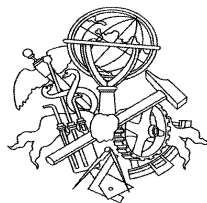


CONTROLO POR COMPUTADOR DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Ana Marta Maia Santos



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2011

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha da Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Candidato: Ana Marta Maia Santos, N° 1040183, 1040183@isep.ipp.pt

Orientação científica: Ramiro de Sousa Barbosa, rsb@isep.ipp.pt

Co-orientação científica: Isabel Maria de Sousa Jesus, isj@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

16 de Novembro de 2011

Aos meus Padrinhos,

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todos os que me ajudaram e apoiaram no desenvolvimento deste projecto.

Aos orientadores, Ramiro Barbosa e Isabel Jesus, pelo apoio, orientação e motivação para o desenvolvimento deste projecto, que foi de extrema importância para ultrapassar as adversidades encontradas durante o mesmo.

Aos meus colegas e amigos, Luís Teixeira, Tó Zé, Dário Osório, Pedro Madaleno, Susana Ferreira, Bruno Fernandes, Paula Sá, Juliana Sousa, Andreia Alves, Andrea Sousa, Dinis Santos que em muito me apoiaram, principalmente nos momentos de maior dificuldade souberam sempre prestar-me auxílio e animar-me para que pudesse sempre levar as coisas a “bom porto”, e nos momentos felizes souberam partilhar da minha felicidade.

Por fim, não poderia esquecer a família, dedicando este trabalho a quem tudo fez para que pudesse chegar ao fim de um ciclo da minha vida, proporcionando-me todas as condições necessárias para a realização de tal feito, os meus padrinhos. Não podendo também esquecer os primos, irmão, cunhada, tios, que sempre me incentivaram e nunca me deixaram baixar os braços. Às minhas queridas sobrinhas que em momentos menos bons me souberam dar um abraço, mesmo sem saber muito bem porquê e sem terem noção das coisas foram a minha alegria.

Sem esquecer quem já partiu, que tenho a certeza que teriam imenso orgulho de presenciar este momento, a minha avó do coração, Findinha, os meus avós, Jacinto e Alice, e a minha mãe, Zulmira, que estejam aonde estiverem tenho a certeza que muita força fizeram para que tudo corresse da melhor forma.

Resumo

Ao longo deste projecto são efectuados vários passos para a realização de um sistema de levitação magnética controlado por computador. O objectivo deste projecto é a levitação de um objecto de material ferromagnético.

Para a sua realização foi essencialmente necessário um electroímán, que exerce a força electromagnética sobre a bola, um circuito de potência para accionar o electroímán, um circuito sensor constituído por um LDR e por fim, o circuito constituído pelo PIC 18F4550. Para a comunicação entre o sistema e o PC foi estabelecida a comunicação série RS232.

No que concerne ao controlo do sistema, foi aplicado um controlador PD e um controlador em avanço, ambos projectados directamente no domínio digital, através do método do Lugar de raízes.

Posteriormente foi desenvolvida uma interface gráfica em ambiente MATLAB, para comunicação, via RS232, entre o PC e o sistema.

Palavras-Chave

Levitação magnética, electroímán, controlo, LDR, PID.

Abstract

This dissertation aims to implement a magnetic levitation system controlled by a computer. The objective is to levitate an object of ferromagnetic material.

The system consists on an electromagnet, which generates the electromagnetic force on the ball, a power circuit to actuate the electromagnet, a sensor circuit consisting of a LDR, and finally the microcontroller PIC 18F4550. For the communication between the system and the PC is used a RS232 serial communication.

In what concerns the control of the system, it was applied a PD controller and a lead controller, both designed directly in the digital domain, using the discrete root locus method.

Finally, it was developed an interface in MATLAB for the communication, via RS232, between the PC and the system.

Keywords

Magnetic levitation, electromagnet, control, PID, LDR.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ACRÓNIMOS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2. OBJECTIVOS.....	2
1.3. CALENDARIZAÇÃO	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1. PRINCÍPIOS FÍSICOS	5
2.2. TIPOS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA	9
2.3. PROJECTO MAGLEV	12
2.4. TURBINA EÓLICA.....	16
2.5. OUTRAS APLICAÇÕES	17
3. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA	21
3.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA	21
3.2. FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....	33
3.3. CIRCUITO DE COMUNICAÇÃO	34
3.4. MODELAÇÃO DO SISTEMA	38
3.5. INTERFACE GRÁFICA.....	47
4. CONTROLO DO SISTEMA	49
4.1. CONTROLADORES UTILIZADOS.....	49
4.2. DISCRETIZAÇÃO DOS CONTROLADORES	52
4.3. PROJECTO DO CONTROLADOR	59
5. TESTES E RESULTADOS	71
5.1. CONTROLADOR EM AVANÇO.....	71
5.2. CONTROLADOR PD.....	78

6.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	85
6.1.	ANÁLISE E CONCLUSÕES DOS RESULTADOS	85
6.2.	PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	88
	ANEXO A. HARDWARE	90
A.1.	PLACA – CIRCUITO ACTUADOR.....	90
A.2.	PLACA – CIRCUITO SENSOR	90
A.3.	PLACA – COMUNICAÇÃO E MICROCONTROLADOR	91
A.4.	DATASHEET LMD18201T.....	92

Índice de Figuras

Figura 1	Força magnética repulsiva (esquerda) e atractiva (direita) [19].....	6
Figura 2	Linhas do campo magnético de uma espira.....	8
Figura 3	Sentido do fluxo magnético num solenóide [12].....	9
Figura 4	Repulsão Magnética [20]	10
Figura 5	Esquema de forças implicadas na levitação por atracção [3].....	10
Figura 6	Cadeia de <i>Halbach</i> [13].....	11
Figura 7	Bobinas supercondutoras no interior do comboio [1]	12
Figura 8	Sistema de levitação do MAGLEV [2]	13
Figura 9	Sistema de curva do MAGLEV [2].....	13
Figura 10	Sistema de propulsão do comboio [1]	14
Figura 11	Sistema de levitação do TRANSRAPID [6]	14
Figura 12	Distância entre os diversos componentes [7]	15
Figura 13	Sistema de propulsão do TRANSRAPID [7]	15
Figura 14	Secções do motor na pista [7].....	16
Figura 15	Turbina eólica MAGLEV [14]	16
Figura 16	Distribuição uniforme da corrente [8]	18
Figura 17	Consequência da influência do campo magnético [8].....	18
Figura 18	Relação entre resistência e luminosidade [8]	19
Figura 19	Detecção da posição da esfera a partir de uma fonte luminosa e um LDR	19
Figura 20	(A) Fototransistores (B) Simbologia [21]	20
Figura 21	Diagrama de blocos do sistema	21
Figura 22	Microcontrolador PIC18F4550	22
Figura 23	Circuito Principal com PIC18F4550	23
Figura 24	Fluxograma do programa principal	24
Figura 25	Electroímã do sistema	25
Figura 26	Funcionamento PWM [22].....	25
Figura 27	Esquema do circuito de potência para levitação magnética	26
Figura 28	Controlo PWM <i>Sign/magnitude</i> [23]	27
Figura 29	Controlo PWM <i>Locked anti-phase</i> [23]	27
Figura 30	Saída de PWM no módulo CCPx	28
Figura 31	Registo <i>duty cycle</i>	29
Figura 32	Circuito de condicionamento de sinal	30
Figura 33	Amplificador de instrumentação INA128	30
Figura 34	Fonte regulável.....	33

Figura 35	Circuito para comunicação com o PC	35
Figura 36	Fluxograma da interrupção da USART	36
Figura 37	Sistema de controlo de levitação magnética.....	38
Figura 38	Tensão do LDR em função da distância do objecto ao electroíman.....	43
Figura 39	Tensão do LDR em função da distância do objecto ao electroíman com linearização em torno de $x_0 = 8$ mm	43
Figura 40	Varição da corrente no electroíman em função da tensão aplicada	45
Figura 41	Varição da corrente no electroíman em função da tensão aplicada com linearização em torno de $i_0 = 759$ mA	45
Figura 42	Diagrama de blocos do sistema de levitação	46
Figura 43	Estrutura do sistema de levitação magnética.....	46
Figura 44	Interface gráfica desenvolvida.....	48
Figura 45	Diagrama de blocos de um sistema de controlo com um controlador PID	50
Figura 46	Exemplo de um sistema de controlo em tempo contínuo	52
Figura 47	Exemplo de um sistema de controlo em tempo discreto	53
Figura 48	Implementação digital do controlo PID.....	57
Figura 49	Implementação digital do controlo em avanço.....	58
Figura 50	Diagrama de blocos do sistema de controlo	59
Figura 51	Diagrama de blocos equivalente do sistema de controlo.....	59
Figura 52	Lugar de raízes discreto.....	60
Figura 53	Lugar de raízes sistema	62
Figura 54	Resposta ao degrau do sistema	63
Figura 55	Lugar de Raízes com $\omega_n = 625$ rad/s (esquerda); Lugar de Raízes com $\omega_n = 325$ rad/s (direita).....	65
Figura 56	Lugar de raízes do sistema com $\omega_n=325$ rad/s.....	67
Figura 57	Resposta ao degrau do sistema	67
Figura 58	Lugar de raízes do sistema com $\omega_n=340$ rad/s.....	68
Figura 59	Resposta ao degrau do sistema com $\omega_n=340$ rad/s	69
Figura 60	Diagrama de blocos do sistema de controlo construído no Simulink.....	71
Figura 61	Resposta ao degrau do sistema com o controlador em avanço.....	72
Figura 62	Novo diagrama de blocos com novo controlador em avanço.....	73
Figura 63	Resposta ao degrau do sistema com o novo controlador em avanço.....	73
Figura 64	Posição da bola do sistema real	74
Figura 65	Objecto a levantar	75
Figura 66	Entrada de referência – Onda Sinusoidal em torno do ponto de equilíbrio.....	75
Figura 67	Posição da bola do sistema real com referência sinusoidal –	76
Figura 68	Entrada de referência - Onda quadrada em torno do ponto de equilíbrio.....	76
Figura 69	Posição da bola do sistema real com referência de onda quadrada de 0,1 mm	77
Figura 70	Entrada de referência em forma de onda quadrada de 0, 2 mm	77

