessária a utilização dos demais elementos de controle em malha fechada com realimentação negativa, que pode ser visto na Figura 2.4.

Este sistema de levitação emprega um sensor de efeito Hall, que atua como um sensor de posição. Ele utiliza como princípio de funcionamento a medição de um campo magnético para estimar a posição do objeto de forma indireta. Esta leitura magnética é convertida em um sinal de tensão proporcional à sua intensidade. Conforme indicado na Figura 2.4, um ímã permanente adicional é posicionado na parte inferior do objeto para servir como fonte do campo magnético medido por este sensor.

A razão para a inclusão deste ímã e o posicionamento inferior do sensor de efeito Hall está na redução da interferência do campo magnético produzido pelo eletroímã que pode resultar em uma leitura incorreta do sensor e afetar o desempenho do sistema de controle. Este fato foi comprovado por ANTUNES [37] em seu projeto envolvendo mancais magnéticos e é o que diferencia este trabalho dos artigos de LUNDBERG *et al* [33, 34] e ARTIGAS *et al* [36] que o motivaram inicialmente.

Conforme o ímã permanente se aproxima do sensor, a sua tensão de saída aumenta indicando que a distância d entre eles diminui, e conseqüentemente, a distância z do objeto para o eletroímã aumenta, ocorrendo de forma inversa para o caso de um afastamento do sensor. Desta maneira, é possível estabelecer uma relação aproximadamente linear entre o campo magnético do ímã, a tensão de saída do sensor, e a distância do objeto para o eletroímã.

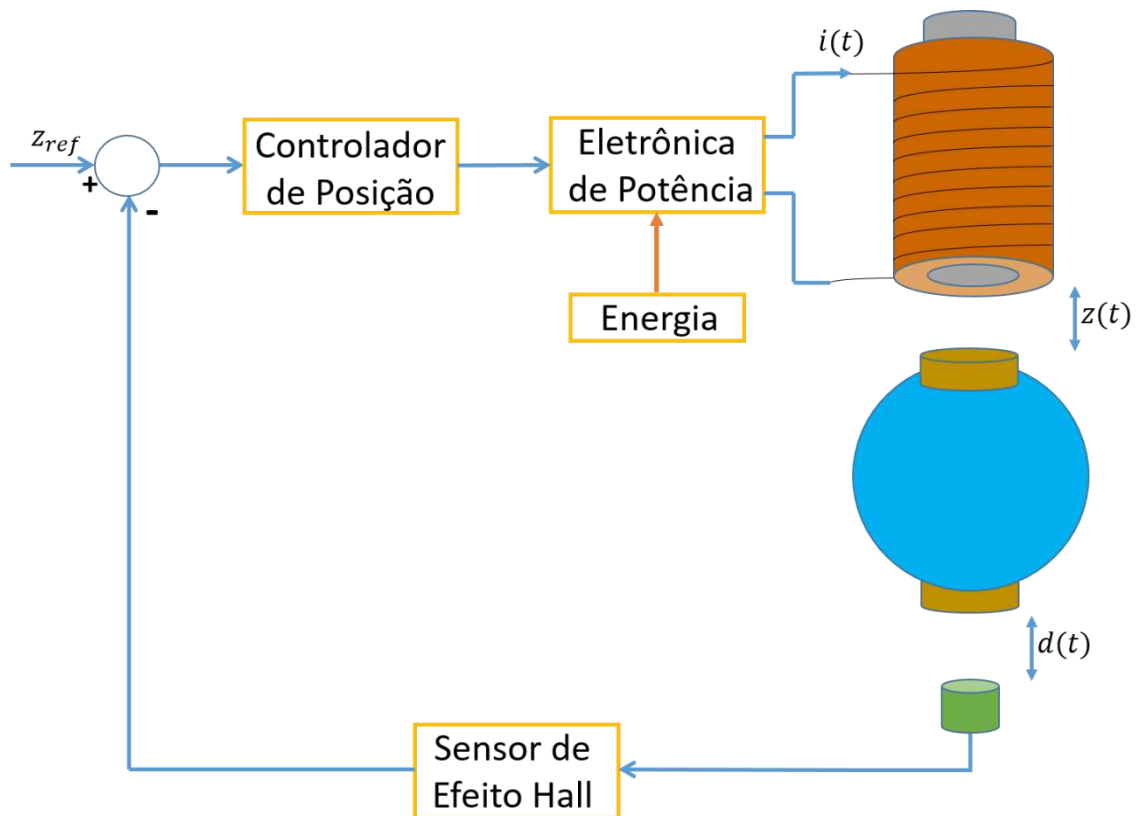


Figura 2.4. Diagrama de blocos do sistema de controle para um sistema de levitação magnética com ímãs permanentes.

A informação do sensor é comparada com um sinal de referência, que estabelece a distância z_{ref} desejada entre o eletroímã e o sensor, e enviada a um controlador para que este realize o processamento da informação e o controle da corrente que circula pela bobina. Neste trabalho, o controlador é implementado de maneira digital, através do microcontrolador da placa de controle do *Arduino*, que é um sistema de código aberto com linguagem e interface amigável e com um *hardware* de baixo custo e versátil.

O sinal de controle de saída do microcontrolador é do tipo modulação por largura de pulso (PWM) e é enviado para os circuitos de acionamento das chaves semicondutoras do circuito de eletrônica de potência. Este circuito consiste de quatro MOSFETs no arranjo do tipo ponte completa, que são energizadas por uma fonte CC de +12 V, e que operam no modo chaveado, de acordo com o sinal de controle, entre +12V e -12V, controlando o nível médio de tensão sobre o eletroímã. Esta variação de tensão controla a corrente elétrica que circula na bobina e, conseqüentemente, o campo magnético produzido por ele, mantendo o objeto flutuando em uma posição estável.

2.3.2. Análise Matemática do Sistema

Nos sistemas de levitação eletromagnética tradicionais, a análise matemática revela que a força magnética entre o atuador e o objeto ferromagnético é proporcional ao quadrado da corrente que circula no eletroímã e inversamente proporcional ao quadrado da distância de separação entre eles.

Nos sistemas envolvendo a presença de ímãs permanentes, no entanto, a análise matemática que estabelece a relação de força entre eles e um eletroímã é diferente, como será visto a seguir.

Inicialmente, sabe-se que a densidade de fluxo magnético produzida por uma espira circular de raio a e corrente i calculada em um ponto P afastado à uma distância axial z do seu centro, como ilustrado na Figura 2.5, é dada por [38]:

$$\vec{B}(i, z) = \frac{\mu_0 i a^2}{2(a^2 + z^2)^{3/2}} \hat{a}_z \quad (2.14)$$

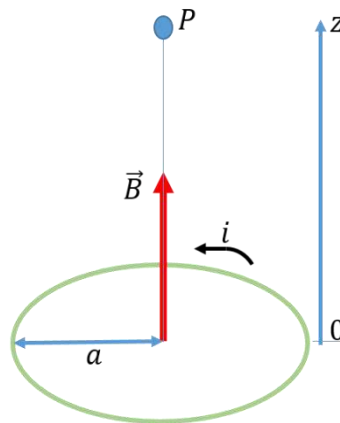


Figura 2.5. Campo magnético produzido por uma espira circular.

Esta expressão pode ser aproximada para o caso de um eletroímã de N voltas como o utilizado neste trabalho, considerando a como o seu raio médio. Assim, a densidade de fluxo magnético produzido pelo eletroímã calculado no ponto P fora de seu núcleo ferromagnético é:

$$\vec{B}(i, z) = \frac{\mu_0 i N a^2}{2(a^2 + z^2)^{3/2}} \hat{a}_z \quad (2.15)$$

A força magnética entre um ímã permanente e uma fonte de campo magnético, como um eletroímã, é expressa de forma geral por [39]:

$$\vec{F}_M = \vec{\nabla}(\vec{M} \cdot \vec{B}) \quad (2.16)$$

Como o ímã permanente possui orientação magnética axial, na mesma direção do campo magnético do eletroímã, a expressão para o seu vetor momento de dipolo magnético é igual a $\vec{M} = M\hat{a}_z$. Assim, a força magnética deste sistema é dada por:

$$\vec{F}_M = M \frac{\partial B}{\partial z} \hat{a}_z \quad (2.17)$$

Substituindo (2.15) em (2.17) tem-se a expressão para a força magnética para o sistema de levitação eletromagnética envolvendo um eletroímã e um ímã permanente:

$$\vec{F}_M(i, z) = K \frac{iz}{(a^2 + z^2)^{5/2}} \hat{a}_z \quad (2.18)$$

Onde $K = -\frac{3}{2}\mu_0 N M a^2$

Observa-se pela expressão (2.18) que a força magnética para um sistema de levitação eletromagnética para ímãs permanentes apresenta um comportamento diferente do obtido no sistema de levitação eletromagnética tradicional. Nesta situação, a força é proporcional a corrente e inversamente proporcional, considerando as dimensões do raio da espira, a quarta potência da distância.

A dinâmica de movimento do objeto de massa total m pode ser representada pela 2ª Lei de Newton, considerando a força magnética apresentada em (2.18) e a força gravitacional sobre ele, como a ilustrada na Figura 2.4. Esta relação é expressa por:

$$m \frac{d^2 \vec{z}}{dt^2} = \vec{F}_M(i, z) - mg\hat{a}_z = \vec{f}(i, z) \quad (2.19)$$

Deve-se ressaltar que esta equação dinâmica não considera as interações entre os ímãs permanentes e entre estes e o núcleo ferromagnético que estão presentes neste sistema. A razão para esta desconsideração é o fato destas interações não serem tão significativas quanto àquela entre o ímã permanente superior e o eletroímã, de modo que o aumento da complexidade da modelagem matemática não se traduz em aumento relevante da precisão da análise, e nem altera significativamente o projeto dos parâmetros do sistema de controle em malha fechada.

Conforme pode ser visto pela expressão da força magnética em (2.18), a dinâmica do sistema de levitação em (2.19), representada pela função vetorial $\vec{f}(i, z)$, é altamente não-linear, o que dificulta substancialmente uma análise das características da planta e o projeto de controladores por métodos tradicionais. Uma forma alternativa de analisar este sistema é o processo de linearização em torno de

um ponto de equilíbrio para ser possível a utilização das ferramentas de sistemas lineares quando este opera nas proximidades deste ponto.

Assim, a função vetorial $\vec{f}(i, z)$ pode ser aproximada pelos termos lineares da série de Taylor de um sistema de duas variáveis, em torno do ponto de equilíbrio (i_0, z_0) .

$$m \frac{d^2 \Delta \vec{z}}{dt^2} = \vec{f}(i_0, z_0) + \frac{\partial \vec{f}(i_0, z_0)}{\partial i} \Delta i + \frac{\partial \vec{f}(i_0, z_0)}{\partial z} \Delta z \quad (2.20)$$

Onde $\Delta i = i - i_0$ e $\Delta z = z - z_0$

Como, na posição de equilíbrio (i_0, z_0) deseja-se que a força gravitacional seja equilibrada pela força magnética tem-se:

$$\vec{f}(i_0, z_0) = \vec{F}_M(i_0, z_0) - mg\hat{a}_z = 0 \quad (2.21)$$

As constantes de linearização da função $f(i, z)$, calculadas na posição de equilíbrio (i_0, z_0) , são obtidas substituindo-se (2.18) e (2.19) em (2.20). Assim,

$$K_i = \frac{\partial f(i_0, z_0)}{\partial i} = -\frac{Kz_0}{(a^2 + z_0^2)^{5/2}} \quad (2.22a)$$

e

$$K_z = \frac{\partial f(i_0, z_0)}{\partial z} = -\frac{Ki_0(a^2 - 4z_0^2)}{(a^2 + z_0^2)^{7/2}} \quad (2.22b)$$

Assim, a expressão escalar para a dinâmica deste sistema de levitação, representado pela equação (2.20), fica reduzida ao modelo linearizado dado por:

$$m \frac{d^2 \Delta z}{dt^2} = K_i \Delta i + K_z \Delta z \quad (2.23)$$

Aplicando a Transformada de Laplace à expressão (2.23) obtém-se a função de transferência:

$$G(s) = \frac{\Delta Z(s)}{\Delta I(s)} = \frac{K_i/m}{s^2 - K_z/m} \quad (2.24)$$

Sabe-se que a relação entre a tensão e a corrente em um eletroímã é dada por:

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.25)$$

Aplicando-se a Transformada de Laplace na equação (2.25) obtém-se a relação entre a tensão e a corrente:

$$\Delta I(s) = \frac{\Delta U(s)}{R + Ls} \quad (2.26)$$

Substituindo (2.26) em (2.24) tem-se a função de transferência deste sistema que relaciona a posição do objeto e a tensão aplicada no eletroímã no domínio da frequência.

$$G(s) = \frac{\Delta Z(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K_i/m}{(s^2 - K_z/m)(R + Ls)} \quad (2.27)$$

2.4. Conclusão

Este capítulo apresentou a análise matemática e a modelagem tanto dos sistemas de levitação eletromagnética tradicional quanto dos sistemas de levitação com ímãs permanentes. Foram apresentadas as características principais destes sistemas, especialmente a instabilidade natural, o que exige o emprego de um sistema de controle em malha fechada com realimentação negativa.

A diferença entre eles pode ser observada na relação entre a força magnética, a corrente elétrica e a distância de entreferro, que apresentam relações de proporcionalidade distintas.

O próximo capítulo descreverá o processo de escolha e projeto de todos os elementos deste sistema, como os atuadores, sensores, controladores, circuitos eletrônicos e de eletrônica de potência.

3. Projeto dos Elementos do Sistema de Levitação

3.1. Introdução

Após a realização da modelagem matemática do sistema de levitação eletromagnética com ímãs permanentes, desenvolvida no capítulo anterior, segue-se para a elaboração do projeto dos elementos principais deste sistema que compõe a sua planta, ou seja, do eletroímã e dos ímãs permanentes. A Figura 3.1 ilustra o protótipo funcional desenvolvido por ENDALÉCIO [11, 40].



Figura 3.1. Sistema de Levitação Eletromagnética como protótipo funcional.

Este trabalho se propõe a continuar e aprimorar este protótipo, ao transformá-lo em um produto. Deve-se ressaltar que as etapas de projeto não foram realizadas por ENDALÉCIO [11] por não haver nenhum outro compromisso além da demonstração do fenômeno de levitação magnética observado através de um protótipo experimental. Desta forma, este trabalho apresenta as seguintes contribuições e aprimoramentos, do ponto de vista técnico, para se alcançar o objetivo final:

- Projeto do atuador, com a definição do dimensionamento geométrico do eletroímã, a determinação do seu número de espiras e a bitola dos condutores, além da configuração do núcleo eletromagnético e dos ímãs permanentes;
- Estudo de todos os sensores comumente encontrados em sistemas de levitação eletromagnética, identificando as suas vantagens e desvantagens, e definindo o sensor escolhido;
- Avaliação do controlador e do circuito de eletrônica de potência utilizados;
- Projeto de um novo circuito eletrônico e de uma placa de circuito impresso, modificando o hardware utilizado no protótipo funcional, tornando-o mais compacto e simples de se operar.

Sendo assim, os componentes deste sistema devem estar sujeitos à algumas restrições de ordem técnica e comercial, como as exemplificadas a seguir, como forma de torná-lo um produto:

- A operação do sistema deve ser confiável e atender aos requisitos de segurança básicos.
- O projeto deve evitar o superaquecimento do eletroímã para garantir um funcionamento contínuo e duradouro.
- A instalação dos componentes do sistema deve garantir a firmeza e resistência aos choques mecânicos comuns.
- As dimensões dos componentes do sistema devem se restringir aos valores comerciais encontrados no mercado, como a bitola do fio, e as medidas dos ímãs permanentes e do núcleo ferromagnético, por exemplo, além de serem compatíveis com as proporções de um produto.

O projeto de *design* e estrutura para este produto foi elaborado em parceria com o Departamento de Desenho Industrial – Projeto de Produto da Escola de Belas Artes (EBA) da UFRJ. O Anexo I apresenta o desenho técnico da estrutura mecânica. As dimensões definidas para o produto se basearam no compromisso entre os critérios estéticos compatíveis com os produtos eletroeletrônicos para fins de decoração similares existentes no mercado e a possibilidade de se garantir o seu funcionamento e a inserção dos componentes elétricos e eletrônicos no seu interior. A Figura 3.2 apresenta um modelo gráfico representando este produto.

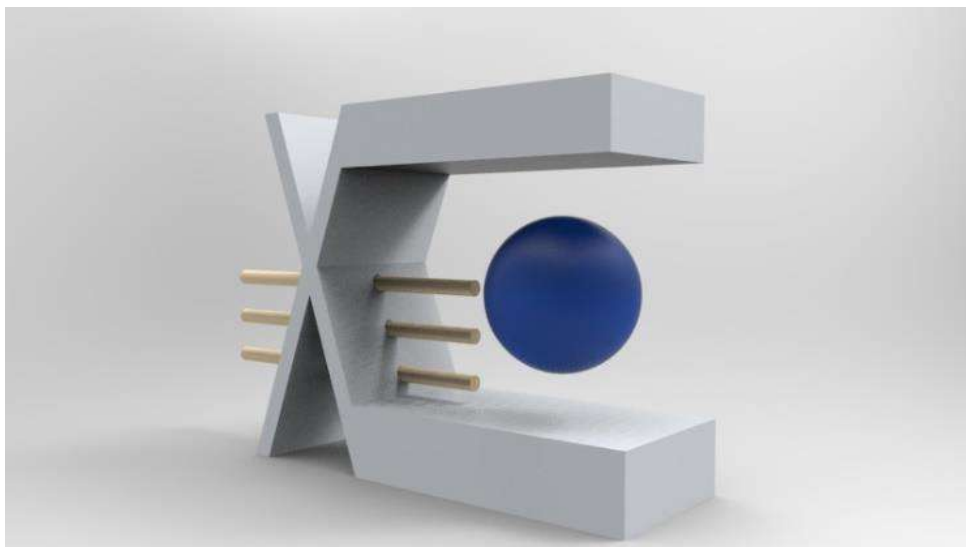


Figura 3.2. Representação gráfica do sistema de levitação como um produto.

Com base nestas restrições, foram feitos os projetos do eletroímã e dos ímãs permanentes utilizados, que estão apresentados em detalhes no Apêndice A. Este capítulo prossegue com o projeto dos demais componentes deste sistema de levitação, como sensores e circuitos eletrônicos de potência e de controle, que estão sujeitos às restrições técnicas, econômicas e mecânicas de um produto compacto de baixo custo.

3.2. Sensor

Um dos elementos mais importantes para o funcionamento dos sistemas de levitação eletromagnética é a escolha adequada dos sensores. Conforme visto no Capítulo 2, os sistemas eletromagnéticos tradicionais empregam sensores de corrente e de posição.

As principais características desejadas para os sensores utilizados em sistemas de levitação magnética são: linearidade na faixa de aplicação, bom nível de resolução e baixo tempo de resposta, de forma que esteja adequado com o comportamento dinâmico do sistema. Para a situação específica, existem ainda a necessidade que o sensor apresente dimensões compatíveis com um produto comercial, uma vez que ele estará inserido em seu interior, além de um custo acessível para um produto de baixo custo.

Nos próximos itens, serão apresentados, respectivamente, os tipos de sensores de corrente e de posição mais utilizados em sistemas de levitação eletromagnética, incluindo uma breve descrição de seu princípio de funcionamento e suas características principais.

3.2.1. Sensores de Corrente

Uma das técnicas de medição de corrente utiliza um resistor shunt situado no caminho da corrente que circula pelo atuador, de forma que a diferença de tensão registrada sobre ele seja proporcional à esta corrente e seja em seguida amplificada com baixo nível de ruído para o sistema de controle. O problema da ausência de isolamento elétrico entre os circuitos de potência e de sensoriamento pode ser corrigido empregando-se circuitos opto-acopladores [41].

Uma outra maneira de medição de corrente é feita valendo-se do princípio do efeito Hall, que estabelece que a interação entre uma corrente e um campo magnético perpendiculares entre si provoca o surgimento de uma diferença de potencial elétrico em uma direção simultaneamente perpendicular aos outros dois, conforme ilustra a Figura 3.3. São utilizados para esta função os dispositivos semicondutores que

apresentam alta mobilidade elétrica dos seus elétrons e proporcionam uma diferença de potencial perceptível pelos instrumentos de medidas [42].

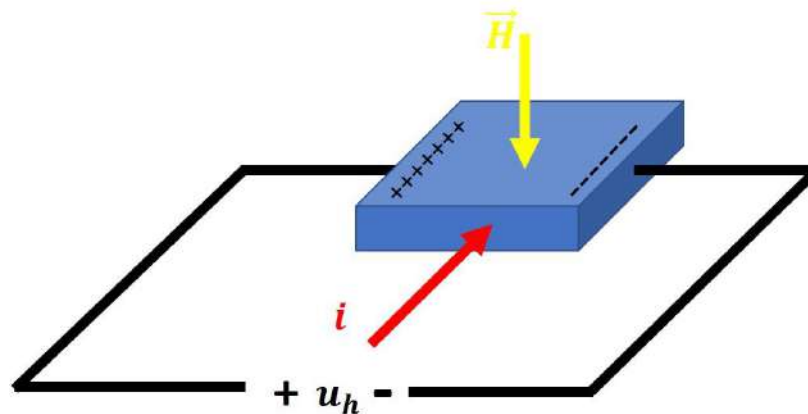


Figura 3.3. Princípio de funcionamento do efeito Hall.

No arranjo básico de sensoriamento de corrente por efeito Hall, chamado de malha aberta, o condutor cuja corrente se deseja medir é envolvido por um núcleo ferromagnético toroidal, que intensifica o campo magnético tangencial produzido por ele. O dispositivo semicondutor de efeito Hall é posicionado no entreferro do núcleo e é simultaneamente perpendicular à corrente do condutor e ao seu campo magnético produzindo uma diferença de potencial proporcional à corrente. A principal característica deste método é o completo isolamento entre os circuitos de potência e de sensoriamento.

O sensor de efeito Hall em malha aberta, entretanto, apresenta o inconveniente de ser muito suscetível a variações de corrente ou de modelos do núcleo, o que reduz sua precisão. Para compensar este problema, utiliza-se o arranjo em malha fechada. Nesta configuração, a corrente medida circula no enrolamento primário do núcleo, enquanto uma corrente da malha de realimentação circula no enrolamento secundário de tal forma a manter um fluxo magnético nulo no núcleo ferromagnético, melhorando a reprodutibilidade e precisão do sensor [41, 43].

O sensor de corrente por efeito Hall em malha fechada é o mais utilizado em sistemas de levitação eletromagnética tradicionais, conforme demonstra a experiência de trabalhos anteriores realizados pelo LASUP [20 – 23].

3.2.2. Sensores de Posição

Apesar de uma extensa variedade de tipos de sensores de posição e de princípios de funcionamento, os sistemas de levitação magnética apresentam características próprias que limitam a escolha adequada do sensor.

Entre os principais pontos requisitados pelos sistemas de levitação eletromagnética para os sensores de posição estão: faixa de medição, dependendo da aplicação, de micrometros a centímetros, linearidade, baixa susceptibilidade a variações de temperatura, repetibilidade, tempo de resposta compatível com a dinâmica do sistema, imunidade à ruídos e interferências eletromagnéticas, além da ausência de contato entre o elemento sensor e o alvo, que corresponde ao objeto flutuante [30, 44].

Serão apresentados a seguir os tipos mais comuns de sensores de posição utilizados em sistemas de levitação eletromagnética.