Figura 71	Posição da bola do sistema real com referência de onda quadrada de 0,2 mm	78
Figura 72	Diagrama de blocos do sistema com o controlador PD.....	79
Figura 73	Resultado da simulação no SIMULINK	79
Figura 74	Resultado da simulação com alteração do ganho do controlador para $K = 38,7546$.	80
Figura 75	Resultado da experiência com referência igual a 8 mm	81
Figura 76	Resultado da experiência com referência em forma de onda sinusoidal de 0,2 mm	81
Figura 77	Resultado da experiência com referência em forma de onda quadrada de 0,1 mm.....	82
Figura 78	Resultado da experiência com referência em forma de onda quadrada de 0,2 mm.....	82
Figura 79	Resultado da experiência com referência em forma de onda quadrada com variação de 0,2 mm, mas com mais amostras do sinal recolhido	83
Figura 80	Resultado da experiência com referência em forma de onda sinusoidal com variação de 0,2 mm, mas com mais amostras do sinal recolhido	83
Figura 81	<i>Layout</i> da placa do circuito actuador.....	90
Figura 82	<i>Layout</i> da placa do circuito actuador.....	90
Figura 1	<i>Layout</i> da placa de comunicação e do microcontrolador	91

Índice de Tabelas

Tabela 1.	Calendarização do projecto	3
Tabela 2.	Características da fonte de alimentação	34
Tabela 3.	Procedimento de recepção de dados da USART	36
Tabela 4.	Medidas da tensão de saída do sensor em função da distância da esfera ao electroímã	42
Tabela 5.	Medidas da corrente que percorre o electroímã em função da tensão aplicada.....	44
Tabela 6.	Síntese da influência de cada acção do controlador PID.....	51
Tabela 7.	Resumo das três principais regras de discretização.....	55

Acrónimos

- A/D – *Analog-to-Digital Converter*
- Ampop – *Amplificador Operacional*
- CCP – *Capture, Compare and PWM*
- D/A – *Digital-to-Analog Converter*
- LDR – *Light Dependent Resistor*
- PWM – *Pulse Width Modulation*
- RISC – *Reduced Instruction Set Computing*
- PD – *Proporcional-Derivativo*
- PID – *Proporcional-Integral-Derivativo*
- USART – *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*

1. INTRODUÇÃO

Desde o final do século XIX que o tema levitação magnética começou a estar na actualidade do desenvolvimento tecnológico. Descobrir uma forma de contrariar a lei da gravidade, foi considerado, um grande avanço da ciência.

Desde então, a tecnologia da levitação magnética tem vindo a receber bastante atenção e está a ser largamente desenvolvida uma vez que, por exemplo, ajuda a eliminar perdas por atrito devido à não existência de contacto entre peças mecânicas, sendo este um aspecto de grande importância na levitação magnética.

A aplicação mais relevante da levitação magnética é o comboio, que se encontra em circulação no Japão, na China e na Alemanha já que, sendo um transporte de grandes dimensões e muito pesado, consegue atingir grandes velocidades. Estes comboios funcionam de duas maneiras diferentes, por atracção magnética e por repulsão magnética; estes dois fenómenos irão ser explicados mais à frente.

Uma das experiências mais populares da levitação é o sistema de levitação de um material ferromagnético através de um electroímã, que consiste em levantar o objecto e mantê-lo o mais estável possível. Para isso, é utilizado um electroímã que irá produzir uma força electromagnética de modo a suportar o peso da bola num ponto de equilíbrio.

Neste projecto de levitação magnética que irá ser apresentado no decorrer desta tese, o controlo do sistema é efectuado recorrendo a um controlador em avanço e a um controlador PD, implementados num microcontrolador (PIC18F4550), sendo também

desenvolvida uma interface gráfica em ambiente MATLAB. A medida da posição é efectuada a partir da utilização de um sensor fotoeléctrico (LDR).

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Há alguns anos atrás era impensável falar-se em levitação, ou na criação de algo que pudesse contrariar a lei da gravidade. A grande inovação foi na área dos transportes, nomeadamente a criação de um comboio que não precisava de carris para se deslocar, tendo sido designado de MAGLEV, o qual funciona tendo por base os princípios da levitação magnética. Existem três tipos de levitação magnética: levitação electrodinâmica utilizada no MAGLEV do Japão, levitação electromagnética utilizado, no TRANSRAPID da China e da Alemanha e ainda levitação por indução magnética, nomeadamente o sistema *Inductrack* que ainda se encontra em fase de testes, não existindo ainda nenhuma implementação à escala real.

Outra aplicação da levitação magnética, de bastante relevância, foi na área das energias renováveis, onde foi criada uma turbina eólica com utilização de ímanes permanentes. Esta aplicação baseia-se no facto da não existência de atrito entre os mecanismos, proporcionando um maior desempenho do sistema de energia, visto que, um vento de 1,5 m/s consegue gerar energia.

Para além destes sistemas, existem ainda outros que integram experiências e descobertas, ao nível da obtenção de conhecimento sobre controlo de sistemas baseados em levitação magnética.

1.2. OBJECTIVOS

O objectivo principal deste projecto é a levitação de uma esfera de material ferromagnético. Dada a complexidade inerente a este objectivo, sentiu-se a necessidade de o subdividir em múltiplas tarefas de realização mais simples, tais como:

- conhecimento do funcionamento do sistema de levitação magnética;
- escolha de sensores para detectar a posição da esfera;
- modelação do sistema;
- desenvolvimento do circuito sensor e do circuito actuador;
- desenvolvimento do controlo PID para o sistema.

No Capítulo 4, “Controlo do Sistema ”, é descrito todo o processo para a obtenção dos controladores digitais, bem como a sua implementação no sistema.

No Capítulo 5, “Testes e Resultados”, são descritas todas as simulações e todas as experiências efectuadas ao sistema de levitação.

Finalmente no Capítulo 6, “Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento Futuros”, são tecidas as principais conclusões decorrentes deste trabalho, bem como indicadas as perspectivas de desenvolvimentos futuros nesta área.

O anexo, apresenta os *layouts* das placas desenvolvidas.

2. ESTADO DA ARTE

Como é do conhecimento geral, há comboios que têm como princípio de funcionamento a levitação magnética. Existem vários tipos de levitação magnética por exemplo, os que são aplicados ao funcionamento do MAGLEV (Japão) e os que são aplicados ao TRANSRAPID (Alemanha). Os princípios de funcionamento da levitação magnética estão directamente relacionados com conceitos físicos que serão descritos de seguida.

2.1. PRINCÍPIOS FÍSICOS

A levitação magnética está associada aos princípios físicos do electromagnetismo.

A estabilidade de um sistema de levitação magnética é o seu factor crítico de funcionamento. Earshaw, postula no seu teorema [13]; dizendo que não é possível levantar de uma forma estável um sistema utilizando apenas campos electromagnéticos “clássicos”, estáticos e macroscópicos, pois as forças actuantes num objecto com a combinação dos campos gravitacional, electrostático e magnético irão tornar a posição do objecto instável.

Earshaw verificou que ao colocar 2 ímanes polarizados similarmente perto um do outro, estes repelem-se, e concluiu que não era possível realizar levitação estática de objectos (suspender estavelmente um objecto contra a força da gravidade) utilizando qualquer uma das configurações de ímanes permanentes fixos.

O teorema de Earshaw diz que a força estática pode ser descrita como função da posição $F(x)$ que actua num corpo sob vácuo e sobre a gravidade, pois o divergente do campo magnético e eléctrico será sempre zero, $div \mathbf{F} = 0$. Na posição de equilíbrio as forças devem ser zero. Se o equilíbrio é estável, a força deve apontar para o ponto de equilíbrio, e considerando que esteja aplicada sobre uma pequena esfera em volta desse ponto, obtemos, pelo teorema de Gauss a seguinte expressão [13]:

$$\oint_S \vec{F}(x) d\vec{S} = \int_V div \vec{F} dv \quad (1)$$

que nos diz que o integral da componente radial da força sobre a superfície deve ser igual ao integral do divergente da força sobre o volume interno, o qual é zero.

Este teorema é aplicado a corpos extensos e flexíveis, desde que não sejam diamagnéticos (materiais que são repelidos pelos ímanes).

Apesar de, à primeira vista, parecer difícil de contrariar o teorema de Earshaw, há diversos meios de contornar o que está suposto no teorema. Uma designação mais abrangente da levitação magnética, é a classificação de sistemas atractivos e repulsivos. A força magnética entre dois ímanes pode ser atractiva ou repulsiva, dependendo da polaridade dos ímanes. Pólos iguais repelem-se e pólos diferentes atraem-se, tornando-se possível criar sistemas onde a levitação ocorre devido à atracção ou a repulsão entre campos magnéticos, conforme ilustra a Figura 1.

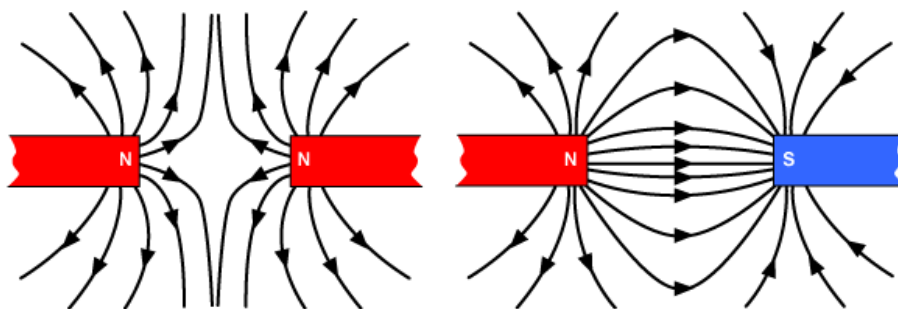


Figura 1 Força magnética repulsiva (esquerda) e atractiva (direita) [19]

Como referido anteriormente, existem diversas formas de contornar o que está descrito no teorema de Earshaw. Uma dessas formas é a realimentação (*feedback*), havendo a possibilidade de detectar a posição de um objecto e enviar um sinal para o controlo do

sistema, através da variação da força do electroíman, sendo assim possível levantar um objecto. Este método permite que a força magnética actuante no corpo seja mais forte quando está distante do electroíman, e que seja mais reduzida quando o corpo se aproxima do electroíman [13].

Outra forma de contrariar o teorema é o diamagnetismo. Os materiais diamagnéticos possuem campo magnético interior que se opõem ao campo magnético exterior, enfraquecendo-o, logo estes materiais têm poucas propriedades magnéticas, visto que a sua permeabilidade magnética é aproximadamente igual à permeabilidade do vazio. Um bom exemplo de materiais diamagnéticos são os supercondutores. A desvantagem dos supercondutores é a sua limitação no que concerne às baixas temperaturas necessárias para atingir o ponto de funcionamento. Têm ocorrido avanços no sentido de levar este tipo de materiais a funcionarem a temperaturas mais elevadas, havendo já um protótipo de comboio MAGLEV no Brasil, designado de MAGLEV Cobra.

2.1.1. ELECTROÍMAN

Para a construção de um sistema de levitação magnética de atracção é necessária a utilização de um electroíman que seja capaz de, gerar um campo magnético suficientemente forte para atrair um objecto. A passagem de uma corrente por um fio condutor gera na sua proximidade um campo magnético. Uma espira percorrida por corrente gera um campo magnético semelhante a um íman, i.e., com pólo norte, onde as linhas de fluxo magnético partem, e pólo sul onde as linhas de fluxo magnético chegam (Figura 2).

O campo magnético no centro de uma espira depende do raio da espira, da intensidade da corrente que a percorre e da permeabilidade magnética do meio, que quantifica a susceptibilidade de um elemento se magnetizar quando está sobre o efeito de um campo magnético. A lei de Biot-Savart é a lei que explica este fenómeno, permitindo calcular o valor do campo magnético gerado por uma espira.

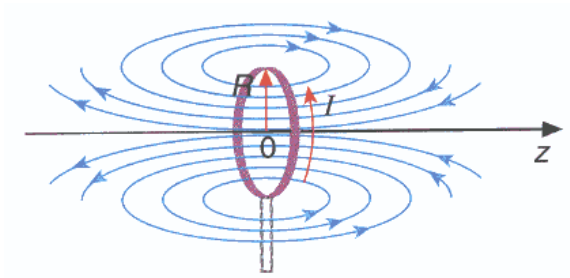


Figura 2 Linhas do campo magnético de uma espira

Para gerar um campo magnético intenso é necessário ter uma quantidade elevada de espiras. Para isso é bobinado fio num objecto cilíndrico, obtendo-se um solenóide. As espiras do solenóide produzem um campo com a mesma direcção e sentido, mas de módulo diferente, dependendo da sua distância relativamente ao núcleo.

O campo magnético dentro de um solenóide é aproximadamente uniforme e tem a expressão:

$$B = \frac{\mu NI}{L} \quad (2)$$

onde:

B – intensidade do campo magnético, que tem por unidade o Tesla (T);

μ – permeabilidade magnética do meio, e tem como unidade $\text{N}\cdot\text{A}^{-2}$;

N – número de espiras do solenóide;

I – corrente que percorre o solenóide, em amperes (A);

L – comprimento do solenóide, em metros (m).

A intensidade do campo magnético é uniforme no interior do solenóide, e é reduzida a metade nos extremos. Se o meio onde se encontra o solenóide for o ar, a permeabilidade magnética é identificada por μ_0 sendo igual a $4 \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$.

Os pólos do campo magnético do solenóide, dependem do sentido da corrente que o percorre. Ao inverter o fluxo de corrente, o fluxo do campo magnético inverte-se, e os pólos magnéticos do solenóide também são invertidos (Figura 3).

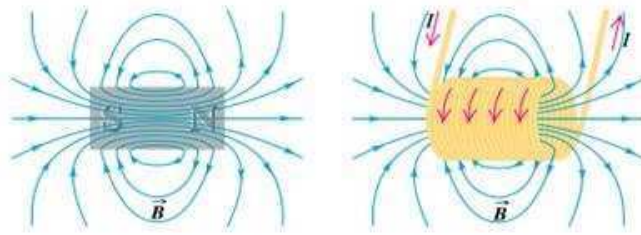


Figura 3 Sentido do fluxo magnético num solenóide [12]

A permeabilidade magnética do núcleo do solenóide é um factor de extrema importância, já que ao utilizarmos materiais que são mais susceptíveis a deixar fluir o campo magnético, o campo magnético gerado pelo electroímã aumenta drasticamente. A permeabilidade relativa de um material não é constante, e pode variar devido a diversos factores, como a frequência do campo aplicado, humidade ou temperatura. Apenas a permeabilidade magnética do vácuo ou do vazio é que possui um valor fixo já referido anteriormente.

A permeabilidade magnética relativa é a razão entre a permeabilidade magnética de uma substância, face à permeabilidade do vácuo, e é dado por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3)$$

Para obter um núcleo com elevada permeabilidade magnética, são utilizadas substâncias ferromagnéticas, que apresentam valores de permeabilidade magnética dezenas ou centenas de vezes superiores à do vácuo. Outras substâncias, nomeadamente ligas metálicas de elevada tecnologia ou metais quase puros, apresentam valores de permeabilidade magnética relativa na ordem dos milhares.

2.2. TIPOS DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Existem três tipos de levitação magnética que serão descritos ao longo desta secção, a saber: levitação electrodinâmica ou por repulsão magnética, levitação electromagnética ou por atracção magnética, sendo esta última o tipo de levitação utilizado neste projecto e por fim, levitação por indução magnética.

2.2.1. LEVITAÇÃO ELECTRODINÂMICA OU POR REPULSÃO MAGNÉTICA

A levitação por repulsão magnética consiste na utilização de bobinas com baixa resistência eléctrica, bobinas supercondutoras, capazes de criar fortes campos magnéticos. No caso

dos comboios, estas bobinas estão instaladas no seu interior induzindo uma corrente eléctrica nas bobinas que constituem a pista, o que gera nestas últimas um campo magnético induzido contrário ao que lhe foi aplicado, isto porque, os campos magnéticos e as respectivas correntes irão criar forças magnéticas que terão sentidos contrários, proporcionando a levitação do comboio pela força de repulsão magnética entre as bobinas da pista e as bobinas do comboio [1][2]. (ver Figura 4)

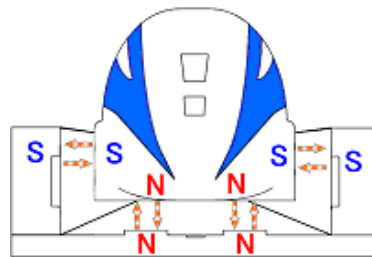


Figura 4 Repulsão Magnética [20]

2.2.2. LEVITAÇÃO ELECTROMAGNÉTICA OU POR ATRACÇÃO MAGNÉTICA

Na levitação por atracção magnética o corpo a ser levantado sofre a acção de duas forças: a Força magnética (F_m) e a Força gravítica (F_g). A F_m contraria o peso do objecto e coloca-o em suspensão como é ilustrado na Figura 5.

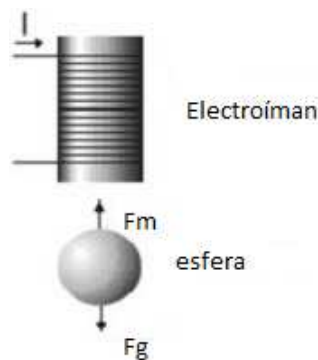


Figura 5 Esquema de forças implicadas na levitação por atracção [3]

De facto a F_m tem que ser suficientemente grande de forma a contrariar a força da gravidade. A dificuldade deste tipo de levitação magnética é a obtenção do equilíbrio entre as duas forças de forma a que F_m não seja muito elevada ao ponto do corpo ficar colado ao electroímã, ou muito pequena de forma a que o corpo não levite [4].

Para a obtenção desse equilíbrio é necessário que a corrente seja controlada permanentemente, tal como a distância do corpo ao electroímã, isto porque qualquer variação pode provocar a queda do objecto. Para se obter a levitação é necessário haver uma realimentação da corrente do electroímã, pois é a partir do controlo da corrente, e com a ajuda de um sensor, que é possível estabilizar o sistema [2]. Este tipo de levitação é aplicado ao sistema desenvolvido neste projecto.

2.2.3. LEVITAÇÃO POR INDUÇÃO MAGNÉTICA

O sistema associado a este tipo de levitação designa-se por *Inductrack*. Este sistema, ainda em fase experimental, tem a vantagem de não utilizar ímanes supercondutores ou electroímãs, utilizando ímanes permanentes à temperatura ambiente. Sob cada carruagem, existe uma cadeia rectangular de barras de ímanes, designada por cadeia de *Halbach* (Figura 6), disposta de forma a que a orientação magnética de cada barra faça um certo ângulo com a orientação magnética da barra seguinte. A disposição das barras gera um campo magnético muito forte, mas as linhas de campo anulam-se na direcção das carruagens. Para ocorrer levitação são colocadas nos carris várias bobinas isoladas entre si, numa disposição de circuito fechado, que ao serem induzidas magneticamente, induzem uma corrente e um campo magnético oposto ao da indução, o que resulta numa força de repulsão.

No sistema *Inductrack* a força de repulsão só ocorre quando o comboio se encontra a poucos quilómetros por hora. O início e o fim da marcha é efectuado da mesma forma que um comboio normal.

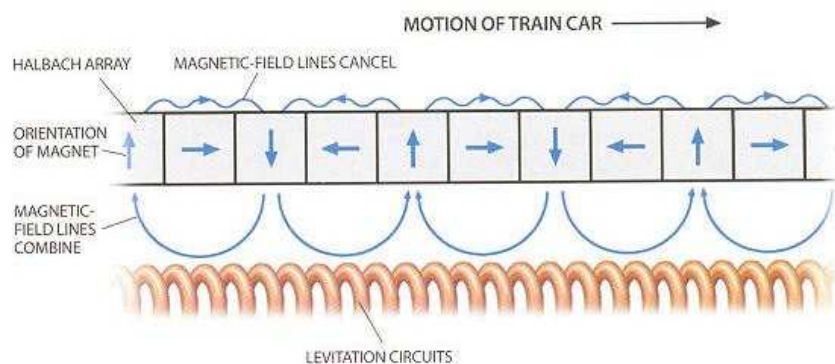


Figura 6 Cadeia de *Halbach* [13]

2.3. PROJECTO MAGLEV

Nesta secção serão descritos os três projectos em funcionamento, no Japão, na China e na Alemanha, que são baseados nos dois primeiros tipos de levitação magnética. Na China e na Alemanha os projectos são baseados na atracção magnética, já o comboio em funcionamento no Japão é baseado na repulsão magnética.