3.2.2.1 Sensor Indutivo

Este sensor é formado por uma bobina envolvida em um núcleo ferromagnético que emite um sinal de tensão de alta frequência e sua medição se baseia na variação de sua impedância de entrada. O alvo deve conter um material ferromagnético, de modo a atuar como caminho de baixa relutância no circuito magnético. Desta forma, quanto mais próximo o alvo encontra-se da face do sensor, maior será a reatância indutiva do circuito e, conseqüentemente, sua impedância, estabelecendo-se uma relação aproximadamente inversamente proporcional entre ela e a distância do sensor ao alvo. Assim, o seu circuito eletrônico produz uma relação linear entre a posição e a tensão de saída.

Entre as suas principais vantagens, estão a ampla variedade de sensores indutivos disponíveis no mercado, uma vez que são muito utilizados em processos de automação industrial, o custo não muito elevado e a ausência de influência de elementos espúrios entre o sensor e o alvo, como poeira e lubrificantes, por exemplo. Os seus inconvenientes são a necessidade de o alvo ser um material ferromagnético e a maior susceptibilidade às interferências eletromagnéticas [25, 30].

3.2.2.2 Sensor por Correntes Parasitas

O sensor de correntes parasitas apresenta uma estrutura muito semelhante ao sensor indutivo. Enquanto o elemento sensor é idêntico ao anterior, o alvo deve conter um material condutor, de modo a induzir correntes parasitas significativas. Nesta configuração, quanto mais próximo o alvo está da face do sensor, maior será a indução de corrente e, conseqüentemente, menor será a impedância de entrada da bobina do sensor, estabelecendo-se uma relação inversa daquela encontrada no sensor indutivo.

Os seus prós são a alta precisão e a alta resolução mesmo para deslocamentos da ordem de grandeza de micrometros, além de dimensões reduzidas, enquanto entre

seus contras estão o alto custo de aquisição, a sensibilidade à pequenas imperfeições mecânicas no alvo ocasionando ruídos e a possibilidade de interferência mútua quando utilizados dois ou mais sensores por correntes parasitas [30, 45].

Um exemplo de utilização deste tipo de sensor em aplicações envolvendo mancais magnéticos no LASUP pode ser observado em [46].

3.2.2.3 Sensor Capacitivo

No sensor capacitivo, o elemento sensor e o alvo atuam como eletrodos de um capacitor de placas paralelas, enquanto o meio que os separa forma o material dielétrico. De maneira dual ao sensor indutivo, a bobina do sensor capacitivo emite um sinal de corrente alternado de alta frequência e detecta a variação em sua impedância. Quanto maior a proximidade entre eles, maior será a capacitância e menor será a impedância interna do circuito.

As vantagens principais do sensor capacitivo são a sua alta resolução e a imunidade à ruídos eletromagnéticos, enquanto suas desvantagens são a sensibilidade às impurezas no meio dielétrico que podem afetar a medição e a possibilidade de descargas eletrostáticas interferirem no sistema [25].

Um exemplo de aplicação deste tipo de sensor em trabalhos envolvendo mancais magnéticos no LASUP pode ser consultado em ORTIZ SALAZAR *et al* [14].

3.2.2.4 Sensor Ultrassônico

Este sensor emite pulsos sonoros na faixa do ultrassom que, ao incidirem sobre o alvo, são refletidos de volta ao elemento sensor. O seu dispositivo interno mede o intervalo de tempo entre o pulso emitido e o seu eco para se determinar com precisão a distância entre o alvo e ele.

As suas principais vantagens são uma ampla faixa de operação linear e um tempo de resposta muito rápido, enquanto suas desvantagens são o custo alto e a necessidade de uma área considerável próxima ao alvo estar completamente desobstruída de obstáculos para se evitar erros de medida devido às reflexões indesejadas [42, 45].

Devido a estas características e, em especial, o seu tempo de resposta adequado à dinâmica de sistemas de levitação eletromagnética este é o tipo de sensor mais utilizado em aplicações didáticas e educacionais desenvolvidas pelo LASUP, conforme demonstram os trabalhos [19], [21 – 23] e [47].

3.2.2.5 Sensor Óptico

Os sensores deste tipo apresentam variações de princípio de funcionamento. A sua configuração mais simples emprega um conjunto de fotoemissores e

fotoreceptores inseridos de tal forma, que o objeto suspenso é posicionado entre eles. Neste arranjo, o sinal luminoso emitido pelo fotoemissor encontra o objeto como obstáculo antes de atingir o fotoreceptor. Desta maneira, é possível conceber um esquema, no qual não há recepção luminosa quando o objeto suspenso encontra-se na sua posição de equilíbrio e há uma gradual incidência de luz quando o objeto se desloca deste ponto, estabelecendo-se uma correspondência entre a intensidade luminosa detectada pelo fotoreceptor e a posição do objeto.

Para alvos que apresentam simetria geométrica, pode-se construir um sistema de medição diferencial formado por dois feixes de luz posicionados de forma a cobrir a incidência de luz nas partes inferior e superior do objeto, identificando se o mesmo está se deslocando para um lado ou para o outro.

As principais vantagens desta configuração são o baixo custo e a ausência de interferência eletromagnética, enquanto suas desvantagens são a necessidade do alvo ser constituído por material não reflexivo e o fato do ajuste na montagem do conjunto de fotoemissores e fotoreceptores ser muito precisa [25, 45].

Este método, conhecido como oclusão, foi muito utilizado em projetos do LASUP envolvendo mancais magnéticos e levitação eletromagnética, a partir do arranjo de medição diferencial elaborado por SANTISTEBAN e STEPHAN [15] e empregado nos trabalhos [16 – 18].

Um outro tipo se baseia no princípio de funcionamento semelhante do sensor de posição ultrassônico, no qual um sinal luminoso é emitido por um LED em direção ao alvo e o intervalo de tempo entre o pulso emitido e o refletido é registrado, determinando-se a distância do alvo. Os seus prós são o rápido tempo de resposta e a imunidade à interferência eletromagnética, enquanto seus contras são a baixa linearidade e a sua faixa de medição na ordem de centímetros [25, 45].

3.2.2.6 Sensor de Efeito Hall

O princípio de funcionamento de um sensor de efeito Hall foi apresentado na seção relativa aos métodos de sensoriamento de corrente. Para que este método seja empregado na medição de posição, deve-se utilizar uma fonte de campo magnético constante com direção perpendicular ao dispositivo semiconductor, como ilustrado na Figura 3.4.

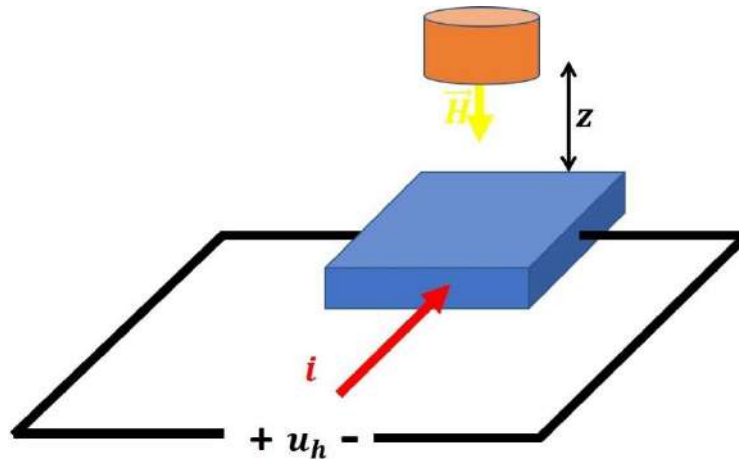


Figura 3.4. Sensor de efeito Hall para medição de posição.

Nesta situação, um ímã permanente, em laranja, produz um campo magnético \vec{H} transversal a face do sensor de efeito Hall, que é alimentado por uma corrente i . A densidade de fluxo magnético registrada pelo sensor pode ser expressa como uma função da distância z entre ele e o ímã. Desta forma [48],

$$B = \frac{k}{z} \quad (3.1)$$

Onde a constante k está associada ao tipo de configuração do circuito magnético.

A diferença de potencial nos terminais do sensor de efeito Hall será:

$$u_h = k_h i B \quad (3.2)$$

Observa-se que a tensão obtida nos terminais é função da corrente de alimentação e da densidade de fluxo registrada pelo dispositivo. Substituindo-se a expressão (3.1) em (3.2):

$$u_h = \frac{k k_h i}{z} \quad (3.3)$$

Desta forma, é possível obter uma relação entre a tensão nos terminais do sensor de efeito Hall e a distância entre ele e a fonte de campo magnético. Na situação em que esta fonte esteja associada ao objeto suspenso, pode-se utilizar o sensor para medição de posição e relacionar que a sua tensão de saída é inversamente proporcional à distância do objeto.

Atualmente, estes sensores são dotados de dispositivos semicondutores que possibilitam que eles sejam cada vez menores e flexíveis e que possam ser

aplicados em sistemas com entreferros da ordem de micrometros [49]. As principais vantagens deste tipo de sensor são o seu baixo custo, dimensões reduzidas e a linearidade, enquanto suas desvantagens são a susceptibilidade a interferências magnéticas que possam atrapalhar a medida e a exigência de o alvo conter alguma fonte de campo magnético que seja detectável pelo sensor.

3.2.3. Escolha do Sensor

Com base na descrição dos sensores de corrente e de posição tipicamente encontrados em sistemas de levitação eletromagnética, é possível definir o sensor que será utilizado no produto, considerando-se as restrições de ordem técnica e comercial.

Conforme apresentado no Capítulo 2, os sistemas de levitação eletromagnética tradicionais utilizam sensores de corrente e de posição para o funcionamento de suas malhas de controle de corrente e de posição.

Os sistemas de levitação eletromagnética que utilizam ímãs permanentes podem se aproveitar deste material ferromagnético para dispensarem os sensores de corrente e empregarem apenas um sensor de posição por efeito Hall, através do método de controle por imposição de tensão. Considerando-se todas estas questões, decidiu-se optar pelo último e valer-se das vantagens deste tipo de sensor e do sistema em que será aplicado.

O sensor escolhido é o SS495A fabricado pela *Honeywell* e sua folha de dados pode ser consultada em [50]. As suas principais características construtivas são a sua dimensão reduzida, o baixo consumo de potência para sua operação, alimentação padrão de 5 V, e respostas para campos magnéticos que indicam o seu sentido, seja positivo ou negativo.

Um outro aspecto relevante no desenvolvimento de um produto de baixo custo é realizar uma estimativa de custo dos sistemas de sensoriamentos que serão utilizados. A Tabela 3.1 apresenta uma relação de custo dos sensores empregados em experimentos semelhantes de levitação eletromagnética de um objeto já realizados no LASUP.

O sistema convencional 1 utilizou um sensor de corrente e um sensor de posição do tipo ultrassônico e se refere aos trabalhos [22, 23]. O sistema convencional 2 empregou um sensor de corrente e um conjunto de fotoemissores e fotoreceptores em um sensor de posição do tipo óptico por oclusão [16 – 18]. Ambos são sistemas de levitação eletromagnética tradicionais, enquanto o sistema proposto é um sistema com ímãs permanentes e utiliza apenas um sensor de posição por efeito Hall. É possível observar que o custo do sensoriamento deste último é muito inferior aos dois primeiros

e apresenta o mesmo efeito de controle efetivo da posição do objeto dos outros, justificando-se assim como uma excelente escolha para um produto de baixo custo.

Tabela 3.1 Relação de custo de sensoriamento para sistemas de levitação eletromagnética.

Tipo de sensor Levitação Eletromagnética	Sensor de Corrente	Sensor de Posição		Sensor por Efeito Hall	Custo de sensores por sistema
		Ultrassônico 	Óptico 		
Sistema Convencional 1	✓	✓			R\$ 2.466,00
Sistema Convencional 2	✓		✓		R\$ 183,80
Sistema Proposto				✓	R\$ 5,90
Custo do sensor	R\$ 166,00	R\$ 2.300,00	2 x R\$ 8,90	R\$ 5,90	

3.3. Circuito de Eletrônica de Potência

Dentre as várias configurações possíveis de circuitos de eletrônica de potência para o acionamento de um eletroímã alimentado por corrente contínua, como circuitos em meia ponte ou em ponte completa (ponte H), tipos de dispositivos semicondutores e da construção de um circuito discreto ou utilização de um circuito integrado completo, decidiu-se manter a escolha definida por ENDALÉCIO [11] em função de seu bom desempenho no funcionamento do sistema do protótipo funcional e de sua confiabilidade.

O circuito integrado LMD18201, cuja folha de dados encontra-se em [51], é composto por um conjunto de quatro MOSFETs dispostos na configuração de ponte completa. Este circuito possui diodos antiparalelos de proteção das chaves semicondutoras, proteção contra sobrecorrentes e contra sobreaquecimento, apresenta a capacidade de fornecer uma corrente de 3 A para operação contínua e de 6 A para picos de curta duração, além da possibilidade de ser alimentado por uma tensão de até 55 V.

Os pinos de saída do CI para o eletroímã são os pinos 2 e 10 e, dependendo do nível de tensão em cada um deles, é possível definir o sentido da corrente elétrica que circula pela bobina. Isto pode ser feito a partir da combinação lógica de três pinos do circuito interno de controle do CI. O pino 3 (DIRECTION) controla a direção da corrente, o pino 4 (BRAKE) foi projetado para frear um motor de corrente contínua que esteja conectado nos terminais do CI, curto-circuitando os pinos de saída, enquanto o

pino 5 (PWM) determina o tipo de sinal PWM que será utilizado. A Tabela 3.2 apresenta a tabela verdade da combinação dos três pinos.

Tabela 3.2. Tabela Verdade dos pinos de controle do LMD18201.

PWM PINO 5	DIRECTION PINO 3	BRAKE PINO 4	FUNÇÃO
H	H	L	PINO 2 OPERA COMO FONTE (V_{cc}) E PINO 10 COMO SUMIDOURO (GND)
H	L	L	PINO 10 OPERA COMO FONTE (V_{cc}) E PINO 2 COMO SUMIDOURO (GND)
L	X	L	PINOS 2 E 10 OPERAM COMO FONTE (V_{cc})
H	H	H	PINOS 2 E 10 OPERAM COMO FONTE (V_{cc})
H	L	H	PINOS 2 E 10 OPERAM COMO SUMIDOURO (GND)
L	X	H	SEM FUNÇÃO

(Nota: H – Nível lógico alto; L – Nível lógico baixo; X – indiferente)

Pela análise da Tabela 3.2, nota-se que as únicas combinações de interesse para o funcionamento do eletroímã são as duas primeiras, em que os pinos PWM e BRAKE permanecem, respectivamente, em nível alto e nível baixo para as duas situações. Assim, considerando-se apenas estas combinações, observa-se que quando o pino DIRECTION está em nível alto, a tensão do pino 2 é igual à tensão de alimentação V_{cc} , enquanto a tensão do pino 10 é nula provocando uma diferença de potencial na bobina igual a $+V_{cc}$. A situação se inverte quando o pino DIRECTION está em nível baixo e a diferença de potencial sobre a bobina é igual a $-V_{cc}$.

Desta forma, a mera variação de nível lógico do pino DIRECTION é capaz de alterar a tensão sobre o eletroímã de $+V_{cc}$ para $-V_{cc}$ e, conseqüentemente, o sentido em que a corrente circula sobre ele. Para o funcionamento do sistema de levitação eletromagnética, deseja-se controlar a tensão média que circula no eletroímã de forma a se manter o objeto flutuando em uma posição estável. Assim, quando o objeto se afasta do eletroímã, mais corrente é necessária para trazê-lo novamente para a posição de equilíbrio, ocorrendo o contrário quando o mesmo se aproxima da bobina.

Uma estratégia para se controlar a corrente média é empregar um sinal modulado por largura de pulso (PWM) no pino DIRECTION e alterar o seu ciclo de trabalho (*duty cycle*). Desta maneira, quando o ciclo de trabalho é igual a 50%, a tensão no eletroímã permanece por igual período entre $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ e o valor médio da corrente que circula por ela é nulo. Quando o ciclo de trabalho é maior que 50%, a

tensão permanece por mais tempo em +Vcc e o valor médio da corrente é positivo, circulando no sentido do pino 2 para o pino 10. Quando o ciclo de trabalho é menor que 50%, a tensão permanece por mais tempo em -Vcc e o valor médio da corrente é negativo, circulando no sentido do pino 10 para o pino 2.

Um aspecto relevante a ser ressaltado é a influência do sentido da corrente no funcionamento do sistema de levitação eletromagnética. Em sistemas tradicionais ocorre a interação entre um eletroímã e um material ferromagnético mole. Nesta configuração, a mudança de sentido da corrente altera a polaridade do campo magnético produzido e o sentido do fluxo magnético do circuito, porém em qualquer destas existe atração do objeto ferromagnético pelo eletroímã.

Em sistemas envolvendo a interação entre um eletroímã e ímãs permanentes, entretanto, a inversão da polaridade do campo magnético devido à mudança de sentido da corrente no eletroímã altera a natureza da interação de atrativa para repulsiva, adicionando maior complexidade ao problema. Desta maneira, deve-se manter uma alimentação de corrente contínua fixa de operação e garantir que a soma dela com a corrente de controle, quando esta é negativa, se mantenha positiva para que a interação permaneça sempre atrativa como nos sistemas de levitação eletromagnética tradicionais.

A Figura 3.5 ilustra o esquema de funcionamento do circuito de eletrônica de potência implementando. O circuito em preto corresponde ao encontrado no CI LMD18201 de ponte completa. Os números 2 e 10 se referem aos pinos de saída do CI que são conectados aos terminais do eletroímã e as conexões em azul são os sinais de controle que atuam no acionamento das chaves semicondutoras C1 a C4. Para a configuração utilizada, apenas um sinal de controle é necessário para controlar o nível de tensão sobre a bobina, a partir do chaveamento do tipo bipolar em que cada perna da ponte H é formada por chaves que atuam de maneira complementar.

A Figura 3.6 apresenta um diagrama representando os sinais do circuito de controle responsável por produzir um sinal PWM e o sinal de saída do circuito de eletrônica de potência. O sinal PWM pode ser gerado a partir da comparação entre um sinal com forma de dente de serra u_{ds} fixo, em laranja, e um sinal de controle u_c variável, em azul. Quando o sinal de controle u_c é, no mesmo instante de tempo, maior que u_{ds} , o sinal de saída do comparador u_{pwm} , em verde, atinge o nível lógico alto, enquanto na situação contrária, u_{pwm} possui o nível lógico baixo [45].

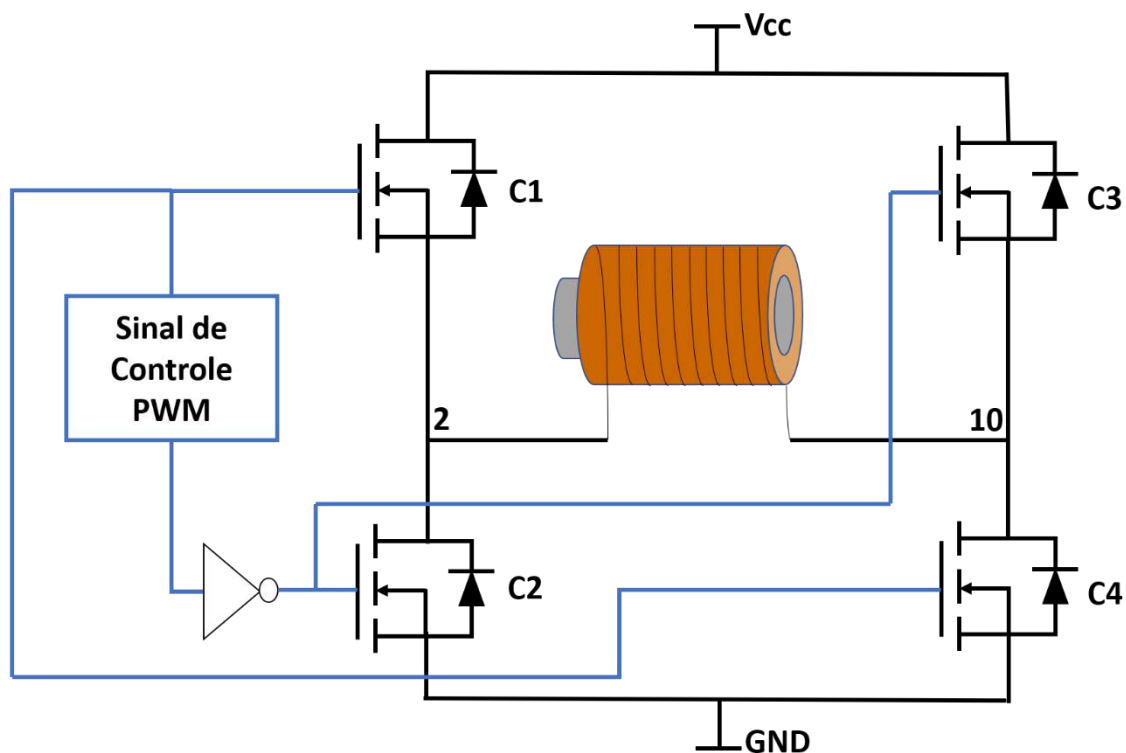


Figura 3.5. Diagrama do circuito de Eletrônica de Potência.

O sinal de controle do tipo PWM atua no circuito de eletrônica de potência da Figura 3.5 da seguinte forma. Quando u_{pwm} encontra-se em nível alto, durante o intervalo de tempo t_{on} , as chaves C1 e C4 fecham, enquanto C2 e C3 permanecem abertas, produzindo uma tensão no eletroímã u , em vermelho, igual a V_{cc} . Por outro lado, quando u_{pwm} atinge o nível baixo, durante o intervalo de tempo t_{off} , as chaves C2 e C3 fecham, enquanto C1 e C4 abrem, provocando uma tensão no eletroímã igual a $-V_{cc}$.

Quanto maior for o intervalo de tempo em que as chaves C1 e C4 permanecem fechadas, maior será o nível médio da tensão sobre o eletroímã U_m , e quanto maior for o intervalo de tempo em que as chaves C2 e C3 fecham, menor será o valor de U_m . Desta forma, o nível médio da tensão sobre o eletroímã pode ser controlado diretamente a partir da escolha do sinal de controle u_c , uma vez que este controla o ciclo de trabalho de chaveamento.

A relação entre os sinais de controle do circuito de eletrônica de potência está representada pelo diagrama de blocos da Figura 3.7. A comparação entre os sinais de controle u_c e de dente de serra u_{ds} produz o sinal lógico modulado por largura de pulso u_{pwm} . Este sinal é conectado ao pino DIRECTION do circuito de lógica do CI LMD18201, enquanto os pinos PWM e BRAKE permanecem, respectivamente, em nível alto e em nível baixo. O circuito de lógica aciona o circuito de potência e controla

o chaveamento dos dispositivos semicondutores proporcionando um sinal de saída do tipo PWM nos enrolamentos do eletroímã que varia entre os níveis de alimentação V_{cc} e $-V_{cc}$.