2.3.1. COMBOIO MAGLEV

O comboio MAGLEV, em funcionamento no Japão, levita segundo o método de repulsão magnética. Como explicado no ponto 2.2.1, a repulsão magnética ocorre devido à utilização de bobinas supercondutoras que possuem uma resistência baixa, sendo capazes de criar fortes campos magnéticos.

No caso específico do MAGLEV, existem bobinas no interior do comboio, designadas de bobinas supercondutoras, e bobinas na pista, designadas de bobinas de levitação. As bobinas supercondutoras ao passarem pelas bobinas de levitação, é lhes induzida uma corrente que faz com que estas bobinas ajam como electroímãs temporários.

Visto que as bobinas de levitação e as bobinas supercondutoras estão colocadas com uma configuração em “8” (Figura 7) permite que as bobinas supercondutoras se comportem como electroímãs, sendo atraídas pelos pólos opostos e repelidas pelos pólos com o mesmo nome (Figura 8). Assim se processa o princípio da levitação magnética no caso do comboio MAGLEV.

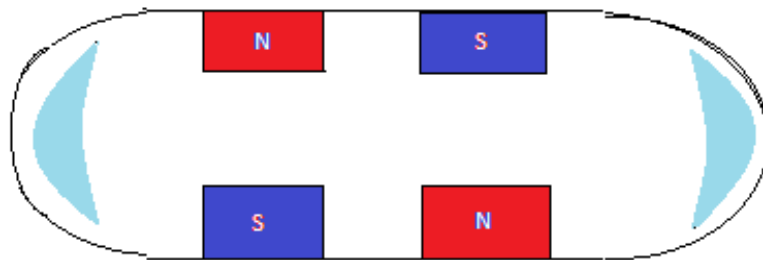


Figura 7 Bobinas supercondutoras no interior do comboio [1]

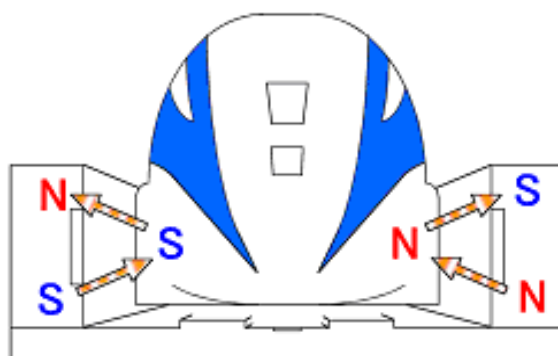


Figura 8 Sistema de levitação do MAGLEV [2]

Relativamente à forma encontrada para o MAGLEV conseguir efectuar as curvas, os fenómenos que lhe estão associados serão, todos os fenómenos descritos até ao momento, nomeadamente os baseados nos fenómenos físicos: campos magnéticos, a atracção e repulsão entre ímanes. Nesta parte do sistema, as bobinas de levitação estão interligadas pela parte inferior do comboio formando um *loop*. Quando o comboio se aproxima de um lado da pista é induzida uma corrente através do *loop*, o que provoca repulsão por parte da bobina de levitação do lado mais próximo do comboio e atracção por parte da bobina supercondutora do lado oposto (Figura 9) [1].

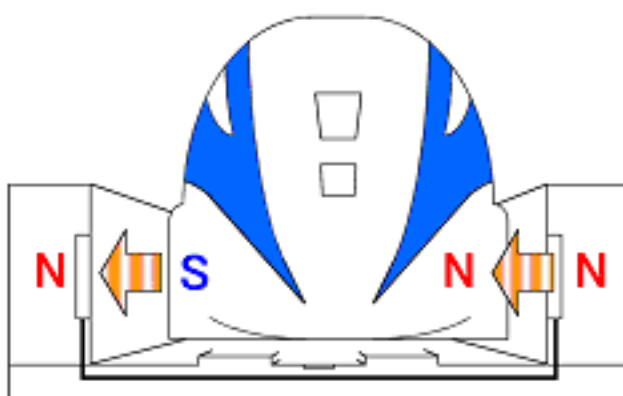


Figura 9 Sistema de curva do MAGLEV [2]

No que concerne ao sistema de propulsão do comboio, este baseia-se na força de atracção e repulsão entre os ímanes, sendo o *loop* responsável pela propulsão (Figura 10). As bobinas que constituem o *loop* são alimentadas por uma corrente trifásica, criando um campo magnético ao longo da pista. As bobinas supercondutoras são atraídas e repelidas por esses campos magnéticos em movimento, o que irá propulsionar o comboio [2].

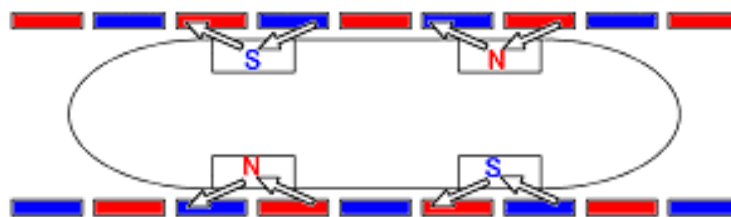


Figura 10 Sistema de propulsão do comboio [1]

2.3.2. COMBOIO TRANSRAPID

No caso do comboio TRANSRAPID (China e Alemanha) o funcionamento é efectuado a partir de levitação electromagnética (atração magnética), que consiste no controlo da força de atracção dos ímanes que constituem a pista e o comboio.

Controlado electronicamente, o suporte magnético localizado nos dois lados e ao longo de todo o veículo, fazem com que o veículo levite através do campo magnético criado entre o suporte magnético e o estator ferromagnético que se encontra montado na parte inferior da pista (Figura 11).

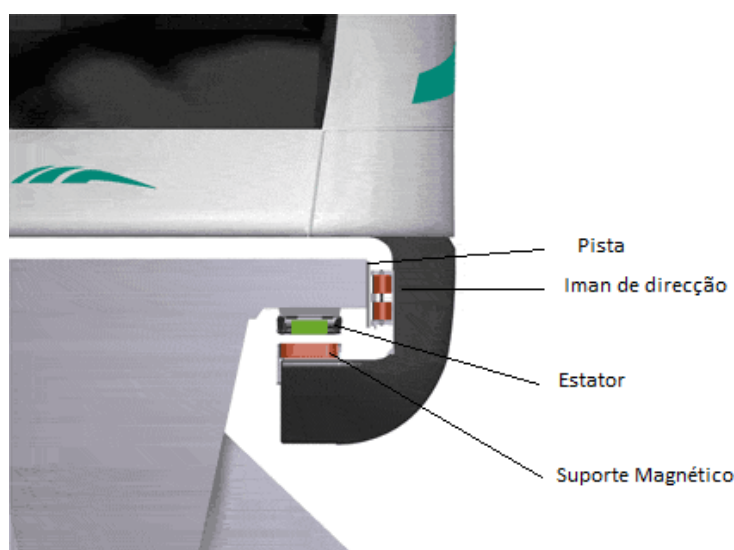


Figura 11 Sistema de levitação do TRANSRAPID [6]

Os ímanes de direcção localizados em ambos os lados e ao longo do veículo mantêm o veículo na pista. Os sistemas electrónicos garantem que a distância (Figura 12) entre o suporte magnético e o estator, e a distância entre os ímanes de direcção e a pista se mantenham constantes (aproximadamente 10 mm) [2][6].

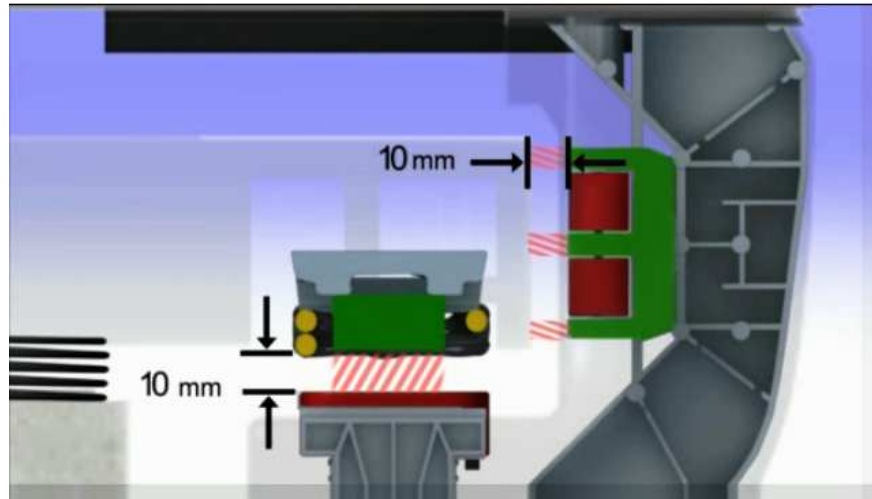


Figura 12 Distância entre os diversos componentes [7]

O sistema de levitação é suportado por baterias sendo por isso, independente do sistema de propulsão. O veículo é capaz de levitar uma hora sem energia externa. Durante a viagem as baterias são carregadas por um gerador linear integrado no suporte magnético.

Como foi dito anteriormente, o sistema de levitação é independente do sistema de propulsão (Figura 13). Este último, funciona do seguinte modo: um motor linear síncrono instalado na pista e no veículo (estator no veículo e rotor na pista), é alimentado por corrente alternada vinda da própria pista, gerando um campo electromagnético que propulsiona o veículo ao longo da pista. Se a direcção do campo magnético for alterada, o motor passa a comportar-se como gerador e trava o veículo. A energia proveniente da travagem pode ser enviada para a rede eléctrica [1][2][7].

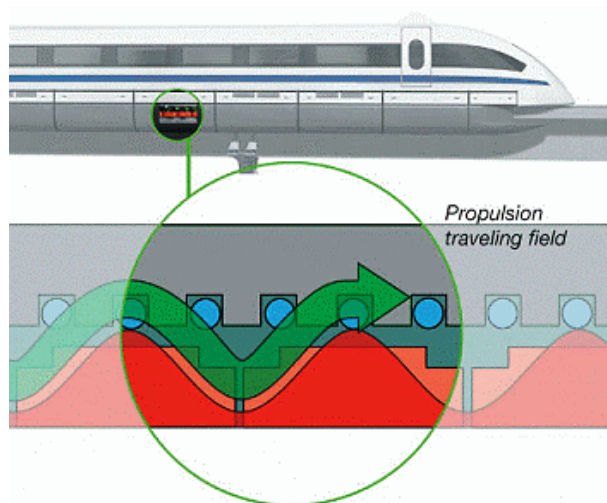


Figura 13 Sistema de propulsão do TRANSRAPID [7]

Como referido no parágrafo anterior, o motor está dividido em secções que são alimentadas consoante o veículo passa (Figura 14). Para tal acontecer, existem subestações instaladas nas diferentes secções, visto que os requisitos do sistema podem ser diferentes consoante a secção por onde o veículo passa. Isto porque, quando o veículo arranca ou trava a potência das subestações é maior do que nas secções onde a viagem é constante [1][7].

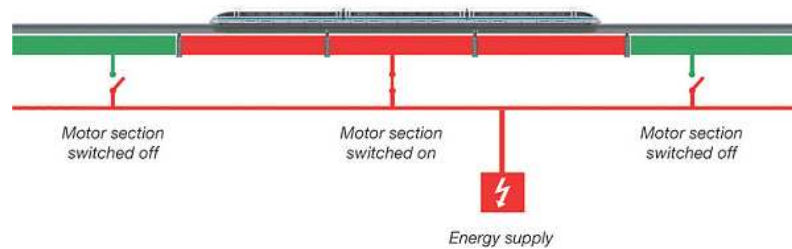


Figura 14 Secções do motor na pista [7]

2.4. TURBINA EÓLICA

A levitação magnética também pode ser aplicada às energias renováveis. Nesta área foi criada uma turbina eólica baseada nos princípios da levitação magnética (Figura 15). Este projecto nasce da necessidade, segundo os especialistas na área, das turbinas serem mais eficazes e gerarem electricidade com menor custo, tornando-se a energia eólica uma das principais fontes de geração de energia.



Figura 15 Turbina eólica MAGLEV [14]

Como é possível verificar a partir da Figura 15, o projecto desta turbina em nada se parece com uma turbina convencional, isto porque os princípios aplicados são diferentes aos de uma turbina tradicional.

No caso das turbinas tradicionais, as pás são sustentadas e giram sobre rolamentos. Nesta turbina as pás ficam suspensas acima da base do equipamento, sem contactos com outras partes mecânicas, logo sem atrito, o que faz com que o rendimento aumente.

A turbina utiliza ímanes permanentes e não electroímãs, pois estes últimos poderiam diminuir o seu rendimento, já que parte da energia gerada pela turbina iria ser utilizada para manter os electroímãs em funcionamento.

Segundo a fabricante (empresa MAGLEV - China), a turbina MAGLEV consegue gerar energia a partir de ventos com cerca de 1,5 m/s e suporta vendavais até 40 m/s, o equivalente a 144 km/h. A empresa MAGLEV revela ainda que, a turbina MAGLEV gera 20% mais de energia do que as turbinas tradicionais, com um custo de manutenção 50% menor. Segundo estimativas do fabricante, a turbina poderá funcionar, continuamente, durante 500 anos [14].

2.5. OUTRAS APLICAÇÕES

No que concerne a sistemas didácticos desenvolvidos, de onde foram retiradas várias ideias e alternativas para o desenvolvimento deste projecto, estes passam todos pelo mesmo objectivo, o de levitar uma bola ou outro objecto, sempre de material ferromagnético.

Durante o estudo de vários trabalhos, é possível verificar que a estrutura mecânica se mantém praticamente a mesma. Relativamente à estrutura eléctrica foram verificadas várias diferenças, principalmente no que toca ao circuito actuador do electroímã. Estas diferenças devem-se ao integrado usado para controlar a corrente do electroímã, o qual é sempre efectuado por PWM.

Relativamente ao circuito sensor é encontrado um maior leque de opções, isto devido ao facto de ser possível usar um sensor de efeito de hall, fototransistores ou LDR.

Os sensores de efeito de Hall, são sensores magnéticos que se baseiam no princípio de interacção entre campos magnéticos e cargas eléctricas.

Quando é introduzida corrente num material condutor, esta distribui-se uniformemente ao longo do material (Figura 16), não havendo diferença de potencial entre os lados do material.

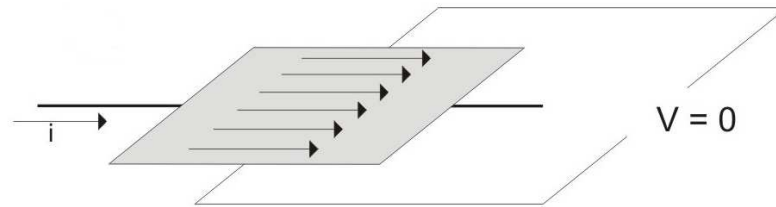


Figura 16 Distribuição uniforme da corrente [8]

Todavia, quando é aproximado um ímã, o seu campo magnético perturba a distribuição de corrente ao longo do material, devido à força de Lorenz, passando a haver uma acumulação de cargas negativas e positivas em regiões distintas, o que gera uma diferença de potencial. Quando é invertido o sentido do campo magnético, a tensão também é invertida (Figura 17) [8].

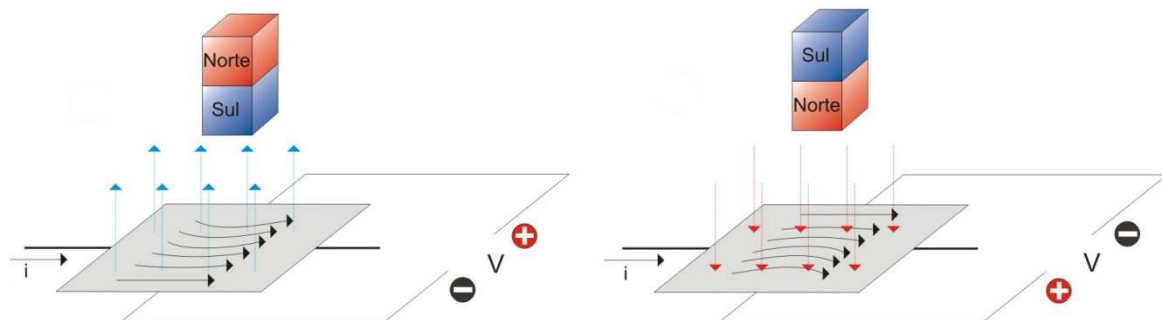


Figura 17 Consequência da influência do campo magnético [8]

A tensão obtida é descrita pelo efeito de Hall (V_H) que se traduz pela seguinte expressão:

$$V_H = \frac{-IB}{ne} \quad (4)$$

onde, I representa a corrente que percorre a placa, B a densidade de fluxo magnético, D a largura da placa, e a carga do electrão e n é a densidade de carga dos electrões do portador.

Outro sensor aplicado a este tipo de projecto é o LDR (*Light Dependent Resistor*). Um LDR é um dispositivo cuja resistência varia de acordo com a luminosidade. Quando é sujeito a luz intensa a sua resistência diminui gradualmente (Figura 18).



Figura 18 Relação entre resistência e luminosidade [8]

Neste tipo de sistemas, quando o LDR possui uma resistência baixa significa que a luminosidade a incidir sobre ele é muito elevada indicando que a esfera se está a afastar do electroímã, como ilustra a Figura 19.

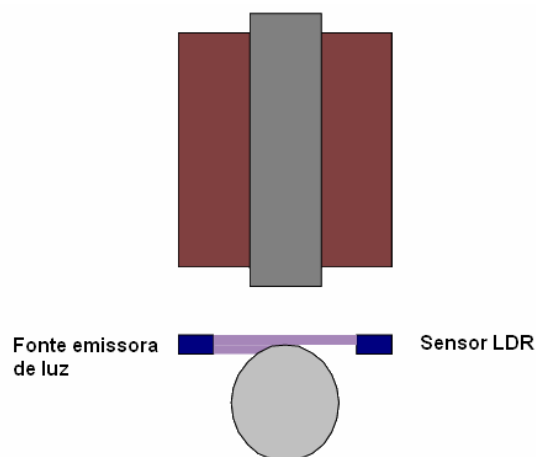


Figura 19 Detecção da posição da esfera a partir de uma fonte luminosa e um LDR

Uma das aplicações do LDR é na iluminação pública, onde é utilizado para que mediante a luminosidade ambiente as lâmpadas sejam ligadas ou desligadas automaticamente e não seja necessário alguém para as controlar.

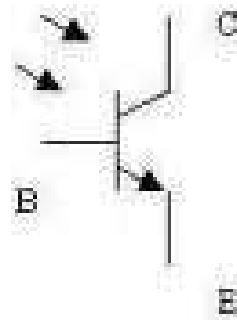
Relativamente aos fototransistores (Figura 20), são dispositivos sensíveis à luz, tal como os LDR. A base do fototransistor é sensível à luz logo, quando existe incidência de luz o transistor conduz, quando tal não acontece o transistor fica ao corte.

A corrente que circula na base depende apenas do fluxo luminoso incidente. Assim, na ausência de luz, a corrente na base será zero e o fototransistor estará ao corte, resultando uma tensão do colector igual à tensão de polarização V_{cc} . Quando a luz incide na base, a tensão no colector vai diminuir devido ao aumento da corrente.

A aplicação mais usual do fototransistor é a de interruptor. Se a luz incide na base, existe corrente no emissor, sem a incidência de luz a corrente no emissor é nula, sendo a tensão de saída zero [10].



A.



B.

Figura 20 (A) Fototransistores (B) Simbologia [21]

3. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

Neste capítulo é descrito o funcionamento do sistema e os diversos blocos que o constituem, estando presente no Anexo A, os vários *layouts* das placas de circuito impresso desenvolvidas no âmbito deste projecto.

3.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O diagrama de blocos do sistema implementado está ilustrado na Figura 21.

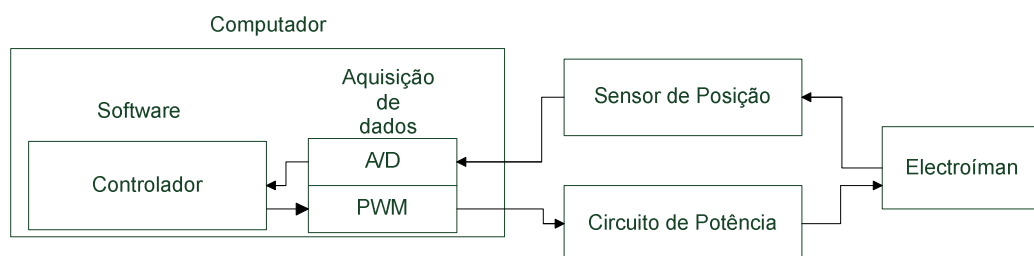


Figura 21 Diagrama de blocos do sistema

O objectivo deste projecto é manter um objecto de material ferromagnético a levitar. Para tal, é necessário um sensor óptico para ser possível conhecer a sua posição. O sinal do sensor é enviado para o conversor A/D (*Analog-to-Digital Converter*), e de seguida o

algoritmo de controlo implementado no computador actua no circuito de accionamento do electroímán, com o objectivo de regular a corrente a partir da posição do objecto.