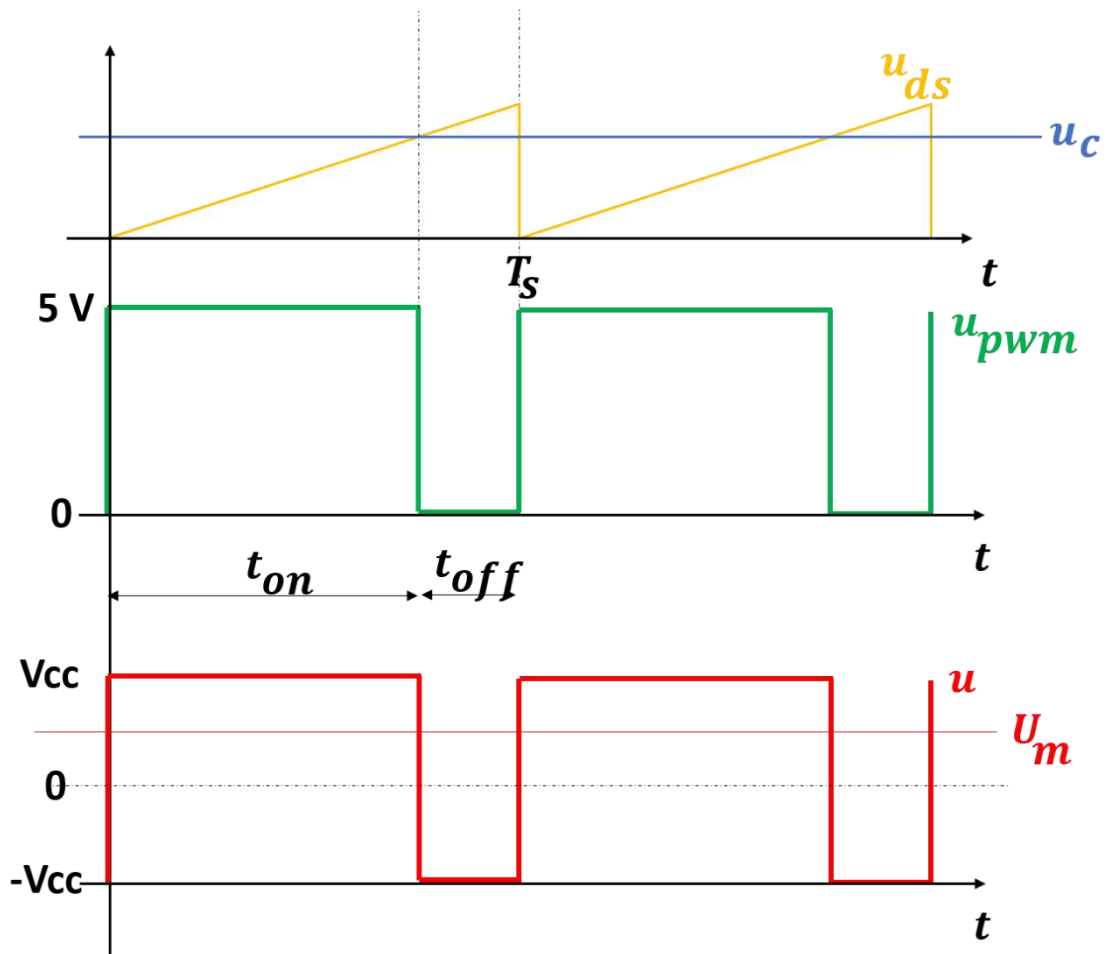


Figura 3.6. Sinais de controle e de saída do circuito de eletrônica de potência.

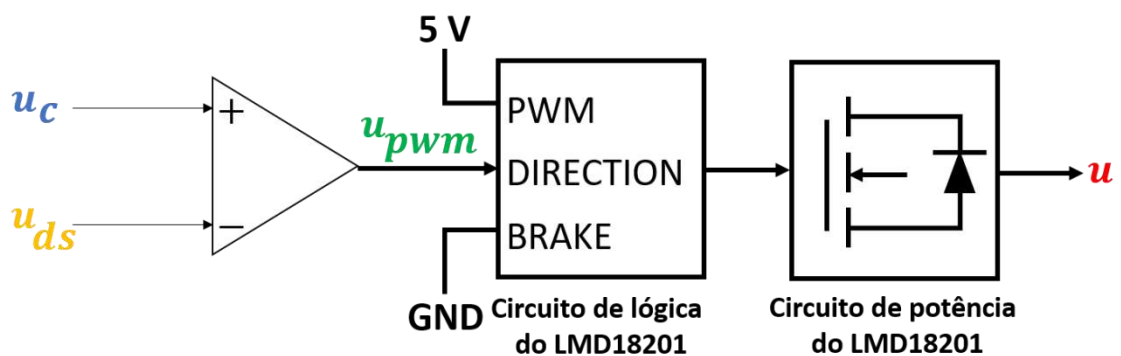


Figura 3.7. Diagrama de blocos do circuito de eletrônica de potência.

3.4. Controlador

3.4.1. Hardware

Atualmente, existem uma ampla variedade de controladores no mercado, com diferenças entre fabricantes, preços, capacidade de processamento e dedicação, linguagem de programação, entre outros aspectos que podem ser adequados ao tipo de tarefa que se destinam.

Os controladores analógicos ainda são encontrados em experimentos de levitação magnética que apresentam as técnicas de controle clássico, em função de sua precisão e baixo custo. Como exemplos desta utilização, com grande êxito nas atividades de ensino, pode-se citar os trabalhos de WONG [52], de HURLEY *et al* [53] e de LILIENKAMP e LUNDBERG [33].

Apesar de seu funcionamento consagrado, os controladores analógicos apresentam uma série de inconvenientes em sistemas de levitação magnética, como a maior susceptibilidade à interferência eletromagnética de alta frequência que afetam, sobretudo, a parcela derivativa, a dificuldade de implementação de técnicas de controle mais robustas, além da menor flexibilidade e versatilidade para modificação dos parâmetros de controle [30].

Desta forma, torna-se vantajosa a utilização de controladores digitais. Os principais tipos de controladores utilizados em projetos de levitação magnética envolvem os DSPs [54] ou FPGAs [36].

O LASUP apresenta grande experiência no uso tanto de controladores analógicos, quanto digitais. Um controlador analógico foi proposto por GOMES e STEPHAN [18] para a levitação de uma esfera ferromagnética. Neste protótipo, empregou-se um eletroímã, com controle de posição PD e de corrente com banda de histerese, produzidos de maneira analógica através de amplificadores operacionais, temporizadores e flip-flops, e circuito de acionamento em meia-ponte com operação chaveada de MOSFETs.

STEPHAN *et al* [17] empregaram um microcontrolador SH7045F da *Hitachi* em um experimento semelhante no qual o sistema de controle consistia em um compensador PD com sensoriamento óptico e circuito de potência do eletroímã em meia-ponte com IGBTs operando em modo chaveado.

GOMES [20] e MOTA [21] utilizaram o sistema de controle em tempo real do *Simulink/MATLAB Real-Time Control Toolbox* para o controle da posição de uma esfera ferromagnética, enquanto VALLE [22] e NEVES [23] aplicaram a mesma ferramenta no controle de um disco ferromagnético.

Além destes experimentos de levitação magnética, os controladores digitais do tipo DSP da *Texas Instruments* foram utilizados em projetos de mancais magnéticos ativos (AMB), tanto para um motor mancal magnético [46], quanto em uma plataforma de levitação eletromagnética [47].

O trabalho de ENDALÉCIO [11] escolheu a plataforma *Arduino* [12] para realizar o controle do sistema de levitação, devido ao seu baixo custo, facilidade de programação e possuir os requisitos técnicos suficientes para desempenhar a função. Além disso, ela conta com um código aberto, em constante evolução e uma comunidade ativa de usuários.

A Figura 3.18 apresenta a placa de controle *Arduino UNO* com destaque para o chip do microcontrolador *ATMEGA 328P*, cuja folha de dados encontra-se em [55].

Deve-se ressaltar que a placa de controle do *Arduino UNO* possui diversas funcionalidades que estão além das necessidades do projeto do sistema de levitação e o item principal é o seu microcontrolador. Desta forma, pode-se utilizar no protótipo apenas o *ATMEGA 328* e seus circuitos auxiliares de funcionamento, o que reduz significativamente o custo dos componentes eletrônicos.

O *ATMEGA 328* apresenta como características principais uma tensão de operação em nível lógico de 5 V, quatorze pinos de entradas ou saídas digitais, sendo seis deles com saída do tipo PWM, seis pinos de entrada analógica, memória flash de 32 KB e frequência de *clock* de 16 MHz.

Assim, apenas o microcontrolador será mantido no protótipo, e a placa de controle do *Arduino UNO* será utilizada exclusivamente para compilar o programa de controle do sistema de levitação e carregá-lo no *ATMEGA 328*, cujo *script* servirá como *firmware* do produto.

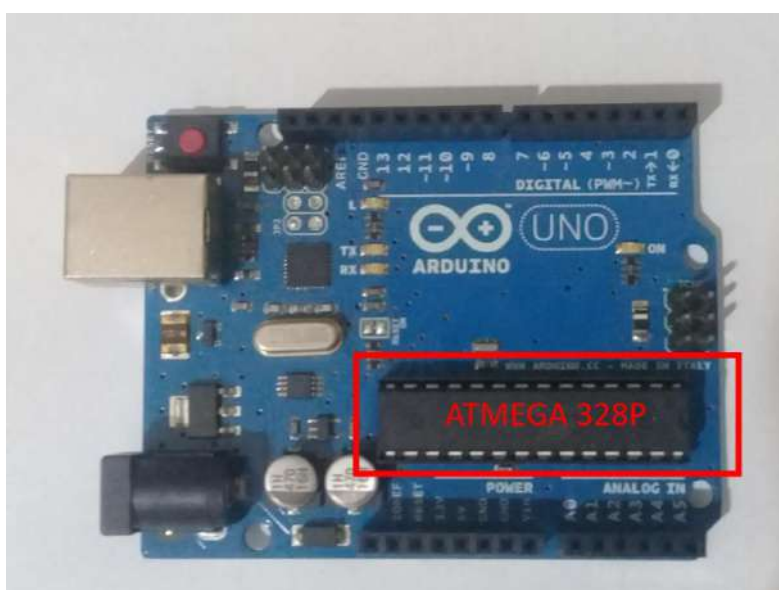


Figura 3.8. Placa de Controle do *Arduino UNO*.

3.4.2. Projeto do Sistema de Controle

A seção 2.3 apresentou a análise matemática de um sistema de levitação eletromagnética com ímãs permanentes. A Tabela 3.3 ilustra os valores dos principais parâmetros do modelo obtidos a partir de medição experimental e da definição do ponto de equilíbrio do sistema para os valores de i_0 e z_0 .

Tabela 3.3. Parâmetros do modelo do sistema de levitação eletromagnética com ímãs permanentes.

Parâmetros do Modelo	Valor
a	20,0 mm
i_0	750 mA
K	$1,45 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m}^4 / \text{A}$
K_i	0,222 N/A
K_z	8,89 N/m
L	17,1 mH
m	17,0 g
R	3,5 Ω
z_0	15,0 mm

A equação 3.4 apresenta a função de transferência do sistema, que pode ser obtida através da substituição dos valores encontrados na Tabela 3.3 na equação 2.27.

$$G(s) = \frac{\Delta Z(s)}{\Delta U(s)} = \frac{13,06}{(s^2 - 522,9)(3,5 + 0,0171s)} \quad (3.4)$$

A função de transferência da equação (3.4) possui três polos iguais a:

$$\begin{aligned} p_1 &= 22,87 \text{ rad/s} \\ p_2 &= -22,87 \text{ rad/s} \\ p_3 &= -204,7 \text{ rad/s} \end{aligned} \quad (3.5)$$

A existência de um polo no semiplano direito comprova que o sistema é naturalmente instável e requer uma malha de controle fechada com realimentação negativa para sua estabilização. A Figura 3.9 apresenta o diagrama de blocos básico do sistema de controle proposto.

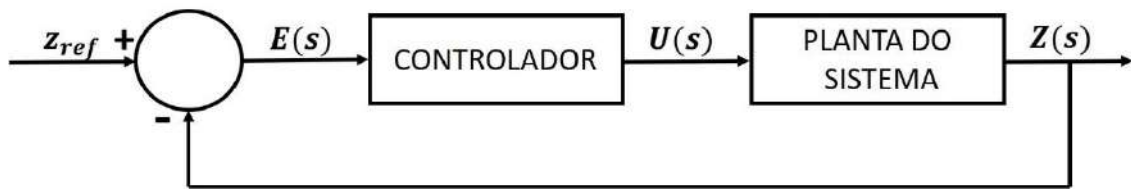


Figura 3.9. Diagrama de blocos do sistema de controle.

Conforme demonstrado pela literatura [31], o controlador do tipo meramente proporcional não é capaz de estabilizar um sistema de levitação eletromagnética, exigindo-se um controlador, no mínimo, do tipo proporcional-derivativo (PD). O controlador escolhido para efetuar o controle é do tipo por avanço de fase (*Lead*), cuja função de transferência é:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_c \frac{(s + z_c)}{s + p_c}, \text{ onde } z_c < p_c \quad (3.6)$$

Uma vez que o sistema de controle é implementado de forma digital em um microcontrolador, é necessário realizar a conversão da função de transferência da equação (3.6) da forma contínua para a forma discreta. Desta forma, deve-se descrever o controlador *Lead* através de uma equação a diferenças.

Manipulando-se algebricamente a expressão (3.6), pode-se obter a seguinte relação entre os sinais de entrada e saída do controlador:

$$sU(s) + p_c U(s) = K_c s E(s) + K_c z_c E(s) \quad (3.7)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace inversa à expressão (3.7), pode-se determinar a equação diferencial ordinária do controlador:

$$\frac{du(t)}{dt} + p_c u(t) = K_c \frac{de(t)}{dt} + K_c z_c e(t) \quad (3.8)$$

Considerando-se um intervalo de amostragem T_a e a relação $t_a = nT_a$, a equação (3.8) pode ser representada em sua forma discreta pelo método de diferenças em atraso como:

$$u(n) = \frac{1}{1 + p_c T_a} u(n - 1) + K_c \frac{1 + z_c T_a}{1 + p_c T_a} e(n) - \frac{K_c}{1 + p_c T_a} e(n - 1) \quad (3.9)$$

O ganho, o polo e o zero do controlador *Lead* foram escolhidos a partir da análise dinâmica do sistema em malha fechada, com auxílio da interface “S/SO Tool” do software MATLAB. Assim, os parâmetros do controlador possuem os seguintes valores:

$$\begin{aligned} z_c &= -23 \text{ rad/s} \\ p_c &= -414 \text{ rad/s} \\ K_c &= 18 \end{aligned} \tag{3.10}$$

A Figura 3.11 apresenta o diagrama de lugar das raízes do sistema em malha fechada com o controlador *Lead* projetado.

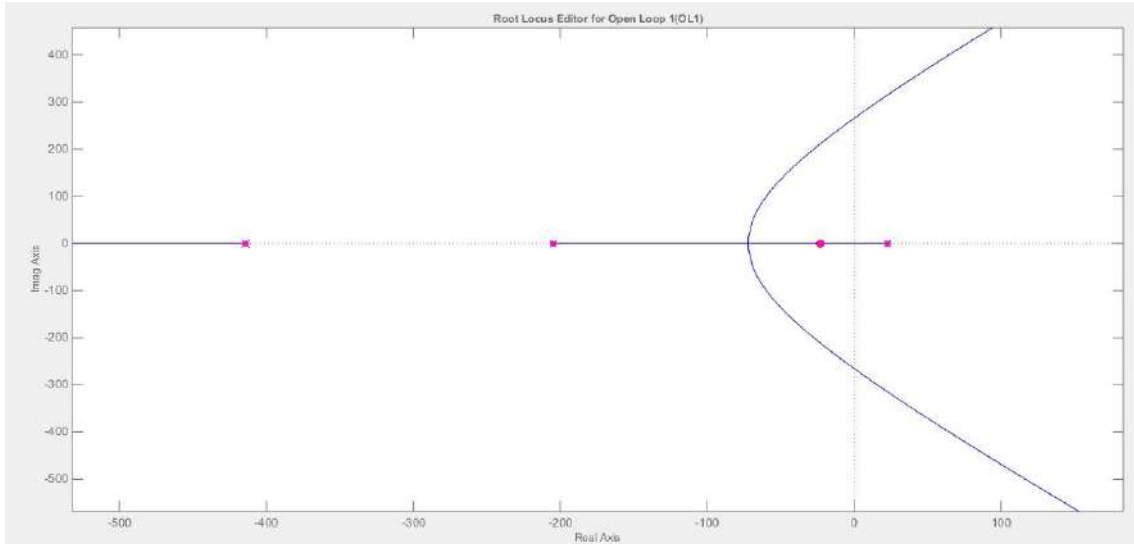


Figura 3.10. Diagrama de lugar das raízes do sistema de controle em malha fechada com controlador *Lead*.

A Figura 3.11 apresenta o resultado de uma simulação do sistema de controle para um sinal de referência do tipo degrau com amplitude igual a 5. É possível observar que o sistema é estabilizado com um controlador do tipo *Lead* e apresenta um erro de regime permanente não nulo.

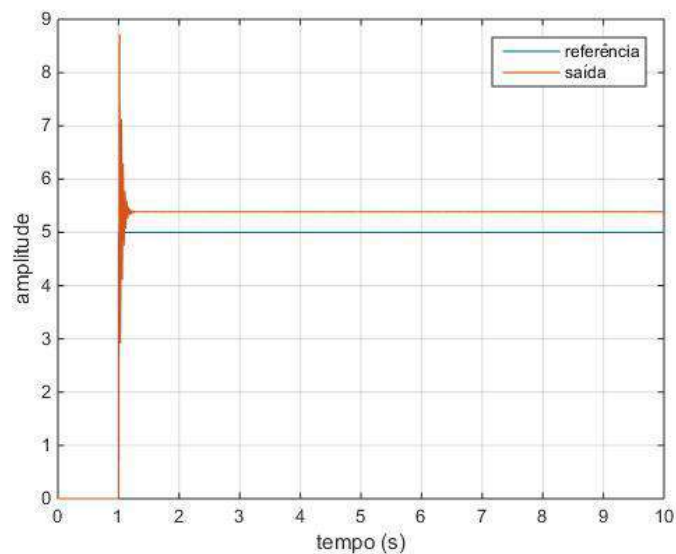


Figura 3.11. Simulação da resposta em degrau para o sistema de controle.

A rotina completa de controle que foi implementada no microcontrolador ATMEGA 328P para um período de amostragem igual a 212 μ s pode ser encontrada no Anexo II.

3.5. Placa de Circuito Eletrônico

3.5.1. Circuito Eletrônico do Protótipo Funcional

Conforme visto nos itens anteriores, o circuito eletrônico básico deste sistema de levitação eletromagnética compreende os circuitos de controle e de potência formados, respectivamente, pelos circuitos lógicos de acionamento do circuito de potência e pelo circuito de acionamento do eletroímã. O circuito de alimentação deste sistema é provido por uma fonte de alimentação externa comercial padrão de 12 Vcc.

A Figura 3.12 apresenta o circuito eletrônico presente no protótipo funcional. Ele é dotado de uma placa *Arduino UNO* atuando como o circuito de controle, uma placa de circuito impresso (PCI) com um circuito de eletrônica de potência, que controla a tensão aplicada sobre o eletroímã, uma PCI com circuito de condicionamento de sinais, que alteram a tensão para o nível lógico de +5 V necessários para o funcionamento dos circuitos de controle e do sensor por efeito Hall, além de duas chaves do tipo *On/Off* que controlam se o circuito de potência ou de controle, respectivamente, estão operando. A partir dele, é possível observar a ausência de uma robustez, flexibilidade e confiabilidade necessários para um circuito eletrônico em um produto comercial.

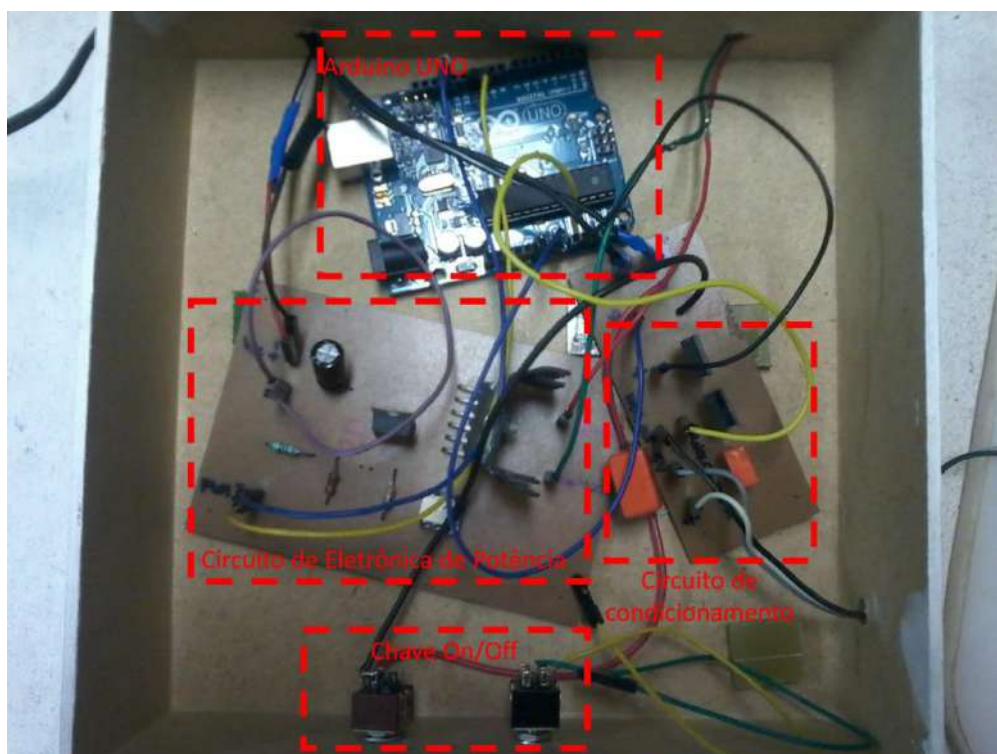


Figura 3.12. Circuito eletrônico do protótipo funcional.

A Figura 3.13 apresenta as conexões elétricas do circuito eletrônico existente no protótipo funcional. É possível notar a presença de duas fontes de alimentação: uma fonte de tensão CC externa de +15 V e uma bateria de 9 V, sendo esta última substituída por uma outra fonte de tensão CC externa de +9 V na configuração atual, que controlam, respectivamente, o circuito de potência e o de controle.

Esta disposição é incompatível com o que se espera em um produto comercial, uma vez que o usuário deseja dispor apenas de uma tomada para conectar a fonte de alimentação para que este cumpra a função desejada. Sendo assim, o projeto do novo circuito eletrônico deve levar em consideração a utilização de somente uma fonte de alimentação para todo o circuito.

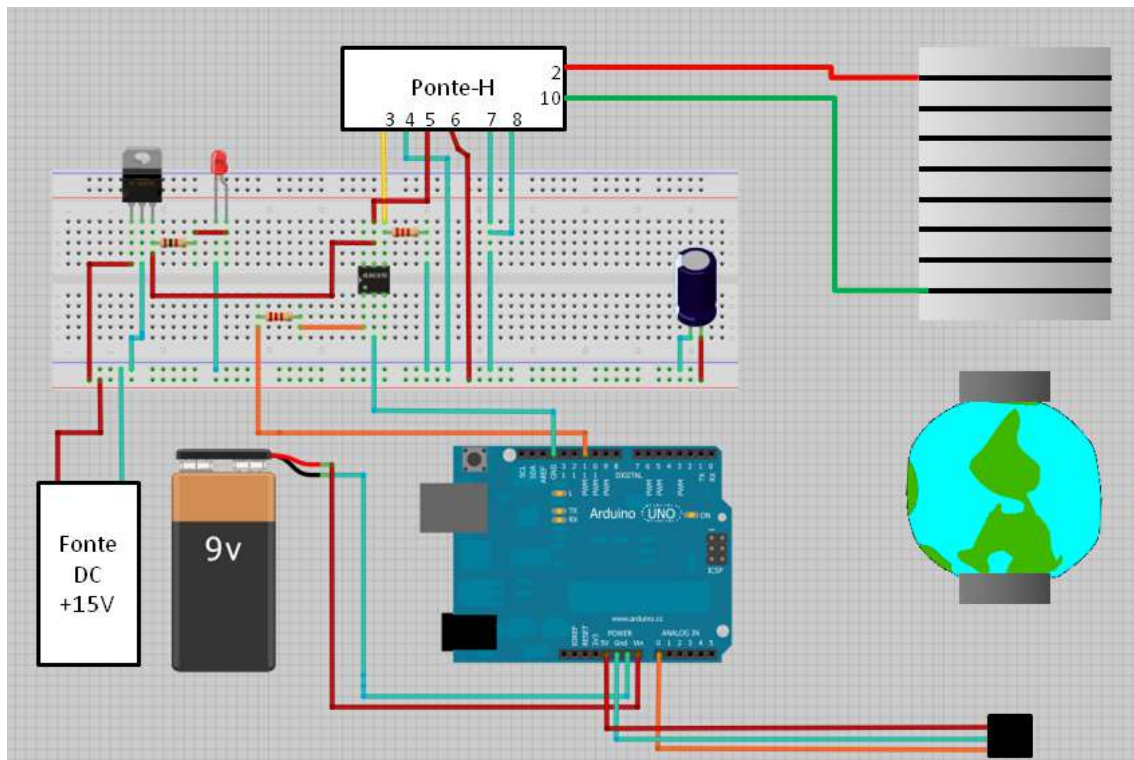


Figura 3.13. Diagrama de conexões elétricas do circuito eletrônico do protótipo funcional.

(Fonte: ENDALÉCIO [11])

Um outro elemento é a placa de controle *Arduino UNO* dedicada para realizar o controle digital do sistema de levitação, através da execução de um código implementado via *software*. Embora a presença física desta placa indique um grau de confiabilidade para o circuito eletrônico, ela gera dois inconvenientes para a produção em série de um produto comercial. O preço da placa de controle é proibitivo ao se desejar incorporá-lo em um sistema de levitação de baixo custo e acaba por se tornar um desperdício em função da utilização de apenas alguns recursos que dispõe. Além disso, as dimensões de seu *hardware* impedem a existência de um circuito eletrônico

compacto que permita que a estrutura do sistema de levitação tenha um aspecto visual desejável.

Desta forma, a solução para corrigir estes problemas é a utilização apenas dos componentes estritamente necessários da placa de controle *Arduino* no circuito eletrônico. Assim, o microcontrolador presente no *Arduino UNO*, *ATMEGA 328* e componentes auxiliares, como resistores, capacitores e cristal oscilador, seriam suficientes para desempenhar a mesma função que toda a placa de controle, apresentando a vantagem de uma drástica redução no custo e de tamanho, sem prejuízo para a confiabilidade do sistema. O Anexo III apresenta o circuito esquemático do *Arduino UNO* em que se pode observar todos os elementos necessários para o funcionamento do circuito de controle proposto.

Assim, os desafios técnicos que este projeto pretende superar se resumem às modificações necessárias para se passar do protótipo operacional para o produto comercial. Em relação ao circuito eletrônico pode-se definir os requisitos dispostos abaixo:

- a) A placa de *Arduino* pode ser substituída por um circuito de controle equivalente que mantenha a operação, sem perda de qualidade do funcionamento do sistema, reduzindo custos, utilizando apenas o seu microcontrolador *ATMEGA* e circuitos auxiliares;
- b) Redimensionamento do circuito eletrônico de controle e de potência. Redefinição do layout do circuito, de forma a dispô-lo em uma única placa de circuito impresso compacta, para ser inserida no interior da base do produto;
- c) Utilização de apenas uma fonte de alimentação para todos os circuitos contidos na placa de circuito impresso;
- d) Inserir a possibilidade de o usuário variar a altura de levitação do globo, através de um potenciômetro, o que não estava contemplado no TCC anterior;

3.5.2. Projeto do *Layout* da Placa de Circuito Impresso do Produto

Para realizar o projeto da nova placa de circuito impresso de forma profissional deve-se utilizar uma ferramenta computacional que auxilie nesta tarefa. Atualmente, existem vários *softwares* dotados destas funcionalidades, com suas vantagens e desvantagens. Dentre as ferramentas mais famosas pode-se citar: *Altium*, *EAGLE*, *KI CAD*, *Orcad* e *Zenit PCB*.

Para a realização deste projeto optou-se pelo *software EAGLE*, em função deste apresentar uma interface extremamente simples, funcional e amigável, possuir uma grande biblioteca de componentes eletrônicos, capacidade de gerar automaticamente

as trilhas da placa de circuito impresso e uma versão gratuita que atende plenamente aos requisitos do projeto.

A Figura 3.14 apresenta o circuito eletrônico básico da placa de circuito impresso elaborado com o auxílio do *software* EAGLE segmentada em dez itens, que serão detalhados a seguir. O item 1 corresponde ao conector do tipo “Power Jack” responsável por receber a alimentação de +12 V fornecida por uma fonte externa, de forma a alimentar todo o circuito eletrônico da placa. O item 2 é um conector de duas vias que conecta cabos a uma chave interruptora inserida na estrutura mecânica do produto de modo a ligar ou desligar o circuito eletrônico de acordo com o desejo do usuário. O item 3 é um circuito condicionador de sinais formado pelo CI LM7805 responsável por produzir uma tensão controlada de +5 V necessária para os circuitos lógicos de controle.

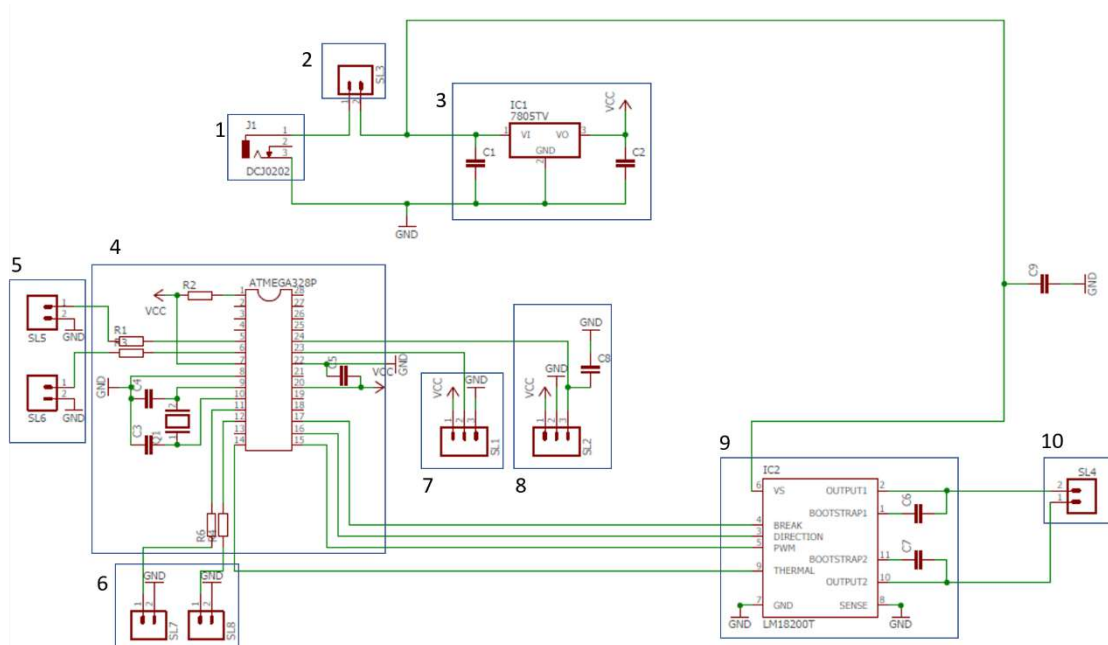


Figura 3.14. Circuito esquemático do circuito eletrônico básico do produto comercial.

O item 4 é o circuito de controle do *hardware* do sistema de levitação magnética. Ele é composto pelo microcontrolador *ATMEGA 328P*, um cristal oscilador necessário para o seu sinal de *clock* e elementos adicionais, como capacitores e resistores. O microcontrolador recebe o nível de tensão gerado pelo sensor de efeito Hall, que corresponde à posição do objeto, e o valor da tensão em um potenciômetro, que corresponde a um valor desejado pelo usuário para variar a posição do objeto. Além disso, o microcontrolador é capaz de produzir um nível de tensão variável que altera a intensidade e a cor das luzes produzidas por quatro LEDs que estão dispostos na estrutura mecânica do sistema, produzindo um efeito visual. Por fim, o microcontrolador, de acordo com os dados recebidos do sensor por efeito Hall e de seu código de controle programado via *software*, envia um sinal de controle em nível

lógico para o circuito de eletrônica de potência, de forma a alterar o ciclo de trabalho do sinal PWM.

Os itens 5 e 6 correspondem aos conectores que ligam o circuito eletrônico aos quatro LEDs fixados na estrutura mecânica. O item 7 é o conector que envia os sinais necessários ao funcionamento do sensor por efeito Hall - posicionado o mais próximo possível da extremidade interna da estrutura mecânica - e recebe o nível de tensão correspondente à posição do objeto. O item 8 é o conector que recebe o sinal de tensão produzido pelo potenciômetro, que controla a posição do objeto de acordo com o desejo do usuário.

O item 9 representa o circuito de eletrônica de potência, formado pelo CI LMD18201. Este componente é dotado de uma ponte H completa, formada por quatro MOSFETS com diodos antiparalelos, além de elementos adicionais como um sistema de proteção contra sobreaquecimento, que desliga o CI quando este atinge uma determinada temperatura interna.

O item 10 representa o conector que envia o nível de tensão produzido pelo CI LMD18201, correspondente ao sinal PWM do circuito de controle, para o eletroímã inserido na parte superior da estrutura mecânica.

O Anexo IV apresenta uma tabela com todos os componentes eletrônicos utilizados neste circuito e os seus custos unitários de venda, que foram estimados com base nos valores encontrados em lojas brasileiras de varejo especializadas na comercialização destes componentes.

Com base no circuito esquemático do circuito eletrônico básico do sistema de levitação magnética pode-se definir o *layout* da placa de circuito impresso formado pelo caminho de suas trilhas. O *software EAGLE* foi utilizado para desempenhar esta tarefa por apresentar a função “*Auto router*”, que realiza de forma quase automática o *layout* das trilhas da placa de circuito impresso, respeitando determinadas restrições definidas pelo usuário, como o ângulo máximo permitido para as curvas das trilhas, a sua largura máxima e mínima, além do espaçamento mínimo entre elas e os terminais dos componentes. Na situação em que esta ferramenta não consegue realizar todo o caminho das trilhas, o usuário deve terminar o *layout* de forma manual.

Assim, empregando-se esta função, foi obtido o *layout* da placa de circuito impresso ilustrado na Figura 3.15. Esta placa é formada por duas vias, com uma camada superior e inferior representadas, respectivamente, nas cores azul e vermelho e apresenta dimensões 50x100 mm, demonstrando que o circuito básico do sistema pode ser produzido em larga escala em uma PCI compacta e simples.

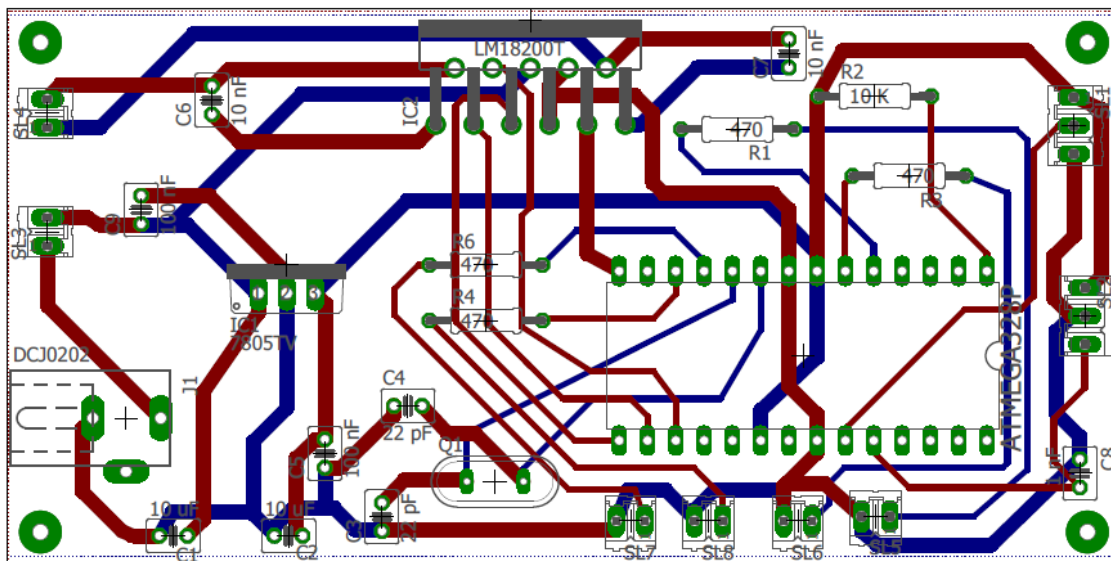


Figura 3.15. Layout da placa de circuito impresso do circuito eletrônico básico do produto comercial.

3.6. Conclusão

Este capítulo apresentou o protótipo funcional construído e as etapas necessárias para sua transformação em um produto de baixo custo, considerando-se as restrições de ordem técnica e comercial.

Em seguida, foram descritos o processo de escolha e o projeto dos elementos que o compõem, como o sensor, o controlador e os circuitos eletrônicos de potência e de controle fabricados em uma placa de circuito impresso compacta e confiável.

Foi possível verificar que o sistema de levitação eletromagnética empregando ímãs permanentes possui um sistema de sensoriamento de baixo custo, quando comparado com sistemas de levitação eletromagnética tradicionais e em função da utilização de apenas um sensor de posição por efeito Hall que dispensa um sensor de corrente, uma vez que é imposta tensão ao invés de corrente no eletroímã. Este fator auxilia o protótipo a se tornar um produto viável e competitivo para ser inserido no mercado de eletrônica de consumo.

O próximo capítulo abordará a análise de mercado para diferentes setores em que um produto baseado em levitação magnética pode ser aproveitado, agregando ainda etapas de desenvolvimento do produto com foco no *design* e funcionalidade para o segmento de decoração e iluminação.

4. Análise de Mercado

4.1. Introdução

Nos últimos anos, as tecnologias de alto valor agregado deixaram de estar restritas ao universo da indústria, das máquinas e ferramentas para alcançar o mercado de bens de consumo de pessoas comuns, muitas sem conhecimento especializado, dispostas a ter no seu dia-a-dia produtos que integram a tecnologia e a praticidade à serviço da melhoria da qualidade de vida, do lazer e dos recursos dispensados para realizar uma tarefa.

Grandes exemplos de sucesso do setor de eletrônica de consumo são os *smartphones*, os *notebooks*, *tablets* e leitores de livros (*e-readers*), além da área de aplicativos para os mais diferentes propósitos com inovações que chegam ao mercado com diversas funções, como lazer e entretenimento, organização, saúde, mobilidade e acessibilidade.

A tecnologia aplicada no desenvolvimento de um produto que utiliza a levitação magnética é chamada de mecatrônica por unir conhecimentos multidisciplinares, como eletrônica, mecânica, computação. Esta característica não é restrita à ela, estando presente também em diversas áreas, como aeromodelismo, na construção de quadricópteros e *drones* [56], aplicações relacionadas à robótica [57], carros de corrida, nautimodelismo e ferromodelismo, tornando-se produtos de alto valor agregado que podem ser utilizados como ferramentas de aprendizagem, incentivar habilidades manuais e técnicas, servir como objetos de *design* e decoração, além de ser sonho de consumo de entusiastas de tecnologia e de colecionadores [58 – 61].

Um produto ou processo tecnológico (TPP) inovador que trabalha com o conceito da levitação apresenta um grande potencial de mercado em diversos segmentos: soluções industriais, de *design*, decoração e iluminação, brinquedos, lazer e entretenimento, além do setor de educação e de ciência, tecnologia e inovação (CTI).

Este capítulo apresentará o processo de análise de mercado elaborada para um produto baseado em levitação magnética inserido no segmento de bens de consumo eletrônicos. Inicialmente, serão apresentados os produtos que utilizam a levitação magnética já existentes neste mercado e os seus setores onde estão inseridos.

A partir destes dados, será demonstrado o processo de concepção de um produto baseado em levitação magnética para o setor de decoração empregando a metodologia do *Design Thinking* e a análise de negócio tradicional, através da matriz SWOT.

4.2. Produtos Baseados em Levitação Magnética e o Segmento de Eletrônica de Consumo

Além das consagradas aplicações da levitação magnética nos transportes, com os trens MAGLEV, e na indústria, com os mancais magnéticos, estão surgindo novos setores onde esta tecnologia pode ser empregada, como nos bens de consumo eletrônicos. Esta seção apresentará os produtos de levitação magnética já existentes neste segmento para os setores de decoração, *design* e iluminação, de consumo mecatrônico e de entretenimento, e de ensino e aprendizagem e incluirá uma breve descrição de mercado de cada um deles.

4.2.1. Produtos de decoração, *design* e iluminação

É notória a importância dispensada por arquitetos e designers pela inovação e por uma composição harmonizada entre produto e ambiente. Ambientes de trabalho criativos apresentam uma grande oportunidade para produtos de levitação magnética, devido ao aspecto estético e inovador. A decoração de lojas e de apresentação de produtos também compõem um nicho de mercado importante, por incluir um comportamento futurista e surpreendente para os clientes. Outra importante área deste segmento é a de objetos de decoração fornecidos como *souvenirs* ou presentes para serem expostos em escritórios ou em casa. Em todos estes, é fundamental que o *design* do produto seja atraente, integrando o fascínio do fenômeno da levitação com uma bela estrutura.

A empresa holandesa *Elivatix* [8] desenvolveu o produto *Lunaluxx*, que se baseia no princípio de levitação eletromagnética com ímãs permanentes para fins de iluminação. Nele, um eletroímã atrai um pequeno ímã permanente, ao qual está associado uma fina película de fósforo, que absorve a luz azul emitida por um LED e reflete a luz branca em todas as direções.

Um sistema semelhante foi elaborado na luminária italiana *Levia* [62], em que uma lâmpada de filamentos de LED flutua abaixo do eletroímã energizada via indução eletromagnética e que apresenta um mecanismo que previne a queda dela quando a energia é desligada.

Este método é explorado também na flutuação de globos terrestres de tipos variados, porta-retratos, diversas figuras decorativas, brinquedos e *displays* para divulgação de produtos em pontos de vendas, estando hoje bastante difundido [63 – 66].

Esta técnica de levitação eletromagnética, no entanto, apresenta alguns inconvenientes para as aplicações do setor de consumo e entretenimento. Ao exigir a

utilização de um eletroímã na parte superior atraindo um objeto, estes produtos restringem as dimensões do objeto suspenso, o que limita o efeito visual. Para contornar este inconveniente, uma nova configuração para este tipo de suspensão foi concebida.

Neste novo conceito, um objeto atrelado à um ímã permanente flutua sobre uma base na qual estão presentes um arranjo de ímãs e eletroímãs. A geometria e a polaridade dos ímãs apresentam uma interação repulsiva entre eles, o que provoca instabilidade lateral. Para mantê-lo posicionado sob a região central da base, quatro eletroímãs são utilizados, produzindo correntes de controle, com base nos valores registrados por sensores de posição de efeito Hall [67, 68].

Apesar de apresentar uma configuração mais complexa do que a anterior, ela apresenta como característica principal um maior *gap* de levitação, da ordem de centímetros, o que permite ampliar a faixa de operação e obter um aspecto visual mais impactante e suportar objetos mais pesados para dimensões equivalentes. Além disso, ela possui uma estabilidade lateral maior, embora haja maior dificuldade de posicionamento do objeto.

A utilização deste novo princípio foi adotada na produção de obras de arte em um museu na Suécia [69] e tem sido divulgada com sucesso através da empresa holandesa *Crealev* [7], que emprega esta tecnologia em *design* de interiores com luminárias e abajures no apelo visual e estético em ensaios fotográficos, e na publicidade de produtos, como tênis e telefones celulares, em pontos de venda [70].

O estúdio de *design* tcheco *Kibardindesign* apresentou, em 2013, o modelo de um *mouse* sem fio flutuando sob esta mesma técnica, proporcionando um uso ergonômico e evitando o desgaste muscular [71].

A flutuação de objetos diversos, como globos terrestres, luminárias, brinquedos, brindes, elementos decorativos e plantas ornamentais, como o *Air Bonsai*, da japonesa *Hoshinchi* [72], também é encontrada em uma grande variedade de modelos e fabricantes [73, 74]. O projeto *Levymoon* produziu a flutuação de um globo representando a estética lunar com iluminação *wireless* [75].

A empresa chinesa *Ynyee Tech* também desenvolveu muitas das inovações anteriores e incluiu entre elas, a levitação de uma lâmpada incandescente que permanece acesa enquanto flutua por conta da tecnologia de indução eletromagnética que está inserida em sua base [76]. Este produto recebeu prêmios de *design* e está ilustrado na Figura 4.1.

A presente proposta é diferenciada destas por apresentar a possibilidade de ajuste da posição do objeto de acordo com o desejo do usuário, a maior facilidade de fazer o objeto flutuar, e possuir tecnologia nacional.



Figura 4.1. Lâmpada Flutuante.
(Imagem cedida por Chuyao Peng)

4.2.2. Produtos de consumo mecatrônicos e de entretenimento

O mercado de produtos tecnológicos aplicados ao consumo apresenta um comportamento crescente ano a ano. As perspectivas para o crescimento das vendas de brinquedos conhecidos como STEAM (*Science, Technology, Engineering, Arts and Math*) são promissoras. Em 2013, 3% dos brinquedos vendidos no mundo possuíam tal característica, com um crescimento em torno de 6% em comparação com 2010, com a expectativa dos mercados brasileiro e chinês liderando o crescimento da demanda [77 – 80].

No momento, não existem concorrentes diretos nesta área de aplicação da levitação. Este segmento é atualmente restrito aos produtos tecnológicos destinados a entusiastas de tecnologia, que estão interessados no conhecimento e na possibilidade de modificação/fabricação de protótipos, conforme demonstra o conceito *maker*, como os quadricópteros, drones, robôs e circuitos eletrônicos.

Existem produtos que utilizam a levitação como princípio, mas não podem ser considerados concorrentes, por apresentarem funcionalidades e interação distintas da pretendida e são exploradas em *kits* comerciais. O “*Revolution*” baseia-se na força de repulsão entre grupos de ímãs permanentes posicionados na base e no objeto [81]. Esta força de repulsão é capaz de suspender o objeto equilibrando o seu próprio peso, porém de maneira instável. Uma película de vidro colocada na lateral da base

restringe o movimento horizontal do objeto em uma direção paralela à base, permitindo a estabilidade nos demais cinco graus de liberdade. O contato entre a película e o objeto é feito por uma fina ponta metálica, reduzindo o atrito e mantendo-o girando por um longo tempo.

A repulsão de ímãs permanentes também é utilizada como princípio no *Levitron*[®] que consiste em uma base com ímãs permanentes com orientação vertical, e com geometria retangular ou cilíndrica, além de um pequeno ímã, de orientação magnética oposta à base, que é posicionado e rotacionado a uma certa altura [82].

A levitação utilizando materiais diamagnéticos também encontra espaço em aplicações comerciais envolvendo *kits* de demonstração. Nestes arranjos, eletroímãs ou ímãs permanentes produzem campos magnéticos intensos de modo a atrair um outro ímã permanente, com pelo menos um grau de liberdade instável [83, 84].

Este mercado tem um grande potencial de inserção de produtos que utilizam a levitação magnética. Tais produtos podem ser adquiridos por um preço de mercado competitivo com similares, com a possibilidade de diversificação (customização) como, por exemplo, escolha do material que compõe a estrutura, de cores geradas por um LED durante o funcionamento, possibilidade de interação via aplicativo de *smartphones*, modificação do objeto a ser flutuado, alteração do controle e da eletrônica envolvida, dando ao usuário mais liberdade.