3.1.1. MICROCONTROLADOR PIC18F4550

Para efectuar o controlo de todo o processo é utilizado o microcontrolador PIC18F4550 (Figura 22), alimentado a 5 V. Este microcontrolador é também utilizado

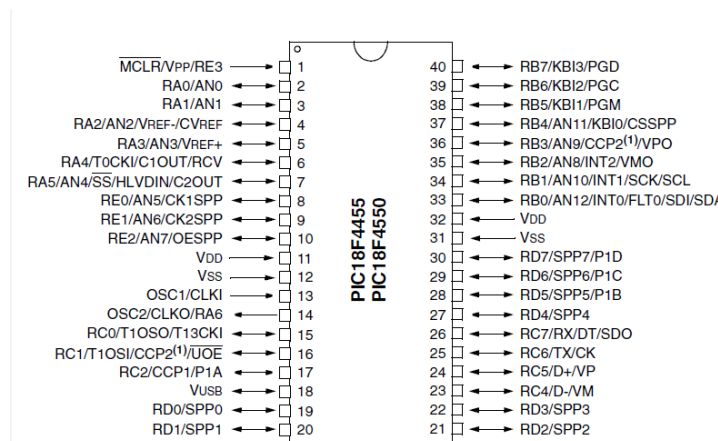


Figura 22 Microcontrolador PIC18F4550

para a conversão do sinal analógico para digital e para a geração do PWM.

O PIC18F4550 possui uma arquitectura de Harvard com instruções do tipo RISC (*Reduced Instruction Set Computing*), ou seja, é uma linha de arquitectura de processadores que favorece um conjunto simples e pequeno de instruções que levam aproximadamente a mesma quantidade de tempo a serem executadas.

Existem várias características deste microcontrolador que o torna adequado a este projecto [11], de entre as quais se destacam:

- Microcontrolador de 8 bits;
- 32 *kbytes* de memória *Flash*;
- 2048 *bytes* de memória RAM;
- 256 *bytes* de memória EEPROM;
- pode ser alimentado por tensões entre 4,4 V e 5,5 V;

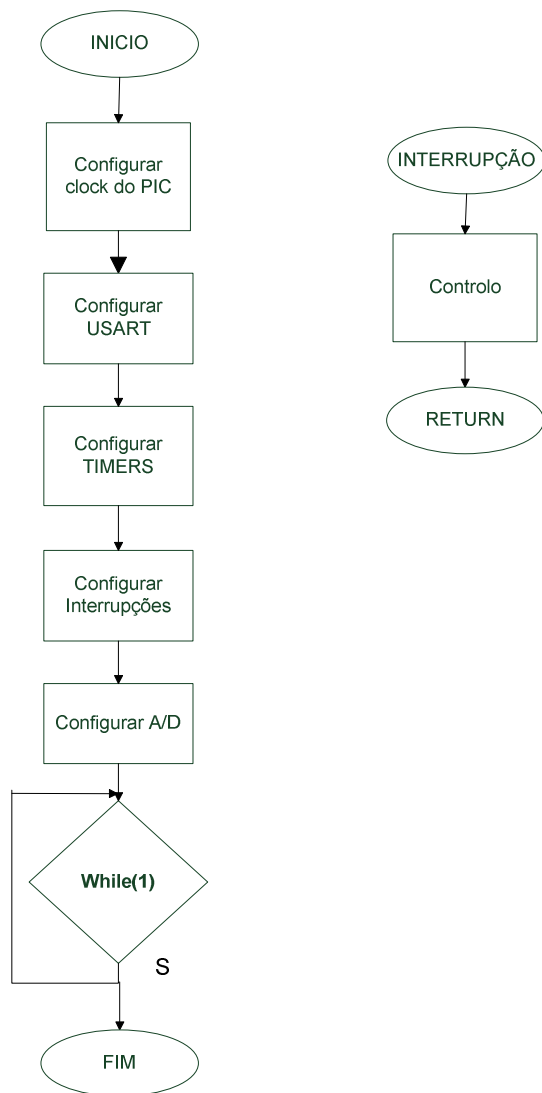


Figura 24 Fluxograma do programa principal

3.1.2. ELECTROÍMAN

O electroíman utilizado neste sistema (Figura 25) possui um núcleo de aço de zinco, com as seguintes características:

- 1800 espiras;
- resistência de 7,7 Ω ;
- indutância de 87,41 mH;
- comprimento de 8 cm.

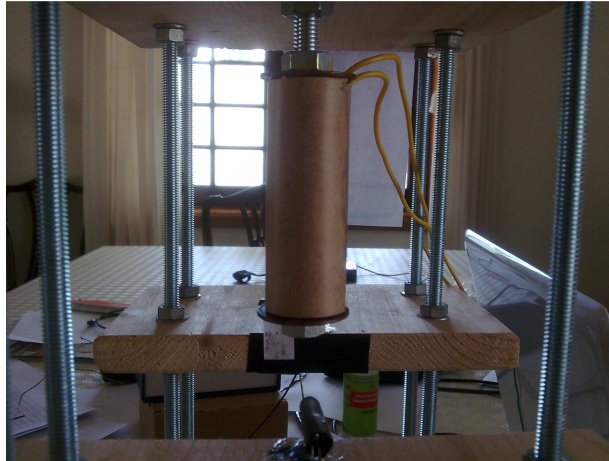


Figura 25 Electroíman do sistema

3.1.3. CIRCUITO DE POTÊNCIA

Neste circuito é aplicado um sinal PWM ao electroíman, sendo este gerado pelo microcontrolador a partir do *software* desenvolvido.

O sinal de PWM (Figura 26) vai variar consoante o valor de tensão recebido pelo A/D do microcontrolador, isto é, consoante o valor de tensão do sensor, o qual será menor quando o objecto se aproxima do electroíman e maior quando o objecto se afasta deste. O *duty cycle* do PWM também varia, aumentando ou diminuindo, consoante o valor de corrente necessário para sustentar o objecto.

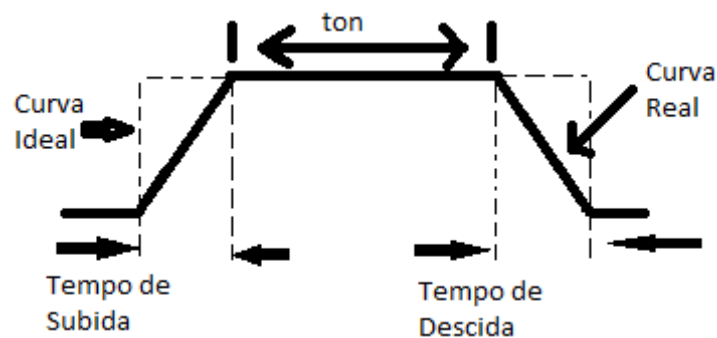


Figura 26 Funcionamento PWM [22]

A vantagem da utilização do PWM é o seu elevado rendimento, isto é, a dissipação de energia em forma de calor é muito reduzida. Tal situação deve-se ao facto de que os dispositivos usados no controlo não são capazes de abrir e fechar instantaneamente (Figura 26). Enquanto decorre o tempo de mudança de estado a sua resistência sobe. Neste intervalo de tempo a corrente não é nula, o que gera uma quantidade de calor razoável.

Mesmo com o problema referido, o rendimento do PWM é melhor que o ocorrido num circuito de controlo linear equivalente.

No desenvolvimento inicial deste projecto o circuito de potência foi implementado com uma ponte-H L298. Foi necessário efectuar a troca do circuito, devido ao aquecimento exagerado do integrado, que consequentemente influenciava o comportamento do electroíman.

Devido ao facto apresentado anteriormente, no circuito de potência é usada uma Ponte-H LMD18201 (ver Anexo A, subsecção A.4.). Este integrado suporta correntes até um máximo de 3 A. O esquema do circuito de potência usado para a levitação magnética está ilustrado na Figura 27. Este circuito é utilizado para o funcionamento do electroíman, sendo a corrente deste regulada a partir do sinal de PWM proveniente do módulo CCP (*Capture, Compare or PWM*) do microcontrolador PIC18F4550. Com este integrado, é possível aplicar dois tipos de PWM: *Locked Anti-Phase PWM* e *Sign/magnitude PWM*.

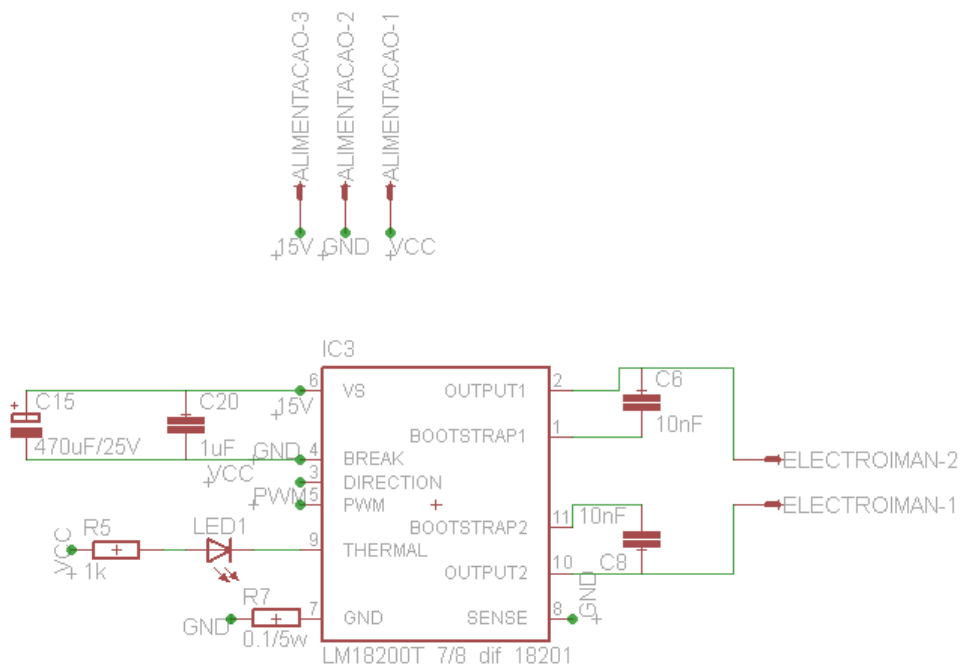


Figura 27 Esquema do circuito de potência para levitação magnética

Relativamente ao *sign/magnitude* PWM que é mostrado na Figura 28, o seu funcionamento é igual ao de um L298. Consoante o aumento do *duty-cycle*, a tensão

aplicada ao actuador também aumenta. O que pode variar é, consoante a ligação do pino DIRECTION, a corrente que circula numa direcção (de 1 para 2) ou na direcção oposta (de 2 para 1).