Nos últimos anos, a técnica de levitação eletromagnética de ímãs permanentes através do novo conceito apresentado na seção anterior, foi aplicada em bens de consumo eletrônicos, como em caixas de som que flutuam e emitem som em 360 graus, controlados via um *smartphone* por conexão *bluetooth*. O ímã permanente do objeto apresenta a dupla função de produzir a flutuação e servir como dispositivo de conversão eletromecânica de energia para gerar o som. Atualmente, uma dezena de projetos ao redor do mundo estão em desenvolvimento, apresentando *designs* e funcionalidades diferentes [85, 86].

Nesta tecnologia se destacam os produtos de áudio PJ9 da sul-coreana LG [87], com autonomia de 10 horas de duração e a caixa de som com *design* futurista *Mars*, da *crazybaby* [9], vista na Figura 4.2, tendo sido premiada como a melhor inovação tecnológica em áudio na feira tecnológica *Consumer Electronics Show (CES) 2017*, em Las Vegas (EUA).

Além dela, outro alto falante flutuante, o *Air²* [88], conquistou o mesmo prêmio em 2015. O projeto *Mars* arrecadou US\$ 828.054 em sua campanha de financiamento coletivo, enquanto o *OM/ONE* [89] conquistou US\$ 740.096 com uma proposta semelhante.

O projeto *Moon* [90], da *1-Ring*, propôs aplicar a mesma técnica para auxiliar as atividades domésticas de casas inteligentes e atuar como uma câmera de vigilância ou para comunicações de videoconferência com visão de 360 graus e arrecadou US\$ 540.248 via *crowdfunding*.



Figura 4.2. Alto falante *Mars*.
(Imagens cedidas por cortesia pela *crazybaby, Inc.*)

Além de aplicações de áudio e vídeo, a levitação magnética também tem sido empregada no entretenimento através dos *hoverboards*. Uma peça publicitária da *Lexus* [91] divulgou uma versão de um *hoverboard*, utilizando supercondutores de alta temperatura crítica, flutuando sobre uma pista de *skate* preenchida com ímãs permanentes, revelando um potencial comercial para a técnica de levitação supercondutora (SML) no setor de consumo e de entretenimento e que atraiu mais de 14 milhões de visualizações. O projeto *Hendo Hoverboard* [92] desenvolveu um *hoverboard* utilizando a técnica de levitação eletrodinâmica (EDL) e arrecadou US\$ 510.590 via financiamento coletivo.

4.2.3. Produtos de ensino e aprendizagem

Atualmente, existem mais de 500 departamentos de engenharia elétrica/eletrônica ou de controle e automação e institutos de física em todo o país. Os produtos de levitação magnética podem ser inseridos em disciplinas, como Eletromagnetismo, Sistemas de Controle, Máquinas Elétricas, Eletrônica de Potência, Microeletrônica e Microprocessadores como uma ferramenta de aprendizado muito eficaz, inseridos como experimentos de laboratório, em cursos de graduação e pós-graduação, aumentando a motivação e o interesse dos alunos. Também podem ser inseridos nos mais de 190 museus dedicados à ciência e tecnologia.

Uma série de empresas apresenta em seu portfólio de equipamentos didáticos, sistemas de levitação de objetos ferromagnéticos (EML) disponibilizados para disciplinas de cursos de engenharia. Entre os seus diferenciais, se destacam a possibilidade de integração com *softwares* como MATLAB e *LabView* para aquisição de dados e realização do método de controle. Entre estes fabricantes, pode-se destacar as britânicas *Feedback Instruments* [10], *Bytronic* [93] e *TecQuipment* [94], a polonesa *INTECO* [95] e a canadense *Quanser* [96].

Por se tratar de um experimento com baixo custo de fabricação, com destaque apenas para um eletroímã e um anel condutor, e não necessitar, a princípio, de nenhum tipo de controle para o seu funcionamento, o experimento de levitação eletrodinâmica (EDL) conhecido como “anel de Thomson” teve seu uso disseminado como ferramenta de ensino e de divulgação científica em universidades e centros de pesquisa ao redor do mundo, destacando-se o trabalho de divulgação realizado, principalmente, pelo Laboratório Didático do Instituto de Física (LADIF) da UFRJ [97] e pelos Institutos de Física da Universidade de Brasília (UnB) [98] e da UNICAMP [99] e nos museus de Ciência e Tecnologia, como no *Palais de la Decouverte* [100], em Paris, e no protótipo elaborado pela Universidade Estadual de Londrina (UEL) [101] para ser adaptado aos museus brasileiros.

Atualmente, algumas empresas fabricantes de produtos educacionais comercializam *kits* didáticos do “anel de Thomson”, que incluem diferentes tipos de dimensões ou de material utilizado para o anel condutor [102 – 104].

4.3. Desenvolvimento do Produto – *Design* e Estratégia

Além do conhecimento técnico que possibilita que uma tecnologia possa ser utilizada em um produto ou serviço, da análise do mercado em que será comercializado e de possíveis concorrentes que possa encontrar, faz-se necessário também conhecer os usuários a que este se destina e as ferramentas e estratégias que aumentem a compreensão tanto do mercado, quanto do consumidor, e possibilitem que o produto ou serviço tenham mais chances de sucesso.

Esta seção apresentará a metodologia de comportamentos de usuários conhecida como *Design Thinking* e como ela foi utilizada para o desenvolvimento do presente produto, além da verificação de oportunidades e ameaças e de pontos fortes e fracos dele através da análise SWOT.

4.3.1. *Design Thinking*

O *design thinking* não possui uma definição formal, mas pode ser entendido como um conjunto de ideias e *insights* utilizados para a resolução de problemas

diversos, através do processo criativo existente no mundo do *design* e sempre com o foco centrado no usuário de determinado produto ou serviço. Para isso, a formulação de soluções é realizada por equipes multidisciplinares, de forma a observar o problema por diferentes perspectivas que se complementam [105, 106].

A Figura 4.3 apresenta um diagrama que sintetiza a proposta do *design thinking*. O processo criativo corresponde a um compromisso entre o desejo dos usuários, ou do que eles necessitam, a praticabilidade técnica ou organizacional disponível para se proporcionar determinada solução e a viabilidade do ponto de vista financeiro, político ou social de se fazer este empreendimento. As soluções para um problema equivalem à interseção de duas ou mais destas três variáveis, enquanto a solução ideal reúne a abordagem de todas as três [106, 107].

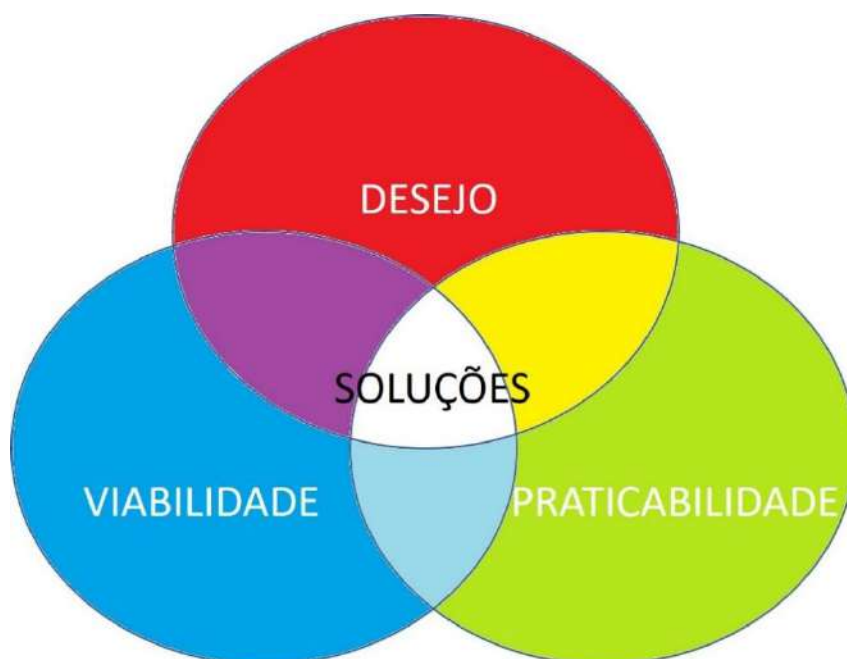


Figura 4.3. Diagrama de conjuntos representando o processo de *Design Thinking*.

Um outro ponto relevante do *design thinking* envolve a prototipagem. Durante todo o processo criativo, são definidos e construídos protótipos para testar variados aspectos importantes no desenvolvimento de um produto ou serviço [108].

O protótipo da função crítica tem o objetivo de avaliar apenas os componentes críticos e significativos para o sistema. Para o problema em questão, pode-se entender que o protótipo da função crítica para o sistema de levitação foi elaborado por ENDALÉCIO [11] e está ilustrado na Figura 4.4. Com ele, foi possível testar a viabilidade e o funcionamento de componentes importantes, como o circuito de eletrônica de potência, o microcontrolador e o sensor por efeito Hall.

O protótipo funcional permite ampliar as verificações obtidas com o protótipo anterior, avaliar melhor a sua funcionalidade e iniciar o projeto de *design*. Neste, todos

os pontos críticos estão reunidos e operando ao mesmo tempo em um ambiente o mais compacto possível, observando-se também a viabilidade de comercialização da solução pretendida. Neste sentido, o protótipo funcional para o sistema de levitação proposto foi elaborado por ENDALÉCIO [11] e foi apresentado na Figura 3.1.

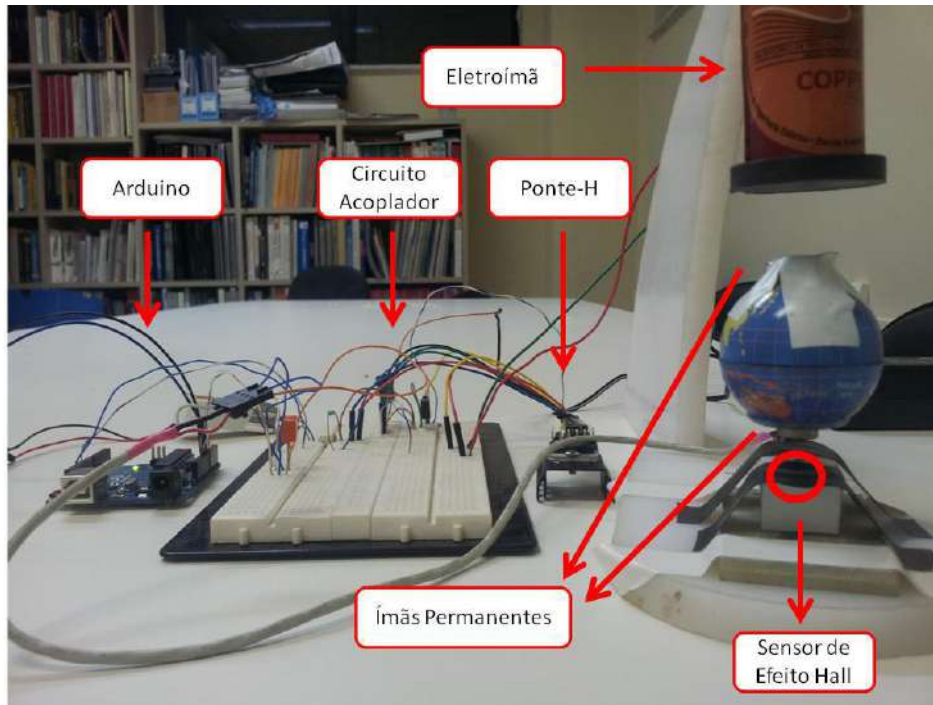


Figura 4.4. Protótipo da função crítica do sistema de levitação eletromagnética.
(Fonte: ENDALÉCIO [11])

Deve-se ressaltar que estes são os protótipos mais importantes na etapa de pré-avaliação da viabilidade e praticabilidade da solução. Em seguida, deve-se testar os protótipos junto aos usuários para verificar futuras adequações do projeto, observação de pontos que não tinham sido levantados, se as suas necessidades foram estabelecidas e a aceitação do modelo pelo consumidor alvo.

Como forma de auxiliar na compreensão dos objetivos do produto e testá-lo com potenciais usuários, foi concebido o protótipo ilustrado na Figura 4.5, conforme elaborado em parceria com o Departamento de Desenho Industrial da EBA/UFRJ. Este foi fabricado através de impressão 3D de alta qualidade com material do tipo ABS de alta resistência.

Antes de se realizar testes com os usuários, o *design thinking* preconiza uma maior aproximação com o comportamento ideal esperado para um usuário como forma de validação de hipóteses para o desenvolvimento do produto. Isto pode ser simbolizado pela criação de uma *persona*, que corresponde a um personagem fictício que representa o seu público alvo. Através desta construção de uma *persona*, pode-se entender melhor o futuro consumidor e estreitar as suas expectativas e desejos reais [106].

Desta forma, as características relevantes da *persona* concebida para o produto baseado em levitação magnética e destinado para o segmento de produtos de decoração é apresentada a seguir:

- Pessoa na faixa dos 30 anos
- Escolaridade alta
- Renda média acima de R\$ 3000 por mês
- Está atualizada sobre as novidades tecnológicas
- Gosta de relaxar em sua casa e decorá-la



Figura 4.5. Protótipo proposto como produto do sistema de levitação eletromagnética.

Com base nestas características, pode-se iniciar uma pesquisa de mercado mais coerente e preparada, destinada a um público bem definido e com o intuito de avaliar a hipótese da *persona* criada. Assim, procedeu-se uma série de entrevistas qualitativas e quantitativas, com aproximadamente 30 pessoas com atributos os mais variados possíveis, como forma de se compreender suas necessidades e demandas. O formulário da entrevista pode ser consultado no Anexo V.

A realização das entrevistas permitiu obter resultados pertinentes, como os destacados a seguir:

- 97% dos entrevistados afirmaram que gostam de decorar sua residência ou escritório;
- 38% dos entrevistados que gostam de decoração adquirem novos itens semestralmente, enquanto 27% anualmente;

- 38% dos entrevistados que gostam de decoração informaram que o gasto médio na aquisição de novos produtos é superior a R\$ 500,00;
- Todos os entrevistados consideraram relevante que o item de decoração tenha utilidade, e 60% julgaram importante ao comprar um produto o conjunto de fatores como sofisticação, tecnologia, utilidade e custo;
- Todos os entrevistados demonstraram interesse em um item de decoração que flutuasse, e 50% dos entrevistados conhecem ou já ouviram falar sobre levitação magnética;
- 50% dos entrevistados acreditam que um produto de decoração com estas características custaria mais de R\$ 1000,00, enquanto 33% acham que o preço seria entre R\$ 600,00 e R\$ 1000,00;
- 83% dos entrevistados afirmaram que comprariam um produto de decoração com estas características por R\$ 200,00;
- As palavras mais utilizadas para descrever um produto de decoração com estas características foram: “incrível”, “surpreendente”, “interessante”, “relaxante”.

A realização das entrevistas permitiu confirmar que a *persona* criada correspondeu corretamente ao comportamento esperado por potenciais usuários. Foi possível observar uma maior propensão ao consumo e valorização de um produto de decoração como o proposto por pessoas que já tinham ouvido falar sobre levitação magnética. O fenômeno da flutuação de um objeto foi associado pela grande maioria dos entrevistados a um produto de tecnologia de alto valor agregado e, por essa razão, foi entendida como um alto preço de comercialização. O protótipo apresentado aos entrevistados encontrou boa aceitação e entendimento.

As entrevistas qualitativas permitiram ressaltar também um desejo de consumo maior por itens de decoração identificados e harmonizados com o local onde seriam utilizados, seja na residência ou no escritório. Desta forma, foram concebidos os designs ilustrados nas Figuras 4.6 e 4.7 que ressaltam as características principais, respectivamente, para uma residência e um escritório. O primeiro apresenta um formato da palavra “CASA”, em inglês, o que remete a um lugar aconchegante, familiar e elegante com aspecto amadeirado, enquanto o segundo possui um formato clássico, sóbrio e sofisticado adequado a um ambiente de trabalho.

Uma observação interessante verificada através das entrevistas foi a relevância dada ao efeito de luzes de diferentes cores iluminando o globo ou objeto que irá levitar, fazendo com que haja uma utilidade e um aumento no valor agregado do produto. Desta forma, a luminoterapia poderia ser explorada, adicionando mais

motivos para que as pessoas adquiram um produto que poderia variar a tonalidade das luzes com um temporizador ou de acordo com a vontade do usuário.



Figura 4.6. *Design* para um produto de decoração residencial baseado na levitação magnética.



Figura 4.7. *Design* para um produto de decoração de escritório baseado na levitação magnética.

Uma outra demanda evidenciada através das entrevistas e da verificação de produtos similares no mercado foi a existência de um nicho para produtos destinados

a um público jovem e conectado com as novas tecnologias. Com estas características, foi criado um *design* que agrega a funcionalidade com a possibilidade de ser automatizado, carregar aparelhos celulares e tocar músicas via conexão *bluetooth*, através do alto falante inserido no globo flutuante, integrando assim tanto o segmento de decoração, quanto de entretenimento. Uma linha para licenciamento de personagens populares apresenta um grande apelo no setor de produtos mecatrônicos e de entretenimento.

4.3.2. Análise SWOT

O conhecimento do cenário externo e interno do mercado e das organizações é fundamental para o sucesso de um novo produto. Uma das ferramentas importantes que auxiliam na compreensão destes ambientes é a análise SWOT e através dela é possível definir um plano estratégico que auxilie na melhoria da organização e no sucesso de seu produto.

A análise SWOT traça um diagnóstico tanto do ambiente interno de uma empresa, representado pela sua capacidade de produção, distribuição e comercialização, planos de *marketing* e os recursos financeiros e humanos disponíveis, quanto do ambiente externo, relacionado aos consumidores e clientes, aos canais de distribuição, fornecedores, concorrentes e fatores políticos/regulatórios, econômicos, socioculturais, tecnológicos e ambientais (PESTE) e complementa com a verificação de pontos fortes e fracos da organização e as oportunidades e ameaças identificadas no mercado.

Além disso, permite observar oportunidades de alavancagem da empresa através da associação dos pontos fortes com as oportunidades, problemas através da relação entre pontos fracos e ameaças, vulnerabilidades pela relação entre pontos fortes e ameaças, e restrições ao crescimento com a associação entre os pontos fracos e as oportunidades. Assim, o comportamento desejado pela empresa é a conversão dos pontos fracos em fortes e das ameaças em oportunidades, além de associar os pontos fortes às oportunidades apresentadas.

A verificação da existência de muitos pontos fortes e poucos pontos fracos e de mais oportunidades que ameaças é um indicativo de que a empresa possui ampla possibilidade de crescimento. Por outro lado, se ela possui muitas ameaças e pontos fracos e poucos pontos fortes e oportunidades, existe uma sinalização para a sua reestruturação de negócio [109, 110].

Com base nestas informações, pode-se elaborar uma matriz SWOT para uma empresa nascente (*startup*) de base tecnológica que fabrica produtos de levitação

magnética destinados ao setor de decoração. O resultado dos pontos fortes e fracos, e das oportunidades e ameaças desta empresa pode ser sintetizado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Matriz SWOT para uma *startup* no setor de decoração.

	FORÇAS	FRAQUEZAS
AMBIENTE INTERNO	<ul style="list-style-type: none"> • Conhecimento técnico alto e forte P&D • RH qualificado • Empresa enxuta (<i>lean startup</i>) • Localização privilegiada para o mercado brasileiro 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Know-how</i> dos processos de fabricação e comercialização insuficientes • Baixo conhecimento e interlocução com canais de distribuição e vendas • Mão de obra e infraestrutura limitada • Capacidade de produção insuficiente • Dificuldade de renovação de novos <i>designs</i> de produtos • Empresa sem reputação no mercado
AMBIENTE EXTERNO	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
	<ul style="list-style-type: none"> • Grande tendência de consumo de itens de decoração tecnológicos • Inexistência de empresas concorrentes produzindo no Brasil • Baixo custo dos componentes eletrônicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependência elevada de fornecedores de componentes eletrônicos, PCIs, peças mecânicas e de <i>design</i> no mercado interno • Volatilidade do câmbio afeta a compra de componentes eletrônicos importados • Concorrentes com elevada competitividade • Dificuldade na concessão de patentes

Pela Tabela 4.1, pode-se identificar que os pontos fortes principais são o alto conhecimento técnico envolvido na elaboração de produtos mecatrônicos e a experiência na atuação de projetos de pesquisa e desenvolvimento, o que produziu a formação de recursos humanos qualificados, como mestres e doutores. Além disso, por ser considerada uma empresa nascente, ela teria uma estrutura enxuta, o que reduz custos e dá mais agilidade no processo de desenvolvimento de produtos. Além disso, ela apresentaria uma localização privilegiada para atender o mercado brasileiro, o que resulta em uma vantagem competitiva sobre seus concorrentes.

As suas principais fraquezas são a falta de *know-how* sobre os processos de fabricação e comercialização de produtos que demandariam em custo e tempo maiores para apresentar inovações ao mercado. Este inconveniente se verifica na falta de conhecimento e interlocução iniciais com canais de distribuição e de vendas, aumentando o poder de barganha destes setores. A estrutura enxuta de uma *startup* provoca efeitos adversos como mão de obra e infraestrutura limitada, o que sobrecarrega e demanda mais tempo para operações como produção e vendas e reduz a quantidade de estoque disponível e pode gerar problemas como uma capacidade de produção insuficiente para atender o mercado e a dificuldade na

renovação de novos *designs* para linhas de produtos, reduzindo atratividade e ganhos comerciais. Inclui-se também a falta de reputação no mercado como um problema para conquistar confiança de canais de vendas e clientes.

As maiores oportunidades encontradas foram a grande tendência na aquisição de itens de decoração de base tecnológicas, conforme verificado na etapa de desenvolvimento do produto, a inexistência de empresas que fabriquem produtos semelhantes no Brasil, o que aumenta o potencial competitivo da *startup* e agrega valor ao investir no setor tecnológico e industrial brasileiros, além do baixo custo dos componentes eletrônicos que o compõem, o que permite a produção a um custo reduzido.

As maiores ameaças visualizadas foram a excessiva dependência de fornecedores de todos os componentes do produto, incluindo a produção de *design*, o que aumentaria os custos e o poder de barganha dos mesmos. A volatilidade do câmbio é um risco que pode afetar o custo dos componentes eletrônicos importados e reduzir a competitividade frente aos concorrentes já estabelecidos. Além disso, a dificuldade na concessão de patentes é encarada como um entrave na proteção intelectual e abre margem para pagamentos de *royalties* a terceiros.

Como forma de se maximizar os pontos fortes e as oportunidades e minimizar os efeitos dos pontos fracos e ameaças, e converter estes últimos nos primeiros, pode-se estabelecer um plano de ação para auxiliar a tomada de decisão que contenha as seguintes recomendações:

- Estabelecimento de parcerias com empresas que fabricam itens semelhantes e possuem *know-how* maior, mas conhecimento técnico inferior, de forma a complementar uns aos outros e melhorar a capacidade de produção;
- Contratação de uma equipe de *design* própria para renovação da linha de produtos, o que elimina a dependência externa e reduz custos;
- Aprimorar o conhecimento e *networking* na área de canais de distribuição e de vendas estabelecendo parcerias entre a empresa e o vendedor, estimulando uma relação de confiança com o único produto fabricado no Brasil. Formular a possibilidade de efetuar vendas diretas através do *e-commerce*;
- A compra em grandes quantidades de componentes eletrônicos pode atenuar o efeito da elevação do câmbio.

4.4. Conclusão

Este capítulo realizou uma análise de mercado para o sistema de levitação magnética proposto. Foram apresentados os produtos baseados na tecnologia de levitação magnética que são comercializados para três segmentos distintos:

decoração, *design* e iluminação; eletrônica de consumo de produtos mecatrônicos e de entretenimento; e ensino e aprendizagem. Destacou-se a popularidade alcançada por vários destes produtos e o número crescente de inovações nesta área. Foi feita também uma breve análise do cenário recente do mercado para estes três segmentos, identificando potenciais usuários e tendências que poderiam ser exploradas por produtos com esta tecnologia.

Em seguida, passou-se para a etapa de desenvolvimento de produto com foco no *design* e nas ferramentas de estratégia de mercado. Foi concebido um protótipo destinado para o setor de decoração, *design* e iluminação e aplicada a metodologia do *design thinking* como forma de conceber novos produtos com base nas necessidades e desejos dos usuários.

As entrevistas demonstraram o interesse da ampla maioria dos consumidores por itens de decoração para residências ou escritório, além de um potencial para o setor de entretenimento agregando *design* e funcionalidade. Por fim, foi utilizada a análise SWOT para a identificação dos pontos fortes e fracos, e das oportunidades e ameaças para uma empresa de produtos de levitação magnética baseadas neste segmento.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou o processo de transformação de um experimento de levitação magnética em um produto comercial. A sua principal motivação se baseou na dificuldade do ambiente acadêmico em transformar conhecimento ou inovação em valor para a sociedade, em contraposição ao caminho natural que transforma investimento financeiro em conhecimento. Foi evidenciado como o aprimoramento de pesquisas científicas pode proporcionar resultados significativos e se tornar inclusive uma solução comercial.

O capítulo 1 apresentou a grande *expertise* do LASUP nos projetos envolvendo sistemas de levitação eletromagnética com uma variedade de princípios de funcionamento e de utilização de atuadores, sensores e controladores em diversos experimentos, que terminavam sendo descartados. Desta forma, faltava acrescentar uma etapa posterior aos projetos que os tornassem fáceis de serem replicados e utilizados por não especialistas.

Este trabalho teve como objetivo preencher esta lacuna e determinar os passos necessários para transformar um sistema de levitação eletromagnética em um produto, tanto do ponto de vista técnico quanto comercial.

O capítulo 2 apresentou a análise matemática e a modelagem do sistema de levitação eletromagnética tradicional e daquele envolvendo ímãs permanentes, ressaltando as particularidades de cada um deles. Demonstrou-se que o sistema de levitação eletromagnética com ímãs permanentes que utiliza sensoriamento por efeito Hall tem como principal vantagem o seu baixo custo. Ao empregar controle por imposição de tensão, foi possível dispensar o sensor de corrente e sua malha de controle, permitindo reduzir o investimento no produto final.

O capítulo 3 descreveu o projeto e o processo de escolha de todos os elementos do sistema de levitação, como o atuador, sensor e controlador, e como eles estavam sujeitos às restrições de ordem técnica e estéticas compatíveis com um produto. Foi apresentado o protótipo funcional elaborado por ENDALÉCIO [11] e o projeto de *design* para o produto, que foi elaborado em parceria com a EBA/UFRJ, demonstrando o compromisso de se proporcionar um produto esteticamente atraente e de boa qualidade técnica.

A utilização de apenas um sensor de posição de efeito Hall provocou uma redução significativa de custo dos componentes eletrônicos, quando comparado com experimentos anteriores, o que torna possível a sua comercialização com preço acessível e compatível com produtos semelhantes.

O capítulo 4 apresentou uma análise de mercado para produtos baseados em levitação magnética no segmento de eletrônica de consumo. Para isso, foram descritos todos os produtos com esta tecnologia já comercializados e um retrato dos setores de decoração, de entretenimento e de educação e as suas perspectivas comerciais.

Foi ressaltada a importância da aplicação da metodologia do *design thinking* no entendimento das necessidades dos usuários e consumidores, o que aumenta o valor agregado e potencializa as possibilidades de sucesso do produto. Como resultado deste estudo, pode-se conceber novos *designs* e funcionalidades destinados para públicos e locais específicos, como itens de decoração para residências ou escritórios, por exemplo, demonstrando uma demanda crescente por itens de decoração tecnológicos.

O estudo foi complementado com uma análise estratégica de negócio para uma empresa fabricante de produtos tecnológicos destinados ao setor de decoração. A análise SWOT evidenciou os pontos fortes e fracos, além das oportunidades e ameaças encontradas por uma empresa nascente que planeja atuar neste segmento. As principais vantagens competitivas são a facilidade de acesso ao mercado brasileiro e o baixo custo do sistema eletrônico. O plano de ação destinado a minimizar os riscos e maximizar as oportunidades evidenciou a formação de parcerias profícuas com fabricantes de produtos semelhantes como forma de complementar a formação comercial e aprender com o *know-how* adquirido por elas.

A natureza mecatrônica deste produto demonstrou a importância de se integrar conhecimentos multidisciplinares das áreas de Eletromagnetismo, Sistemas de Controle, Eletrônica de Potência, Sensoriamento e Instrumentação, Programação de Microcontroladores, Simulação Computacional, Microeletrônica, Mecânica e *Design* de Produto. Além disso, a análise comercial demandou o conhecimento de ferramentas de gestão, economia, *marketing*, vendas e de psicologia do consumo para que o mesmo tenha sucesso no mercado.

Este trabalho apresentou todas as etapas mais relevantes para a transformação de um projeto acadêmico em um produto, como a importância do projeto adequado dos componentes eletrônicos para melhorar a sua confiabilidade e eficiência, a preocupação estética do *design* e o estudo de mercado orientado para um segmento específico, como o setor de decoração e iluminação.

Neste sentido, o trabalho contribuiu para a formação de um mínimo produto viável (MVP) que possa ser atrativo o suficiente para proporcionar um maior entendimento sobre as possibilidades comerciais e receber *feedback* de potenciais usuários.

Desta forma, o produto não pode ser entendido como finalizado, mas como mais uma etapa no processo de aprendizagem da inovação e do desenvolvimento de um produto, sendo necessários trabalhos futuros que proporcionem o aprimoramento técnico e comercial, e a melhoria contínua do projeto.

O principal deles é buscar uma redução de custo ainda mais significativa no circuito eletrônico. Conforme pode ser observado no Anexo IV, o custo total dos componentes eletrônicos ainda apresenta um custo elevado, apesar da redução de custo de 35% em relação ao protótipo elaborado por ENDALÉCIO [11]. Pode-se observar que o item mais crítico, em relação ao custo, é o circuito integrado de eletrônica de potência LMD18201. Assim, devem ser considerados CIs alternativos de menor custo, que realizem a mesma função sem comprometer o desempenho do sistema, como os *choppers* de um quadrante.

Dentre os trabalhos futuros mais relevantes, podem ser citados ainda:

- Incluir na modelagem matemática a interação entre o ímã permanente e o núcleo ferromagnético, como forma de melhorar o sistema e reduzir o consumo de energia;
- Realização de estudo sobre outras configurações de eletroímãs, com a possibilidade de envolvê-lo com material ferromagnético, de modo a reduzir a dispersão de fluxo magnético;
- Realização de estudo de compatibilidade eletromagnética e interferência eletromagnética do produto, além de eficiência energética;
- Inclusão de dispositivos de proteção contra sobrecarga ou sobreaquecimento dos componentes eletrônicos na placa de circuito impresso;
- Avaliar a possibilidade de submeter o produto aos processos de certificação e avaliação de conformidade;
- Realização de estudo sobre o atendimento às normas referentes à segurança de produtos semelhantes;
- Elaboração de um manual de instruções para o funcionamento do produto;
- Realização de estudo sobre fornecedores dos componentes do produto e avaliar as possibilidades de parcerias com empresas fabricantes de produtos semelhantes;
- Utilizar a metodologia do *design thinking* para criação de um produto baseado em levitação magnética destinado às atividades educacionais.

Referências Bibliográficas

- [1] Laboratório de Máquinas Elétricas (LabMaq). Disponível em: <http://www.dee.ufrj.br/labmaq/index.html> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [2] Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP). Disponível em: <http://www.dee.ufrj.br/lasup/index.html> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [3] *Terumo Heart, Inc.* Disponível em: <http://terumoheart.net/us/index.php/medical-professionals/duraheart-lvas> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [4] *Calnetix Technologies.* Disponível em: <http://www.calnetix.com/applications-industries> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [5] *Magneticbearings.org.* Disponível em: <http://www.magneticbearings.org/applied-rd/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [6] STEPHAN, R. M. “MagLev-Cobra: Tecnologia de levitação magnética no Brasil”. *Revista Ciência Hoje*, v. 55, n. 325, pp. 20–25, maio de 2015.
- [7] *Crealev.* Disponível em: <http://www.crealev.com/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [8] *Elivatix.* Disponível em: <http://www.elivatix.com/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [9] *Mars.* Disponível em: <https://crazybaby.com/mars> – Acesso em: 28 de fevereiro de 2019.
- [10] *Feedback Instruments, Ltd.* Disponível em: <http://www.feedback-instruments.com/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [11] ENDALÉCIO, A. D. de M. *Estudo e Implementação de um Sistema de Levitação Eletromagnética Utilizando Sensores de Efeito Hall.* 69 p. Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação, Rio de Janeiro, 2013.
- [12] *Arduino.* Disponível em: <https://www.arduino.cc/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [13] PLATTNER, H., MEINEL, C., LEIFER, L. *Design Thinking: Understand – Improve – Apply.* Berlim, Springer-Verlag, 2011.
- [14] ORTIZ SALAZAR, A., DUNFORD, W., STEPHAN R. M. *et al.* “A Magnetic Bearing System Using Capacitive Sensors for Position Measurement”. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 26, n. 5, pp. 2541-2543, setembro de 1990.
- [15] SANTISTEBAN, J. A., STEPHAN, R. M. “*Sensor Ótico de Posição com Característica Linear*”. In: *Trabalhos Técnicos – 11º Seminário de Instrumentação IBP*, v. 1, pp. 10-15, Salvador, Brasil, março de 1996.

- [16] STEPHAN, R. M., FORAIN, I, MACHADO, O. J. *et al.* “*Experiências de Levitação Magnética*”. In: XIV Congresso Brasileiro de Automática, pp. 309-312, Natal, Brasil, setembro de 2002.
- [17] GOMES, R. R., SILVA, D. C. V. da, SILVA NETO, J. L. da. “*Electromagnetic Levitation Using MATLAB Real Time Control Toolbox*”. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics, v. 2, pp. 1144-1146, Rio de Janeiro, Brasil, junho de 2003.
- [18] GOMES, R. R.; STEPHAN, R. M. “Um experimento para ilustrar o sistema de levitação eletromagnética utilizado em trens MAGLEV”. Disponível em: <http://user.das.ufsc.br/~moreno/levitacao/se.pdf> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [19] VALLE, R., NEVES, F., de ANDRADE Jr., R. *et al.* “Electromagnetic Levitation of a Disc”. *IEEE Transactions on Education*. v. 55, n. 2, pp. 248-254, maio de 2012.
- [20] GOMES, R. R. *Um Experimento para Ilustrar o Sistema de Levitação Eletromagnética Utilizado em Trens Maglev*. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2004.
- [21] MOTA, D. J. P. de S. *Controle da Posição de uma Esfera em um Sistema de Levitação Eletromagnética*. 60 p. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2008.
- [22] VALLE, R. L. de S. *Levitação Eletromagnética de um Disco*. 66 p. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2010.
- [23] NEVES, F. F. *Controle Adaptativo Programado, Rejeição de Distúrbios e Estimador de Posição Aplicado ao Sistema de Levitação Eletromagnética de um Disco*. Projeto de Graduação em Engenharia de Controle e Automação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Controle e Automação, Rio de Janeiro, 2012.
- [24] FERREIRA, H. P. *Retrospectiva dos Métodos de Levitação e o Estado da Arte da Tecnologia de Levitação Magnética*. 165 p. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2017.
- [25] SCHWEITZER, G.; MASLEN, E.; BLEULER, H. *et al.* *Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Heidelberg, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [26] GUOBIN, L.; XIONGWEI, S. “*Application and Development of Maglev Transportation in China*”. In: The 23rd International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (MAGLEV’16), Berlim, Alemanha, 23–26 de setembro de 2016.

- [27] PENG, X.; LIANG, X.; WANG, J. “Construction of the first urban maglev line in China”. In: The 23rd International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (MAGLEV’16), Berlim, Alemanha, 23–26 de setembro de 2016.
- [28] NIIMI, M. “Ten years commercial operation of LINIMO (HSST System) in Aichi Pref., Japan”. In: The 23rd International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (MAGLEV’16), Berlim, Alemanha, 23–26 de setembro de 2016.
- [29] SHIN, B. C.; PARK, D. Y.; BAIK, S. H. *et al.* “Incheon International Airport Maglev Line”. In: The 23rd International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (MAGLEV’16), Berlim, Alemanha, 23–26 de setembro de 2016.
- [30] CHIBA, A. FUKAO, T.; ICHIKAWA, O. *et al.* *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*. Oxford, Elsevier, Newnes, 2005.
- [31] STEPHAN, R. M.; CASTRO PINTO, F. A. N.; GOMES, A. C. del N. *et al.* *Mancais Magnéticos: Mecatrônica sem Atrito*. Rio de Janeiro, Ed. Ciência Moderna, 2013.
- [32] SOTELO, G. G.; STEPHAN, R. M.; BRANCO, P. J. *et al.* “A didactic comparison of magnetic forces”. *International Journal of Electrical Engineering Education*, v. 48, n. 2, pp. 117–129, outubro de 2012.
- [33] LILIENKAMP, K. A.; LUNDBERG, K. H. “Low-cost magnetic levitation project kits for teaching feedback system design”. In: American Control Conference, Boston, Massachusetts, EUA, 30 de junho–06 de julho de 2004.
- [34] LUNDBERG, K. H.; LILIENKAMP, K. A.; MARSDEN, G. “Low-Cost Magnetic Levitation Project Kits”. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 24, n. 5, pp. 65–69, outubro de 2004.
- [35] MARSDEN, G. “Levitation! Float objects in a servo-controlled magnetic field”. *Nuts & Volts Magazine, Everything For Electronics*, v. 24, n. 9, pp. 58–61, setembro de 2003.
- [36] ARTIGAS, J. I.; BARRAGÁN, L. A.; LLORENTE, S. *et al.* “Low-Cost Magnetic Levitation System for Electronics Learning”. In: 4th IEEE International Conference on E-Learning in Industrial Electronics (ICELIE), pp. 55–60, Glendale, Arizona, EUA, 07–10 de novembro de 2010.
- [37] ANTUNES, P. I. T. de C. “Medição de Posição de Rotor em Mancais Magnético Através de Sensor Hall”. 65 pp. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, São Paulo, 2012.
- [38] SADIKU, M. N. O. *Elementos de Eletromagnetismo*. Porto Alegre, Ed. Bookman, 2004.
- [39] MOON, F. C. *Superconducting Levitation: Applications to Bearings and Magnetic Transportation*. Nova Iorque, John Wiley & Sons, Inc., 1994.

- [40] FERREIRA, H. P.; ENDALÉCIO, A. D. de M.; STEPHAN, R. M. “*Development of Levitation Experiments for Teaching Purposes*”. In: 1st Brazilian Workshop on Magnetic Bearings (BWMB), Rio de Janeiro, Brasil, 25 e 26 de outubro de 2013.
- [41] BARNES, M. *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*. Rio de Janeiro, Newnes, Elsevier, 2003.
- [42] BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas – Volume 2*. Rio de Janeiro, 2^a Ed., Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2011.
- [43] MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. Nova Iorque, 3^a Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [44] BOEHM, J.; GERBER, R.; KILEY, N. R. C. “Sensors for Magnetic Bearings”. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 29, n. 6, pp. 2962–2964, novembro de 1993.
- [45] MASLEN, E. “Magnetic Bearings”. University of Virginia. 2000.
- [46] KAUSS, W. L. *Motor Mancal Magnético com Controle Ótimo Implementado em um DSP*. 115 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2008.
- [47] ENDALÉCIO, A. D. de M. *Desenvolvimento de uma Plataforma de Levitação Eletromagnética*. 114 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2018.
- [48] SINHA, P. K. “Analog Measurement of Position Using Hall Effect”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, v. IECI-26, n. 3, pp. 196–198, agosto de 1979.
- [49] BAHR, F.; MELZER, M; KARNAUSHENKO, D. *et al.* “*Flux Based Control of AMBs Using Integrated Ultra-Thin Flexible Bismuth Hall Sensors*”. In: 1st Brazilian Workshop on Magnetic Bearings (BWMB), Rio de Janeiro, Brasil, 25 e 26 de outubro de 2013.
- [50] Folha de Dados do Sensor de Efeito Hall SS495A. Disponível em: <https://www.farnell.com/datasheets/1683360.pdf> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [51] Folha de Dados do LMD18201. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmd18201.pdf> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [52] WONG, T. H. “Design of a Magnetic Levitation Control System – An Undergraduate Project”. *IEEE Transactions on Education*, v. E-29, n. 4, pp. 196–200, novembro de 1986.
- [53] HURLEY, W. G.; HYNES, M.; WÖLFLE, W. H. “PWM Control of a Magnetic Suspension System”. *IEEE Transactions on Education*, v. 47, n. 2, pp. 165–173, maio de 2004.

- [54] SINHA, P. K.; PECH, G.; ABBASSI, H. A. “Digital Control of an Electromagnetic Suspension System Using the TMS-32020 Signal Processor”. *Automatica*, v. 27, n. 6, pp. 1051–1054, 1991.
- [55] Folha de Dados do *ATMEGA 328*. Disponível em: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [56] *Instructables. Quadrotor*. Disponível em: <http://www.instructables.com/id/Quadrotor/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [57] *Lego Mindstorms*. Disponível em: <http://www.lego.com/en-us/mindstorms/?domainredir=mindstorms.lego.com> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [58] *Hobbystyle*. Disponível em: <http://www.hobbystyle.com.br/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [59] *Adidas MyCoach*. Disponível em: <http://micoach.adidas.com/br/smartball/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [60] *Optigone*. Disponível em: <http://www.optigone.com/m2000.htm> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [61] *Special Toys Direct*. Disponível em: <http://www.specialtytoysdirect.com/electronics> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [62] *Idea 3Di*. Disponível em: <https://www.idea3di.com/levia-unique-levitating-marble-lamp/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [63] BAKER, W.; ROBINSON, J.; ARTIMOVICH, A. Span Inc. “*Magnetic Floatation Control System*”. US6373676B1. 01 de outubro de 1999. 16 de abril de 2002.
- [64] JOACHIM, G. L. Identified Flying Objects, Ltd. “*Magnetic Suspension System*”. US7110236B2. 18 de junho de 2003. 19 de setembro de 2006.
- [65] SMOOT, L. S.; SCHNUCKLE, G. W. Disney Enterprises, Inc. “*Magnetic Levitation Novelty Device*”. US8258663B2. 28 de setembro de 2009. 04 de setembro de 2012.
- [66] *HCNT Technology*. Disponível em: <http://www.hcnt.cn/en/Default.asp> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [67] YANG, W. M.; WANG, M. Z. “The Stable Levitation of an Iron Ball over a Ring Magnet”. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, v. 25, pp. 421–425, 2012.
- [68] LI, C.; LI, L. “The Stable Magnetic Levitation of a Cylindrical Ferromagnetic Object”. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, v. 27, pp. 2773–2778, 2014.
- [69] LIVINGSTON, J. D. *Rising Force: The Magic of Magnetic Levitation*. Cambridge, Harvard University Press, 2011.

- [70] JANSEN, G. L. M. Crealev BV. “*Magnetic Levitation Apparatus*”. EP2210336B1. 19 de setembro de 2008. 28 de julho de 2010.
- [71] *Kibardindesign*. Disponível em: <http://www.kibardindesign.com/products/in-progress/the-bat-levitating-kibardin/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [72] *Hoshinchu Air Bonsai Garden*. Disponível em: <http://hoshinchu.com/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [73] WHITEHEAD, L. Levitation Arts Inc. “*Levitation system with permanent magnets and coils*”. US5168183A. 27 de março de 1991. 1º de dezembro de 1992.
- [74] WANG, X. B.; LI, L. Q. “*Method for Positioning a Suspension Body and Magnetic Suspension Device using the Method*”. US8823479B2. 06 de junho de 2010. 02 de setembro de 2014.
- [75] Levimoon. Disponível em: <https://www.kickstarter.com/projects/kelvinso/the-world-first-levitating-moon-light> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [76] *Ynyee Tech: Levitation for an Amazing World*. Disponível em: <https://mp.weixin.qq.com/s/ppuO8GUj4RmVyhgbLzL10g?> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [77] PEREIRA, A. P. “Os 19 brinquedos tecnológicos mais irados para crianças.” *Tecmundo*. <http://www.tecmundo.com.br/brinquedos/14166-os-19-brinquedos-tecnologicos-mais-irados-para-criancas.htm> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [78] BERTOLUCCI, J. “10 Smart Tech Toys for Kids” *Information Week*. http://www.informationweek.com/it-life/10-smart-tech-toys-for-kids-/d/d-id/1317348?image_number=11 – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [79] HUDAK, M. “Perspectives: Global Outlook for Toys through 2022”. *Toy Association*. http://www.toyassociation.org/PressRoom2/News/2015_News/PERSPECTIVES_Global_Trends_in_STEM_Toys_.aspx#.VYGeAEZRKbY – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [80] FOWLER, G. A. “Tech Toys to Make Children Smarter”. *Wall Street Journal*. <http://www.wsj.com/articles/tech-toys-to-make-children-smarter-1418753372> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [81] RITTS, G. Csd, Inc. “*Magnetically levitated spinning axel display apparatus*”. US5182533A. 11 de outubro de 1991. 26 de janeiro de 1993.
- [82] HARRIGAN, R. M. Roy Major Harrigan. “*Levitation device*”. US4382245A. 19 de dezembro de 1979. 03 de maio de 1983.
- [83] Magnetic Levitation Sculpture. Disponível em: <http://www.instructables.com/id/Magnetic-Levitation-Sculpture/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.

- [84] *K&J Magnetics, Inc.* Disponível em: <https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=diamagnetic-levitation> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [85] *Wasserstein*. Disponível em: <https://wasserstein-home.com/products/levitating-bluetooth-speaker-floating-wireless-speaker-scifi-speaker-by-wasserstein> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [86] *Uppel Tech*. Disponível em: <http://www.uppel-tech.com/product/57605357.html> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [87] *LG Levitating Portable Speaker*. Disponível em: <http://www.lgnewsroom.com/2016/12/lgs-levitating-speaker-expected-to-mesmerize-audience-at-ces-2017/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [88] *2015 CES Innovation Awards*. Disponível em: http://content.ce.org/PDF/2015_CES_Innovations_Awards.pdf – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [89] *OM/ONE*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=7O5qcovPGqA> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [90] *Moon*. Disponível em: <https://www.indiegogo.com/projects/moon-by-1-ring-worlds-coolest-smart-home-hub/#/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [91] *Lexus Hoverboard*. Disponível em: <http://www.lexus-int.com/amazinginmotion/slide/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [92] *Hendo Hoverboard*. Disponível em: www.kickstarter.com/projects/142464853/hendo-hoverboards-worlds-first-hoverboard – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [93] *Bytronic*. Disponível em: <http://www.bytronic.net/product/magnetic-levitation-system/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [94] *TecQuipment Ltd.* Disponível em: http://www.tecquipment.com/Control/MATLAB_Simulink/CE152.aspx – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [95] *INTECO*. Disponível em: <http://www.inteco.com.pl/products/magnetic-levitation-systems/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [96] *Quanser Inc*. Disponível em: <http://www.quanser.com/Products/maglev> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [97] Laboratório Didático do Instituto de Física da UFRJ. Disponível em: <http://ladif.if.ufrj.br/anel-saltador/> – Acesso em: 28 de fevereiro de 2017.
- [98] Instituto de Física da UnB. Disponível em: http://www.fis.unb.br/gefis/index.php?option=com_content&view=article&id=198&Itemid=314 – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.