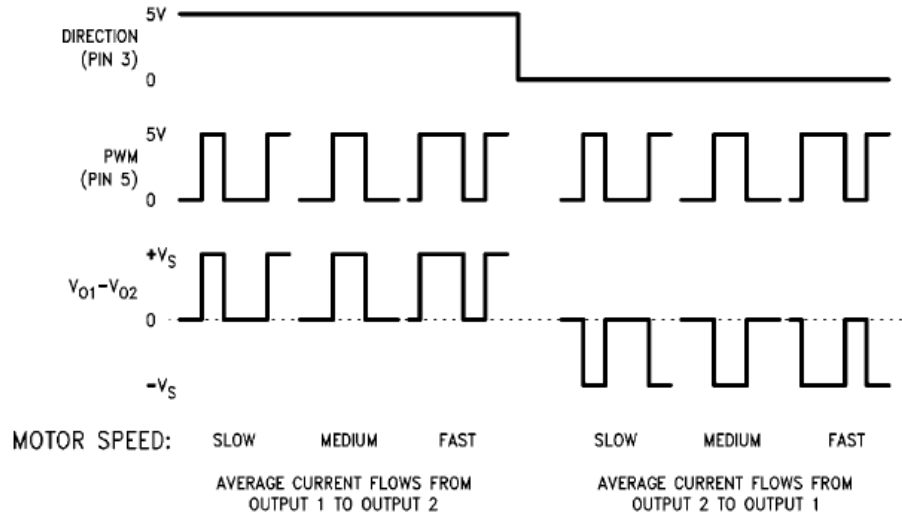


Figura 28 Controlo PWM Sign/magnitude [23]

No que respeita ao tipo de PWM designado por *locked anti-phase*, ilustrado na Figura 29, este inclui na modelação do sinal informações sobre o sentido da corrente aplicada à carga. Um sinal com *duty-cycle* de 50% representa 0 V de tensão. Variando o *duty-cycle* a menos ou a mais de 50%, haverá predominância de impulsos negativos ou positivos de modo a que a corrente circule num sentido ou noutro. Logo, neste tipo de circuito a corrente variará de -100% a 100%. Este tipo de controlo é bastante aplicado quando se trata de motores onde o sentido da corrente determina o sentido da rotação.

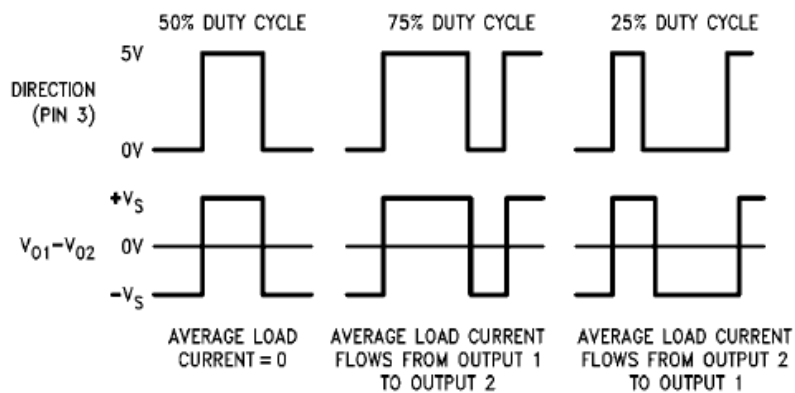


Figura 29 Controlo PWM Locked anti-phase [23]

Este integrado tem ainda a particularidade de poder funcionar como sensor de corrente, com a aplicação de uma resistência de baixo valor ligada à sua entrada SENSE (Pino 8), como mostra a Figura 27.

3.1.4. MÓDULO CCP PIC18F4550

Como foi referido, o electroímã é controlado por intermédio de um sinal PWM, o qual, neste caso, é gerado pelo módulo CCP do PIC18F4550 [11].

Este módulo é designado de “*Capture, Compare and PWM*” (CCP), mas neste projecto é usado apenas para gerar o sinal de PWM. Ao módulo CCP estão associados TIMERS, no caso do PWM (10 bits) este está associado ao TIMER2 (8 bits).

A modulação por largura de pulso (PWM) consiste em controlar o tempo em que o sinal permanecerá no nível alto (*duty cycle*), ou em outras palavras, controlar a largura de pulso dentro de um período de tempo pré-fixado (Período_PWM), como se pode verificar na Figura 30.

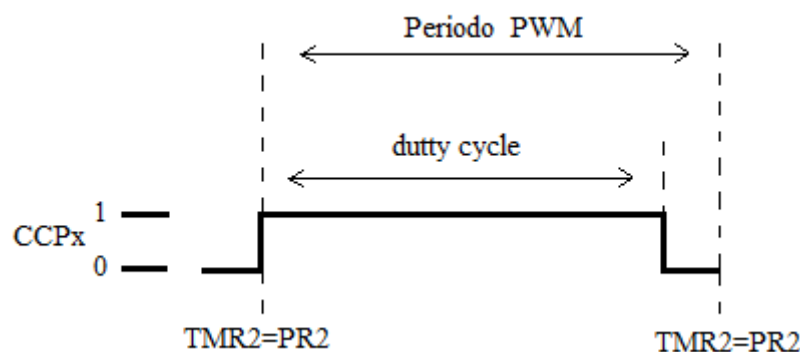


Figura 30 Saída de PWM no módulo CCPx

Quando o modo PWM é seleccionado, o TIMER2 é usado como fonte de relógio. O período de tempo do sinal (Período_PWM) é especificado pelo registo PR2, que pode ser calculado a partir de:

$$Período_PWM = \frac{[(PR2 + 1)] * 4 * (valor_prescaler_TMR2)}{F_{osc}} \quad (5)$$

O *duty cycle* é especificado pelos registos CCPRxL (8 bits mais significativos) e pelos bits CCCPxCPN<5:4> (2 bits menos significativos), conforme mostra a Figura 31.

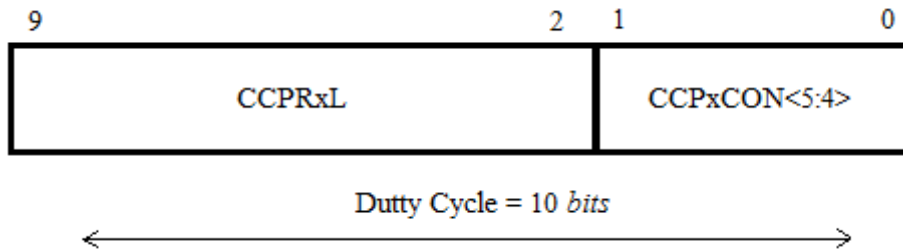


Figura 31 Registo *duty cycle*

O tempo de *duty cycle* pode ser calculado através da seguinte equação:

$$tempo_duty_cycle = \frac{(valor_duty_cycle) * (valor_prescaler_TMR2)}{F_{osc}} \quad (6)$$

Quando o valor do registo do *duty cycle* (10 bits) for igual ao TMR2 (8 bits), o pino CCPx será forçado para o nível baixo (Vss), de acordo com a Figura 30.

Para a configuração do sinal PWM foi executado o seguinte código:

```
OpenTimer2(TIMER_INT_OFF &T2_PS_1_16);
//PR2=255->T=((PR2+1)*4*prescale)/Fosc -> PR2-
8bits
OpenPWM2(255); //Periodo
```

3.1.5. SENSOR DE POSIÇÃO

O sensor utilizado neste projecto é um LDR (*Light Dependent Resistor*), cujo funcionamento foi já explicado na secção 2.4, sendo utilizado para detectar a posição do objecto a levantar, através da entrada do valor da tensão enviada pelo LDR para o conversor A/D do PIC.

Dado o intervalo de tensão aceite pelo A/D ser de 0-5 V e os valores fornecidos pelo LDR serem de 0,98-3,81 V, foi introduzido um circuito de condicionamento de sinal (Figura 32) constituído por uma Ponte de Wheatstone e um amplificador de instrumentação (INA128). Com a implementação deste circuito passamos a ter uma gama de saída do LDR de 0 V a exactamente 5 V.

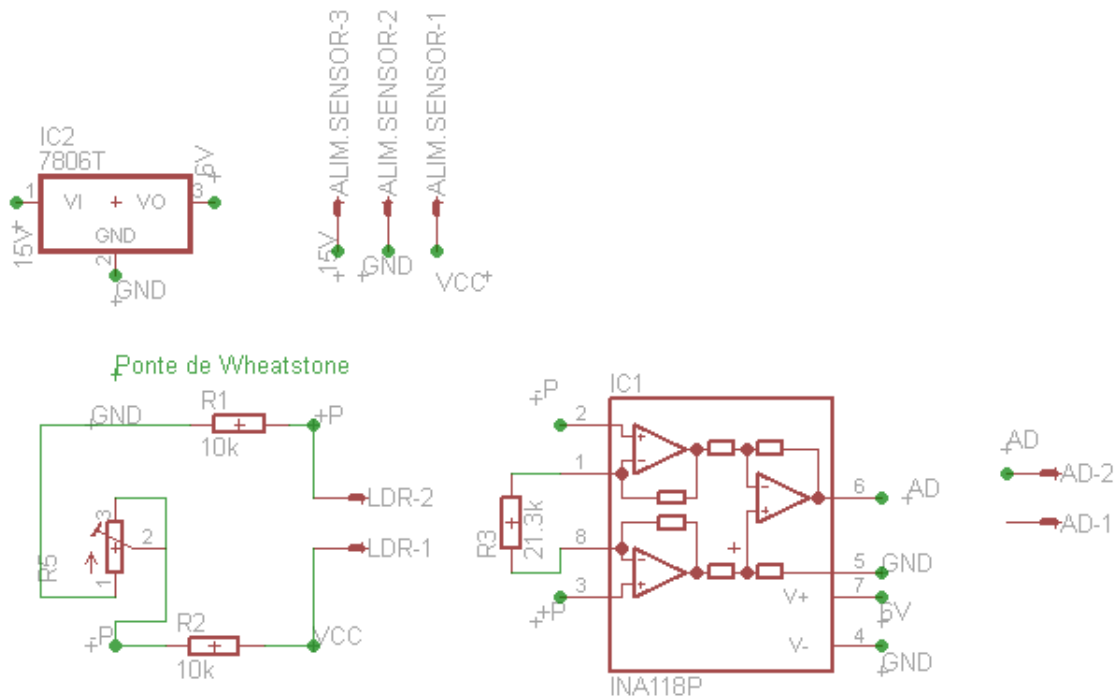


Figura 32 Circuito de condicionamento de sinal

No circuito da Ponte de Wheatstone, o potenciômetro regula a queda de tensão entre $-P$ e $+P$, isto é, consoante o valor da resistência do LDR, o potenciômetro é ajustado para um valor de tensão próximo do desejado.