- [99] Instituto de Física da UNICAMP. Disponível em: http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/pagina_EaF/Modulo_IV_Eletromagnetismo/Modulo_IV.htm – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [100] *Palais de la Decouvert.* Disponível em: http://www.dailymotion.com/video/xewkxo_levitation-d-un-plateau-d-aluminium_tech – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [101] da SILVA, O. H. M.; LABURÚ, C. E.; ARRUDA, S. de M. *et al.* “Um equipamento demonstrativo de levitação magnética de uma bobina com automatização adaptada aos Museus de Ciência e Tecnologia”. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 31, n. 1, pp. 78–97, abril de 2014.
- [102] *Azeheb Laboratórios de Física.* Disponível em: <https://azeheb.com.br/ensino-superior/anel-de-thompson-anel-saltante.html> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [103] *CIDEPE – Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa.* Disponível em: <http://www.cidepe.com.br/index.php/br/produtos-interna/conjunto-anel-saltante-anel-de-thomson-1671> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [104] *PASCO.* Disponível em: <https://www.pasco.com/prodCompare/ring-launcher/index.cfm> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [105] LIEDTKA, J.; KING, A.; BENNETT, K. *Solving Problems with Design Thinking: Ten Stories of What Works.* Columbia Business School, Columbia, 2013.
- [106] ZANCUL, E. Design Thinking aplicado em projetos de engenharia. Apresentação de Slides, julho de 2015. I Workshop Academic Working Capital, São Paulo, Brasil.
- [107] *IDEO.* Disponível em: <http://www.ideo.com/about/> – Acesso em: 31 de janeiro de 2019.
- [108] CARLETON, T.; COCKAYNE, W. “*The Power of Prototypes in Foresight Engineering*”. In: International Conference on Engineering Design (ICED), Stanford, California, EUA, 24 a 27 de agosto de 2009.
- [109] SOBRAL, F.; PECCI, A. *Administração: teoria e prática no contexto brasileiro.* Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2008.
- [110] IKEDA, A. A.; CAMPOMAR, M. C.; BACELLAR, F. C. T. “*Considerações sobre a Análise SWOT no Plano de Marketing*”. In: X Colóquio Internacional sobre Poder Local. Desenvolvimento e gestão social dos territórios. Salvador, Brasil, 11 a 13 de dezembro de 2006.
- [111] STEPHAN, R. M. “Projeto: Plataforma de Levitação Magnética”. Relatório interno. COPPE/UFRJ, 2012.

Apêndice A – Projeto do Atuador e dos Ímãs Permanentes

Este apêndice será dedicado ao projeto do eletroímã e dos ímãs permanentes utilizados no sistema de levitação magnética. Esta etapa foi realizada baseando-se no projeto de um sistema eletromagnético descrito em STEPHAN [111] e aplicado a seguir.

A.1. Dimensionamento Geométrico do Eletroímã

Esta seção é dedicada ao projeto do atuador formado pelo eletroímã e seu núcleo ferromagnético. A Figura A.1 apresenta uma vista da seção transversal de uma bobina circular, no qual o núcleo ferromagnético é formado por apenas um cilindro de ferrite.

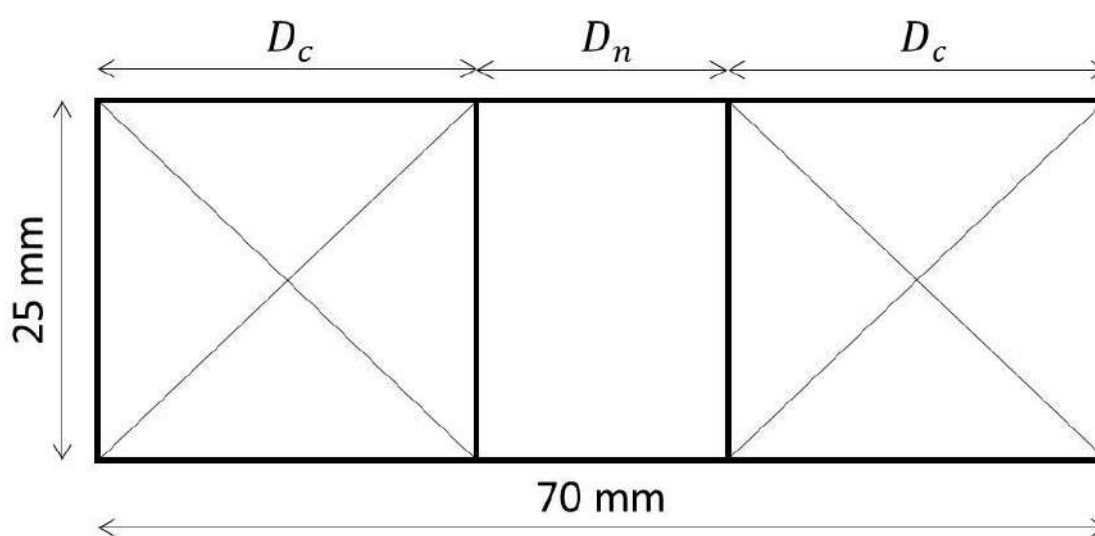


Figura A.1. Seção transversal do eletroímã.

As dimensões de diâmetro externo e de comprimento foram escolhidas levando-se em consideração as dimensões internas máximas definidas para o produto como forma de se obter o seu máximo aproveitamento de espaço interno. As dimensões D_c e D_n correspondem, respectivamente, ao comprimento da seção retangular preenchida por enrolamentos de cobre e o diâmetro do núcleo ferromagnético e serão determinadas a seguir.

O comprimento da seção retangular preenchida por enrolamentos de cobre para o eletroímã da Figura A.1. pode ser obtido em função do diâmetro de seu núcleo ferromagnético. Desta forma, D_c pode ser expressa, em mm, como:

$$D_c = \frac{(70 - D_n)}{2} \quad (\text{A.1})$$

A área da seção transversal preenchida pelos enrolamentos de cobre para o eletroímã da Figura A.1 pode ser expressa, em mm², por:

$$A_{Cu} = \frac{25f_p(70 - D_n)}{2} \quad (A.2)$$

É possível perceber pela análise das expressões (A.1) e (A.2) que uma vez determinado o diâmetro do núcleo ferromagnético, todas as demais dimensões do eletroímã são obtidas.

Os valores comerciais de diâmetros para o núcleo ferromagnético podem ser encontrados no Anexo VI, que apresenta uma tabela de núcleos de ferrite cilíndricos fabricados comercialmente.

A relação entre a área da seção transversal preenchida por enrolamentos de cobre e o seu número de espiras é dada por:

$$A_{Cu} = N \cdot a_{Cu} \quad (A.3)$$

Da mesma forma, a corrente que circula pelos enrolamentos do eletroímã pode ser obtida por:

$$i = J \cdot a_{Cu} \quad (A.4)$$

Combinando-se as expressões (A.3) e (A.4), obtém-se a força magnetomotriz (FMM) produzida pelo eletroímã:

$$Ni = J \cdot A_{Cu} \quad (A.5)$$

A resistência elétrica do eletroímã pode ser determinada pela lei de Ohm:

$$R = \frac{\rho l}{a_{Cu}} = \frac{\rho N^2 l_m}{A_{Cu}} \quad (A.6)$$

A potência elétrica dissipada pelo eletroímã equivale a:

$$P = Ri^2 = \rho l_m A_{Cu} J^2 \quad (A.7)$$

Para se obter os valores da resistência e da potência dissipada no eletroímã, deve-se calcular o caminho médio percorrido por uma espira circular da bobina. A Figura A.2 ilustra a vista superior do eletroímã. A partir dela é possível determinar o maior e o menor caminho percorridos por uma espira circular que correspondem,

respectivamente, ao perímetro externo e o perímetro interno do eletroímã e podem ser expressos matematicamente por:

$$l_{m,maior} = 2\pi \left(D_c + \frac{D_n}{2} \right) \quad (A.8)$$

$$l_{m,menor} = \frac{2\pi D_n}{2} \quad (A.9)$$

O caminho médio percorrido por uma bobina circular pode ser expresso por:

$$l_m = \frac{l_{m,maior} + l_{m,menor}}{2} = \pi(D_c + D_n) \quad (A.10)$$

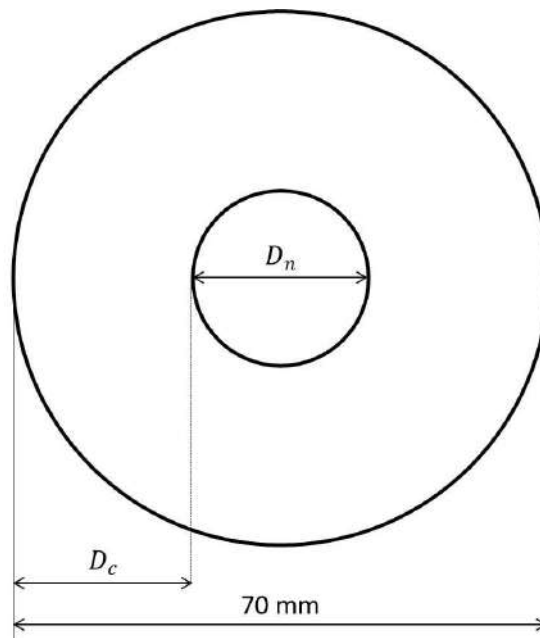


Figura A.2. Vista superior do eletroímã.

A partir dos dados constantes no Anexo VI e das expressões (A.1), (A.2), (A.5) e (A.7), pode-se construir a Tabela A.1 que apresenta os valores do comprimento da seção transversal, da área seção transversal preenchida por cobre e da força magnetomotriz para os valores correspondentes de diâmetro do núcleo ferromagnético. Nesta situação, foram considerados um fator de preenchimento igual a 0,8 e uma densidade de corrente de 2 A/mm².

Tabela A.1. Dimensões do eletroímã, FMM e potência dissipada para diferentes diâmetros de núcleo ferromagnético ($f_p = 0,8$ e $J = 2 \text{ A/mm}^2$).

D_n (mm)	4,8	5,0	6,0	7,5	10	15
D_c (mm)	32,6	32,5	32	31,25	30	27,5
A_{Cu} (mm ²)	652	650	640	625	600	550
\mathcal{F} (A. esp)	1304	1300	1280	1250	1200	1100
P (W)	5,45	5,45	5,44	5,42	5,37	5,23

A.2. Determinação do Número de Espiras e Bitola dos Condutores

O Anexo VII apresenta uma tabela de fios esmaltados de cobre que contém os valores de área da seção do fio e corrente máxima para cada fio de bitola circular.

Um dos requisitos do projeto é que a corrente de operação que circula no eletroímã esteja em uma faixa entre 1 A e 2 A, em função da utilização de fontes de alimentação comerciais de baixa potência comumente encontradas no mercado e de baixo custo. Baseando-se neste critério e nos dados constantes no Anexo VII, além das expressões (A.3) e (A.5), é possível construir as Tabelas A.2 e A.3 que relacionam, respectivamente, o número de espiras e a corrente de operação do eletroímã correspondentes para diferentes valores de diâmetro do núcleo ferromagnético e de bitola dos fios.

Tabela A.2. Número de espiras em função do diâmetro do núcleo ferromagnético e da bitola do fio.

D_n (mm)	4,8	5,0	6,0	7,5	10	15
17 AWG	627	625	616	601	577	529
18 AWG	796	793	781	763	732	671
19 AWG	1003	1000	985	962	924	847
20 AWG	1254	1250	1231	1202	1154	1058

Tabela A.3. Corrente de operação no eletroímã em função do diâmetro do núcleo ferromagnético e da bitola do fio.

D_n (mm)	4,8	5,0	6,0	7,5	10	15	$I_{m\acute{a}x}$
17 AWG	2,08 A	2,08 A	2,08 A	2,08 A	2,08 A	2,08 A	3,2 A
18 AWG	1,64 A	1,64 A	1,64 A	1,64 A	1,64 A	1,64 A	2,5 A
19 AWG	1,30 A	1,30 A	1,30 A	1,30 A	1,30 A	1,30 A	2,0 A
20 AWG	1,04 A	1,04 A	1,04 A	1,04 A	1,04 A	1,04 A	1,6 A

Analisando-se a Tabela A.3, nota-se que, para qualquer uma das bitolas, a corrente de operação do eletroímã é aproximadamente 65% da corrente máxima admissível, o que garante uma margem de segurança considerável.

A.3. Escolha do Atuador e do Ímã Permanente

O Anexo VIII apresenta uma tabela que contém as dimensões de ímãs permanentes cilíndricos de neodímio-ferro-boro. Uma escolha adequada é utilizar um ímã permanente que possua o mesmo diâmetro do núcleo ferromagnético de ferrite como forma de melhorar o acoplamento do circuito magnético. Desta forma, comparando-se a tabela de núcleos de ferrite com a de ímãs permanentes e considerando-se as dimensões máximas do atuador, pode-se notar que o diâmetro de 10 mm é comum a ambos e foi escolhido. O núcleo de ferrite de 10 mm proporciona, de acordo com a Tabela A.1, um comprimento da seção transversal dos enrolamentos do eletroímã igual a 30 mm.

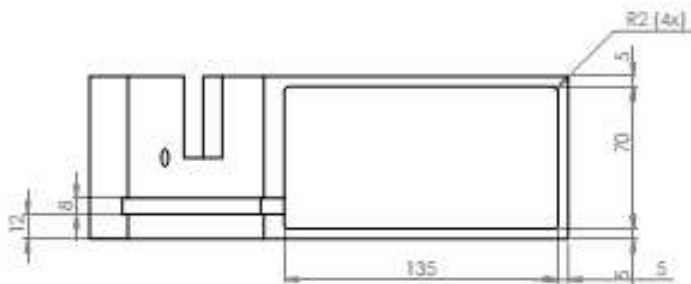
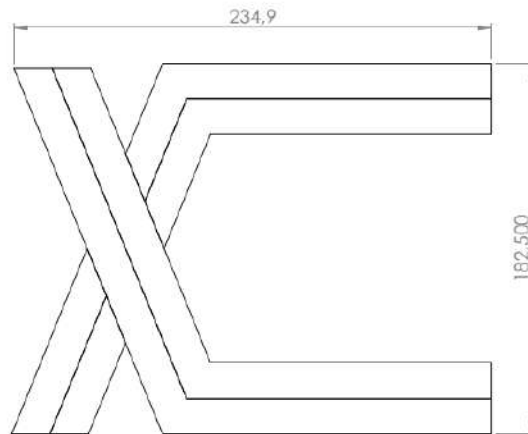
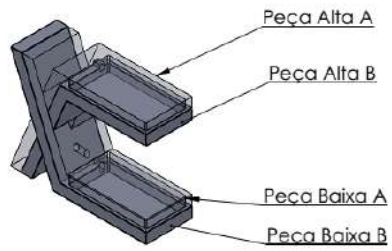
A escolha da bitola do fio de cobre considera a corrente de operação, de acordo com os dados da Tabela A.3. Dentre as bitolas analisadas, a bitola de 20 AWG garante a menor corrente de operação e, conseqüentemente, a menor potência dissipada e, por essa razão, foi escolhida. A Tabela A.4 resume a escolha de cada um dos componentes do circuito magnético.

Tabela A.4. Projeto do atuador e dos ímãs permanentes.

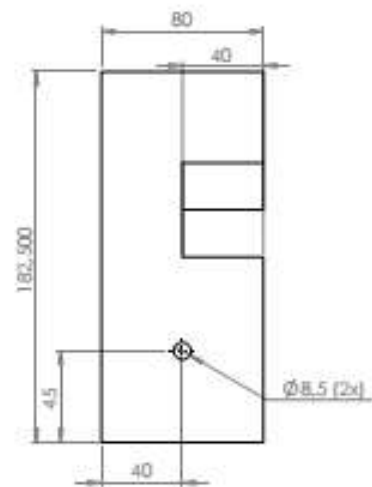
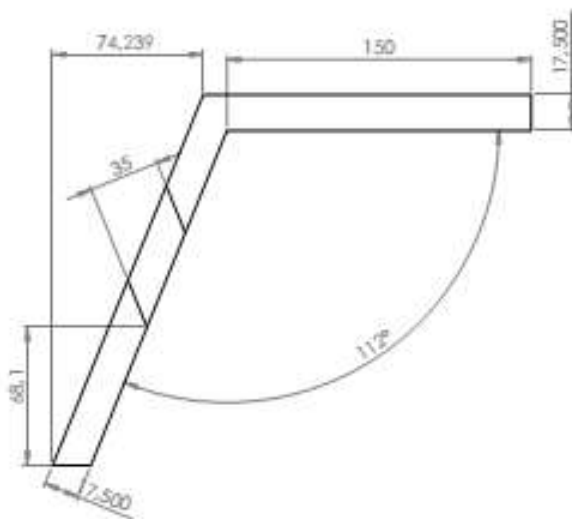
Núcleo de Ferrite	$D_n = 10 \text{ mm}$	$h_n = 25 \text{ mm}$	Cilíndrico	
Enrolamento de cobre	$D_c = 30 \text{ mm}$	$h_c = 25 \text{ mm}$	$N = 1154 \text{ espiras}$	Bitola 20 AWG
Ímã Permanente Nd-Fe-B	$D_p = 10 \text{ mm}$	$h_p = 10 \text{ mm}$	Cilíndrico	Magnetização axial

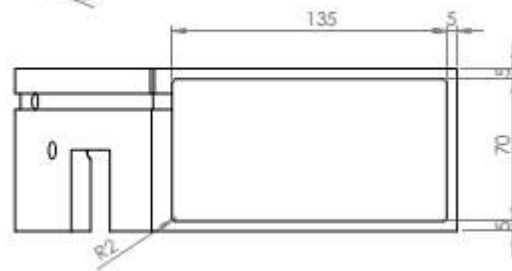
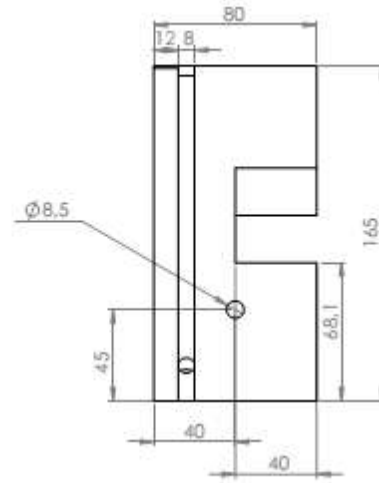
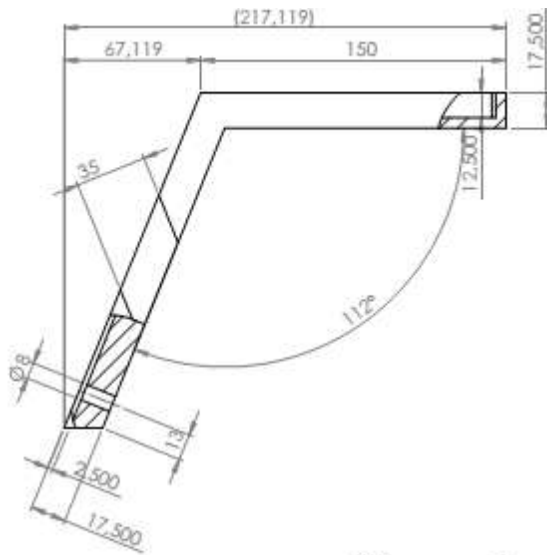
ANEXO I – Desenho Técnico da Estrutura do Produto

Estrutura Globo Levitador

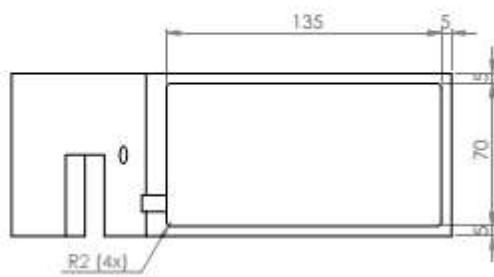
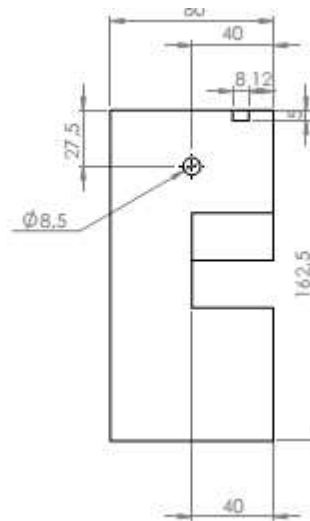
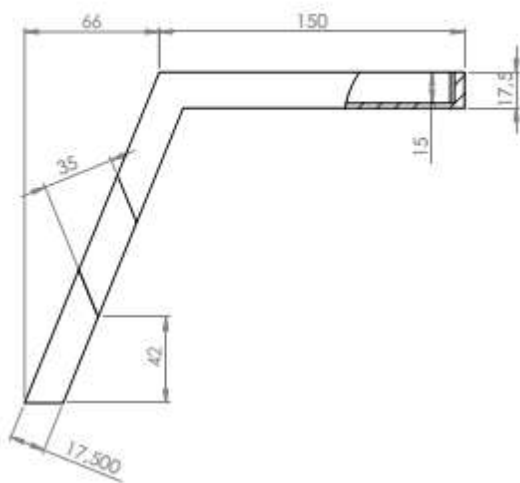


Peça Alta A



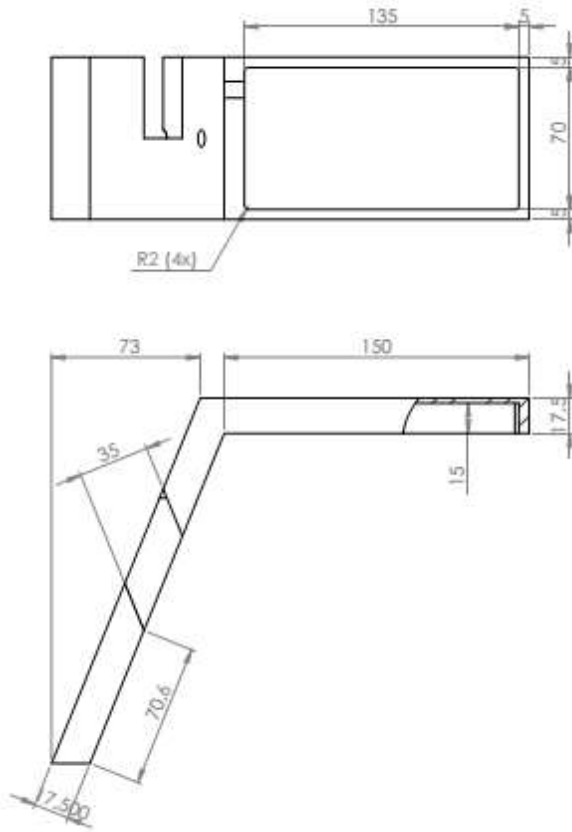


Peça Alta B

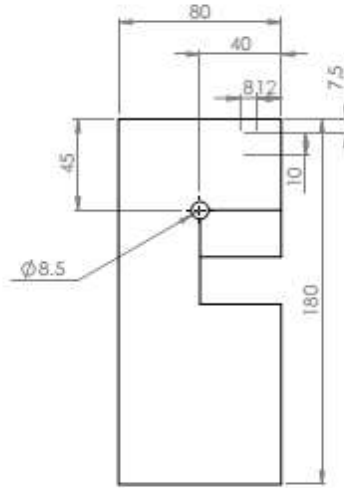


Peça Baixa A





Peça Baixa B



ANEXO II – Rotina de Controle implementada no Microcontrolador ATMEGA 328P

```
// Controlador Lead

// Definindo variáveis globais
// Zero do controlador
int z = 38;
// Polo do controlador
int p = 18*z;
// Período de amostragem total
double T = 0.000212;
double vsensor; // Nível de tensão de saída do sensor de efeito Hall
// Ganho do controlador Lead
//double K = 0.00001*(p/z);
double K = 0.1;
double u; // Variável de controle
// Referência
double ref = 0.7;
double erro;
double erro_ant = 0;
double u_ant = 0;

// Cálculo das constantes do controlador Lead
double K1 = K*(1 + (z*T))/(1 + (p*T));
double K2 = -K/(1 + (p*T));
double K3 = 1/(1 + (p*T));

// Definindo ADC prescalers para se alterar o clock do ADC
const unsigned char PS_64 = (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1);
const unsigned char PS_128 = (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1) | (1 << ADPS0);

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:

  // Configurar os pinos digitais para o PWM
  pinMode(9,OUTPUT); // Pino D9 = PWM
  pinMode(10,OUTPUT); // Pino D10 = DIRECTION
  pinMode(11,OUTPUT); // Pino D11 = BRAKE

  // Configurar o PWM do CI
  digitalWrite(9,HIGH); // Pino PWM em nível alto
  digitalWrite(11,LOW); // Pino BRAKE em nível baixo

  // Configurar os pinos digitais para os LEDS
  //pinMode(3,OUTPUT); // Pino D3 = LED1
  //pinMode(4,OUTPUT); // Pino D4 = LED2
  //pinMode(5,OUTPUT); // Pino D5 = LED3
  //pinMode(6,OUTPUT); // Pino D6 = LED4

  cli(); // Para as interrupções

  // Alterando a frequência do ADC
  // set up the ADC
  ADCSRA &= ~PS_128; // Removendo bits configurados pelo Arduino inicialmente
```

```

ADCSRA |= PS_64; // Ajustando o prescaler do ADC para 64

// Ajustando interrupção com timer em 4.7 kHz
TCCR1A = 0; // Ajustando o registrador TCCR1A para 0
TCCR1B = 0; // Ajustando o registrador TCCR1B para 0
TCNT1 = 0; // Inicializando o contador em 0

// Ajustando "compare match register" para períodos de 212 us
OCR1A = 423; // (16*10^6)/(8*(1/212u)) - 1 (must be < 65536)
// Habilitando o modo CTC
TCCR1B |= (1 << WGM12);
// Utilizando o prescaler igual a 8
TCCR1B |= (1 << CS11);
// Habilitando comparação do timer para chamar interrupção
TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);

sei(); // Permitir interrupções
} // Fim do setup

ISR(TIMER1_COMPA_vect){// Chamando interrupções na frequência de 4.7 kHz

// Leitura do sensor de efeito Hall
vsensor = analogRead(A1); // Lendo o nível de tensão da saída do sensor Hall
vsensor = 5*vsensor/1023; // Convertendo o intervalo de 0 a 1023 para de 0 a 5 Volts

// Sinal de controle
erro = - ref + vsensor; // Calculando o erro entre referência e o sinal do sensor Hall
u = K1*erro + K2*erro_ant + K3*u_ant; // Controlador Lead

// Configurar o sinal PWM
analogWrite(10,(250*u/5)); // Gerando o sinal PWM no Pino D10

// Atualização das variáveis para o próximo time step
u_ant = u; // O dado atual se torna o anterior para a próxima amostragem
erro_ant = erro; // O dado atual se torna o anterior para a próxima amostragem
} // Fim da interrupção

void loop() {
// put your main code here, to run repeatedly:

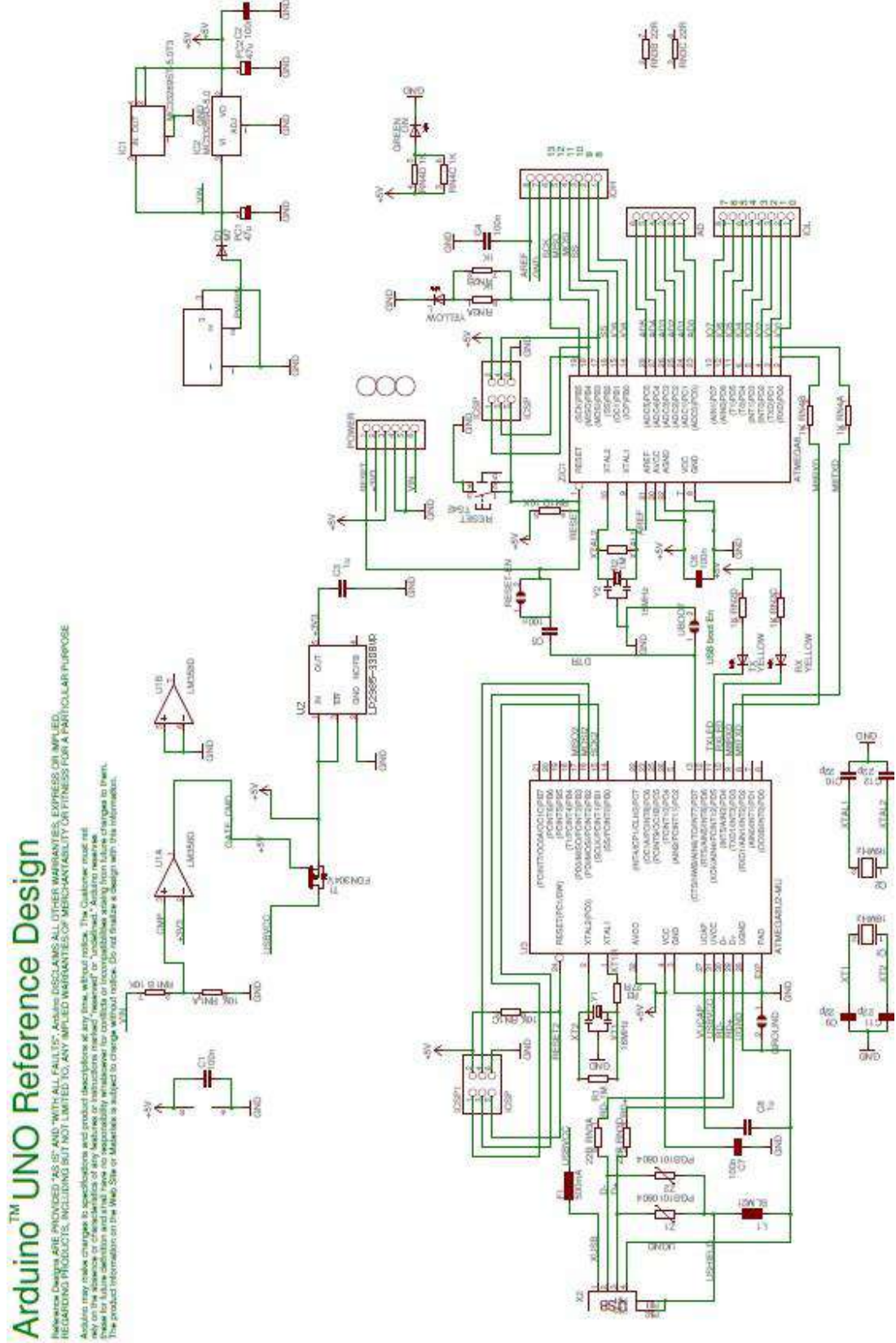
// LEDs piscando dois a dois
// digitalWrite(3,HIGH); //Acende o LED
// digitalWrite(4,LOW); // Apaga o LED
//digitalWrite(5,HIGH); //Acende o LED
//digitalWrite(6,LOW); // Apaga o LED
// delay(1000); //Espera por 1 segundo

//digitalWrite(3,LOW); // Apaga o LED
//digitalWrite(4,HIGH); //Acende o LED
//digitalWrite(5,LOW); // Apaga o LED
//digitalWrite(6,HIGH); //Acende o LED
//delay(1000); // Espera por 1 segundo

}

```

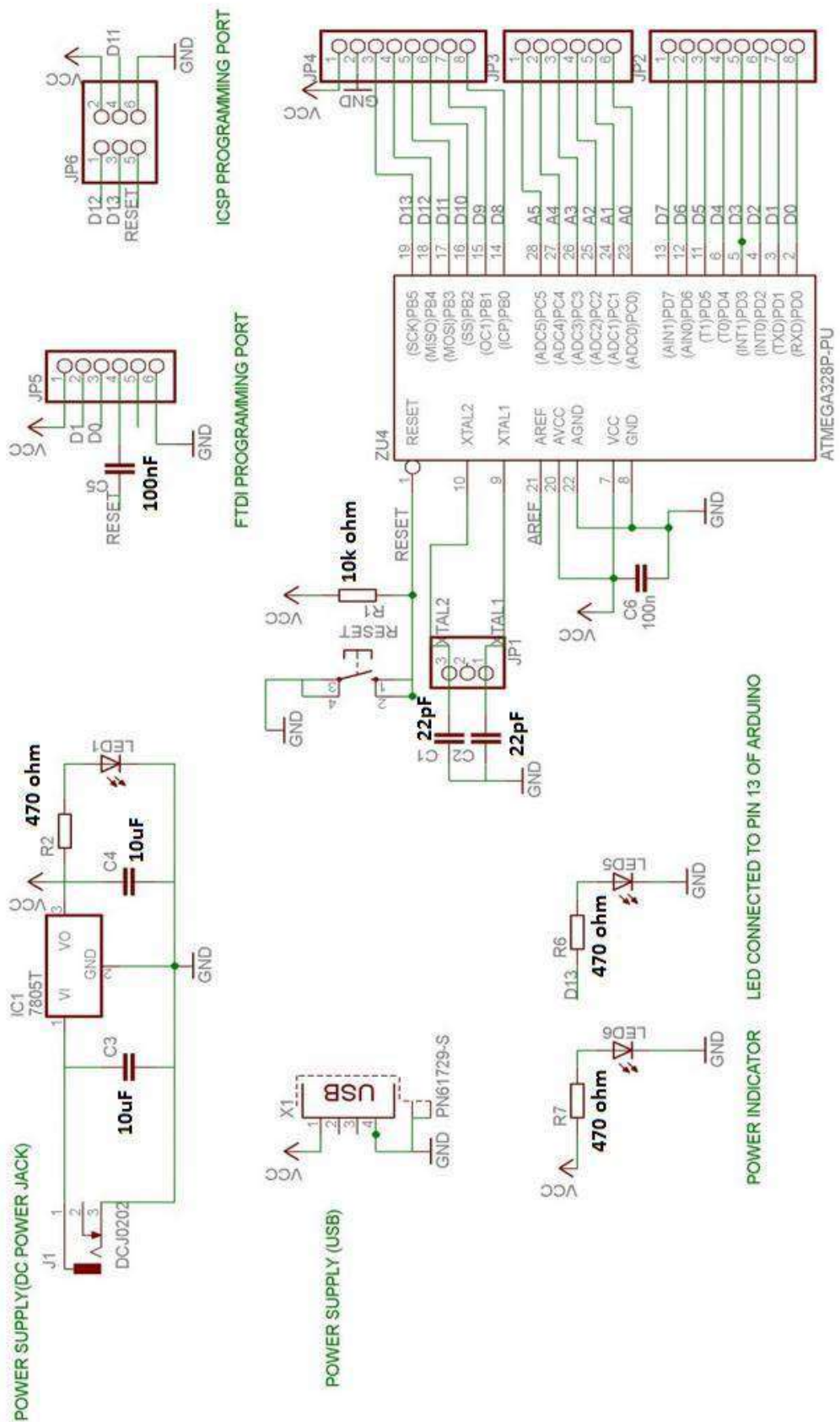
ANEXO III – Circuito Esquemático do Arduino UNO



Arduino™ UNO Reference Design

Reference Design ASB PROVIDED AS-IS WITH ALL FAULTS. ARDUINO DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on these specifications and product descriptions for future selection and must have no responsibility whatsoever to credit or incorporate Arduino's design from future changes to them. The product information on the Web Site or Marketplace is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information.



MINIMUM CIRCUIT CONNECTION

ANEXO IV – Lista de Componentes Eletrônicos Utilizados no Produto

Item	Quantidade	Descrição	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
CI ATMEGA 328P	1	Microcontrolador	R\$ 21,50	R\$ 21,50
Soquete	1	DIP 28	R\$ 0,90	R\$ 0,90
CI LMD18201	1	Ponte H	R\$ 65,80	R\$ 65,80
CI SS495A	1	Sensor de Efeito Hall	R\$ 5,90	R\$ 5,90
CI 7805	1	Regulador de Tensão	R\$ 2,50	R\$ 2,50
Cristal 16 MHz	1	Oscilador	R\$ 0,95	R\$ 0,95
Resistor 470 Ω	4		R\$ 0,12	R\$ 0,48
Resistor 10 k Ω	1		R\$ 0,10	R\$ 0,10
Capacitor 10 μ F	2		R\$ 0,09	R\$ 0,18
Capacitor 22 pF	2		R\$ 0,03	R\$ 0,06
Capacitor 10 nF	2		R\$ 0,03	R\$ 0,06
Capacitor 100 nF	2		R\$ 0,04	R\$ 0,08
Capacitor 1 nF (Poliester)	1		R\$ 0,27	R\$ 0,27
LEDs	4		R\$ 0,23	R\$ 0,92
Potenciômetro linear eixo rotativo 10 k Ω	1		R\$ 1,75	R\$ 1,75
Botão Push-button	1		R\$ 1,02	R\$ 1,02
Conector KK 5045-2	6	Conector de 2 vias (M e F)	R\$ 0,30	R\$ 1,80
Conector KK 5045-3	2	Conector de 3 vias (M e F)	R\$ 0,46	R\$ 0,92
Conector Power Jack DCJ0202	1	Conector de Alimentação do Circuito	R\$ 0,90	R\$ 0,90
Fonte de Alimentação 12 VDC/2 A	1		R\$ 21,00	R\$ 21,00
Custo Total (R\$)				R\$ 127,09

ANEXO V – Formulário da Entrevista da Pesquisa de Mercado

Nome:

Idade:

Sexo: () Feminino () Masculino

Renda Familiar:

() Até R\$800,00

() Até R\$3500,00

() Até R\$10000,00

() Acima de R\$10000,00

Questionário:

1 – Você gosta de decorar sua casa/escritório?

() Sim

() Não

2 – Se Sim, com que frequência você realiza compras para decoração?

() Semanalmente

() Mensalmente

() Semestralmente

() Anualmente

3 – Quanto você gasta em média na aquisição destes produtos?

() Até R\$100,00

() De R\$100,00 a R\$300,00

() De R\$300,00 a R\$500,00

() Acima de R\$500,00

4 – O que você preza na compra destes produtos? (Cite mais de uma opção se for o caso)

() Sofisticação

() Moderno (tecnologia)

() Custo

() Utilidade

() Todos itens acima

5 – Você gostaria de um objeto de decoração que ficasse “voando no ar”?

() Sim

() Não

6 – Você sabe o que é “Levitação Magnética”?

() Sim

() Não

7 – O que você acha, em uma palavra, deste produto?

8 – Quanto você acha que custa este produto?

() Até R\$200,00

() De R\$200,00 a R\$600,00

() De R\$600,00 a R\$1000,00

() Acima de R\$1000,00

9 – Você compraria este produto por R\$200,00?

- Sim
- Não

ANEXO VI – Tabela de Núcleos de Ferrite Cilíndricos

MATERIAL	DIÂMETRO (mm)	TOLERÂNCIA (mm)	COMPRIMENTO (mm)	TOLERÂNCIA (mm)	PESO (g)
TH50	1,63	± 0,05	5	± 0,20	0,048
TH50	1,65	± 0,05	5	± 0,20	0,049
IP6	1,70	- 0,20	8,4	- 0,30	0,075
TH50	1,70	- 0,20	8,4	- 0,30	0,075
TH50	1,78	- 0,20	8,4	- 0,30	0,075
IP6	4,8	± 0,10	6,5	± 0,50	0,40
IP12R	5	± 0,20	12	± 0,30	1,10
IP12R	5	± 0,20	17	± 0,30	1,56
IP12R	5	± 0,20	20	± 0,50	1,83
IP6	6	± 0,20	10	± 0,50	1,40
IP6	6	± 0,20	15	± 0,60	1,90
IP6	6	± 0,20	20	± 1,00	2,70
IP6	6	± 0,20	21	± 1,00	2,83
IP12R	6	± 0,20	21	± 1,00	2,83
IP6	6	± 0,20	25	± 1,00	3,40
IP6	6	± 0,20	30	± 1,00	4,20
IP6	6	± 0,20	40	± 1,00	5,60
IP6	7,5	± 0,25	10	± 0,50	2,30
IP6	7,5	± 0,25	20	± 1,00	4,50
IP6	7,5	± 0,25	30	± 0,50	6,60
IP12R	7,5	± 0,25	30	± 0,50	6,60
IP6	7,5	± 0,25	45	± 1,00	9,90
IP12R	7,5	± 0,25	45	± 1,00	9,90
IP6	7,5	± 0,25	50	± 1,00	10,70
IP12R	7,5	± 0,25	50	± 1,00	10,70
IP6	10	± 0,50	10	± 0,50	3,80
IP6	10	± 0,50	11	± 0,50	4,20
IP6	10	± 0,50	20	± 1,00	7,00
IP6	10	± 0,50	30	± 1,00	11,00
IP6	10	± 0,50	40	± 1,00	14,10
IP6	10	± 0,50	45	± 1,00	15,80
IP6	10	± 0,50	50	± 1,00	17,46
IP12R	10	± 0,50	50	± 1,00	17,46
IP6	15	± 0,70	13,5	± 0,50	10,70
IP6	15	± 0,60	20	± 1,00	17,00
IP6	15	± 0,60	30	± 1,00	25,00
IP12R	15	± 0,60	30	± 1,00	25,00
IP6	15	± 0,60	40	± 1,00	33,30
IP6	15	± 0,60	50	± 1,00	42,50

ANEXO VII – Tabela de Fios Esmaltados de Cobre

AWG	Diâmetro (mm)	Seção (mm ²)	Espiras por cm	Kg por km	Resistência (Ω/km)	Capacidade máxima (A)
0000	11,86	107,2	–	–	0,158	319
000	10,40	85,30	–	–	0,197	240
00	9,226	67,43	–	–	0,252	190
0	8,252	53,48	–	–	0,317	150
1	7,348	42,41	–	375	0,40	120
2	6,544	33,63	–	295	0,50	96
3	5,827	26,67	–	237	0,63	78
4	5,189	21,15	–	188	0,80	60
5	4,621	16,77	–	149	1,01	48
6	4,115	13,30	–	118	1,27	38
7	3,665	10,55	–	94	1,70	30
8	3,264	8,36	–	74	2,03	24
9	2,906	6,63	–	58,9	2,56	19
10	2,588	5,26	–	46,8	3,23	15
11	2,305	4,17	–	32,1	4,07	12
12	2,053	3,31	–	29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63	–	23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,1150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6
21	0,7230	0,41	12,8	3,64	41,46	1,2
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,92
23	0,5733	0,26	16,0	2,29	56,4	0,73
24	0,5106	0,20	18,0	1,82	85,0	0,58
25	0,4547	0,16	20	1,44	106,2	0,46
26	0,4049	0,13	22,8	1,14	130,7	0,37
27	0,3606	0,10	25,6	0,91	170,0	0,29
28	0,3211	0,08	28,4	0,72	212,5	0,23
29	0,2859	0,064	32,4	0,57	265,6	0,18
30	0,2546	0,051	35,6	0,45	333,3	0,15
31	0,2268	0,040	39,8	0,36	425,0	0,11
32	0,2019	0,032	44,5	0,28	531,2	0,09
33	0,1798	0,0254	50,0	0,23	669,3	0,072
34	0,1601	0,0201	56,4	0,18	845,8	0,057
35	0,1426	0,0159	62,3	0,14	1069,0	0,045
36	0,1270	0,0127	69,0	0,10	1338,0	0,036
37	0,1131	0,0100	78,0	0,089	1700,0	0,028
38	0,1007	0,0079	82,2	0,070	2152,0	0,022
39	0,0897	0,0063	97,5	0,044	2696,0	0,017
40	0,0799	0,0050	111,0	0,044	3400,0	0,014
41	0,0711	0,0040	126,8	0,035	4250,0	0,011
42	0,0633	0,0032	138,9	0,028	5312,0	0,009
43	0,0564	0,0025	156,4	0,022	6800,0	0,007
44	0,0503	0,0020	169,7	0,018	8500,0	0,005
45	0,0445	0,0015	–	0,014	11110,0	0,005
46	0,0380	0,0011	–	0,011	15130,0	0,003

ANEXO VIII – Tabela de Ímãs Permanentes Cilíndricos de Neodímio-Ferro-Boro (Formato de Disco)

DIMENSÃO (mm)	TIPO	DIMENSÃO (mm)	TIPO	DIMENSÃO (mm)	TIPO
Ø2x1,5	N35	Ø7,5x2,5	N35	Ø17,5x2,5	N35
Ø2x3	N35	Ø8x1	N35	Ø18x2	N35
Ø2,5x10	N35	Ø8x1,5	N35	Ø18x3	N35
Ø3x1	N35	Ø8x2	N35	Ø18x4	N35
Ø3x1,5	N35	Ø8x3	N35	Ø18x5	N35
Ø3x2	N35	Ø8x4	N35	Ø18x10	N35
Ø3x2,5	N35	Ø8x5	N35	Ø20x1,5	N35
Ø3x3	N35	Ø8x8	N35	Ø20x3	N35
Ø3x4	N35	Ø8x10	N35	Ø20x5	N35
Ø3x8	N35	Ø9,52x6,35	N35	Ø20x6	N35
Ø4x1	N35	Ø10x1,5	N35	Ø20x8	N35
Ø4x1,5	N35	Ø10x2	N35	Ø20x8	N42
Ø4x2	N35	Ø10x3	N35	Ø20x20	N35
Ø4x4	N35	Ø10x4	N35	Ø20x30	N35
Ø4x5	N35	Ø10x5	N35	Ø20x30	N42
Ø4x6	N35	Ø10x8	N35	Ø22x3	N35
Ø4x10	N35	Ø10x10	N35	Ø22x10	N35
Ø4x10 RADIAL	N35	Ø10x10	N42	Ø22x10	N42
Ø4,4x5 – 150°C	N35SH	Ø10x15	N35	Ø22x10 – 150°C	N42SH
Ø4,5x15	N35	Ø10x20	N35	Ø22x10	N48
Ø5x1	N35	Ø11,5x1,5	N35	Ø22x10	N50
Ø5x1,5	N35	Ø11x5	N35	Ø22x10	N52
Ø5x2	N35	Ø11x5	N35SH	Ø22x10 – 150°C	N35SH
Ø5x2,5	N35	Ø11x10	N35	Ø22x15	N35
Ø5x3	N35	Ø12x3	N35	Ø22x15	
Ø5x5	N35	Ø12x4	N35	Ø25x5	N35
Ø5x8	N35	Ø12x5	N35	Ø25x7	N35
Ø5x10	N35	Ø12,5x2	N35	Ø25x10	N35
Ø5x10 RADIAL	N35	Ø12,7x6,35	N35	Ø25,4x12,7	N35
Ø5x12 RADIAL	N35	Ø13x4	N35	Ø28x2	N35
Ø5x16 RADIAL	N35	Ø13x5	N35	Ø30x7	N35
Ø6x1,5	N35	Ø13x6	N35	Ø30x10	N35
Ø6x2	N35	Ø13x6	N35	Ø30x10	N42
Ø6x2	N42	Ø14x1,5	N35	Ø30x10	N48
Ø6x3	N35	Ø14x2	N35	Ø30x12	N35
Ø6x3	N42	Ø14x14	N35	Ø30x15	N35
Ø6x4	N35	Ø14x14	N42	Ø40x5	N35
Ø6x5	N35	Ø15x2	N35	Ø48x10	N35
Ø6x6	N35	Ø15x3	N35	Ø50x30	N35
Ø6x10	N35	Ø15x5	N35	Ø60x20	N35
Ø6x10 RADIAL	N35	Ø15x8	N35	Ø60x20	N35
Ø6x15 RADIAL	N35	Ø16x5	N35	Ø60x20	N42
Ø6,35x6,35	N35	Ø16x6,35	N35	Ø73x10	N35
Ø6,35x6,35	N42	Ø16x10	N35		