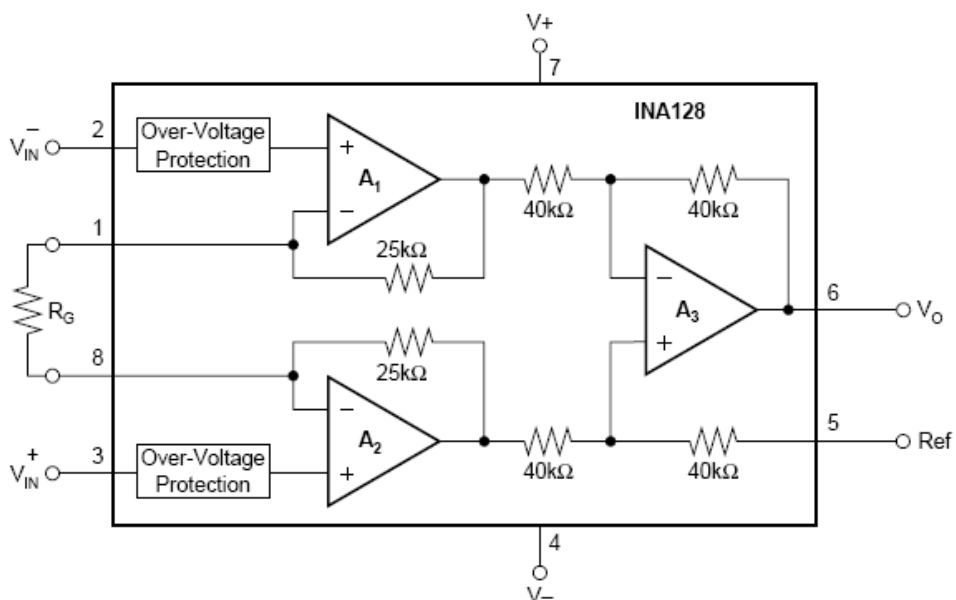


Figura 33 Amplificador de instrumentação INA128

O amplificador de instrumentação (Figura 33) é necessário para amplificar a tensão obtida da ponte de Wheatstone. Os dois terminais da ponte de Wheatstone são ligados aos dois primeiros amplificadores operacionais que amplificam o sinal, amplificação essa definida pela resistência R_G (resistência que altera o ganho da montagem); estes por sua vez, têm as suas saídas ligadas a outro amplificador operacional, onde é possível ajustar o valor desejado na saída a partir do valor das resistências. No caso da utilização do INA128 apenas nos é possível alterar a resistência R_G .

A tensão de saída do amplificador de instrumentação é dada por:

$$V_o = \left(1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \right) V_{ld} \quad (7)$$

onde $V_{ld} = +P - (-P)$ é a diferença de potencial à entrada do amplificador de instrumentação. O ganho do amplificador é dado por:

$$A_d = \left(1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \right) \quad (8)$$

É utilizado o amplificador de instrumentação numa montagem tipo diferencial para amplificar os sinais de pequena amplitude provenientes de sensores. Para evitar a perda da força do sinal, a impedância de entrada tem que ser alta, caso contrário irá sobrecarregar o sensor e o sinal proveniente deste seria praticamente zero. Devido a estes factores a resistência de entrada entre os dois terminais tem que ser elevada, e a montagem que oferece essa vantagem é a utilizada neste projecto.

3.1.6. AQUISIÇÃO DE DADOS

Um conversor A/D converte grandezas analógicas em valores digitais que podem variar entre 0 e $(2^n - 1)$, em que n é o número de *bits*. O A/D é definido pela sua resolução, tensão de referência, tempo de aquisição e tempo de conversão.

O conversor A/D do PIC18F4550 [11] possui 13 canais analógicos, com resolução de 10 *bits* e tensão de referência, tempo de aquisição e tempo de conversão configuráveis.

Relativamente à tensão de referência, esta pode ser definida pela tensão de alimentação do circuito, ou pelos pinos VREF- e VREF+ do microcontrolador.

O tempo de aquisição do módulo A/D pode ser configurado para ser gerado automaticamente ou manualmente. Se o tempo de aquisição for seleccionado por modo manual, quando um comando de conversão é executado a aquisição é interrompida e a conversão é iniciada. O tempo de aquisição requerido entre a selecção da entrada e o início da conversão deve ser assegurado pelo utilizador. Se o tempo de aquisição for definido como automático, o conversor A/D amostra a entrada por um período de tempo pré-determinado, e automaticamente iniciará a conversão.

A principal vantagem do tempo de aquisição automático, é não haver preocupação de assegurar o tempo de aquisição entre a selecção do canal e o início da conversão. Esse tempo tem várias configurações possíveis, umas das quais dada como $20T_{AD}$, em que T_{AD} é o tempo de conversão de cada *bit*, e deve estar compreendido entre $0,7 \mu\text{s}$ e $25 \mu\text{s}$. O tempo de conversão pode ser calculado através da expressão:

$$T_{AD} = \frac{1}{\text{fonte_clock_AD}} \quad (9)$$

Para a conversão do sinal binário para tensão (V) é usada a seguinte fórmula:

$$\text{valor}_{AD} = \frac{V_{\text{referencia}} * V_{\text{binario_AD}}}{(2^{\text{resolucao}} - 1)} \quad (10)$$

De seguida são apresentados dois possíveis excertos de código para a configuração do A/D do PIC18F4550.

```
OpenADC(ADC_FOSC_16 & ADC_RIGHT_JUST & ADC_4_TAD,
ADC_CH1 & ADC_INT_OFF & ADC_VREFPLUS_VDD &
ADC_VREFMINUS_VSS, ADC_2ANA);
```

ou:

```
ADCON0=0b00000011; //canal AN0
ADCON1=0b00001101; //AN0, AN1
ADCON2=0b10010101; // TAD/4 e FOSC/16

SetChanADC(ADC_CH0); //Configura o canal AN0
```

3.2. FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Um dos factores que viabilizam o funcionamento autónomo do sistema é o facto de todos os componentes serem alimentados apenas por uma fonte de tensão. Ter uma alimentação única torna o sistema mais compacto e de fácil utilização, tendo em conta que necessita apenas de uma ficha eléctrica.

A alimentação de todo o circuito é de 15 V, e a corrente máxima é de 2,2 A. A alimentação é feita por uma fonte regulável (Figura 34), havendo a possibilidade de alteração da tensão e respectiva corrente como indicado na Tabela 2. A tensão e a corrente são suficientes para a alimentação do electroímã (a força de atracção do electroímã a 15 V é elevada).



Figura 34 Fonte regulável

Tabela 2. Características da fonte de alimentação

Tensão	Corrente
12 V	2,5 A
13 V	2,4 A
14 V	2,3 A
15 V	2,2 A
16 V	2,1 A
17 V	2,0 A
18 V	1,95 A
19 V	1,90 A
20 V	1,85 A
21 V	1,8 A
22 V	1,75 A
23 V	1,7 A
24 V	1,65 A

3.3. CIRCUITO DE COMUNICAÇÃO

Para o envio de dados do PIC18F4550 foi utilizada a comunicação série, utilizando o protocolo RS232. Como os níveis usados pelo PIC e o PC são diferentes (o PIC utiliza níveis TTL e o PC níveis RS232), foi necessária a utilização de um conversor MAX232 (Figura 35).

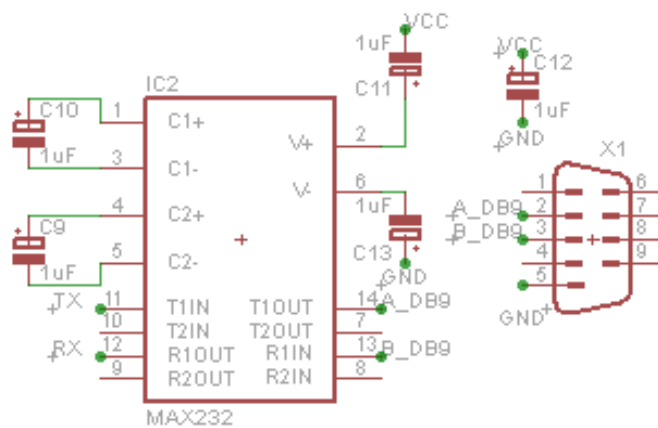


Figura 35 Circuito para comunicação com o PC

O protocolo escolhido para a implementação da comunicação foi o RS232, devido à facilidade de implementação, quer do ponto de vista do *hardware* quer do *software*.

A necessidade da utilização desta interface advém do facto da incompatibilidade de níveis de tensão existentes entre a porta série de um PC e a porta série de um microcontrolador.

A comunicação RS232 é muito utilizada para a comunicação entre um computador e um dispositivo. Este protocolo é normalizado em todos os computadores pessoais, cuja maioria inclui até duas portas série RS232.

A comunicação efectuada entre o PIC e o PC é feita nas duas direcções, transmissão e recepção. No que diz respeito à transmissão, esta é efectuada continuamente, o que significa que o PC recebe constantemente os dados a serem transmitidos pela PIC, neste caso é o resultado da leitura do sensor, sendo o valor lido enviado pelo A/D. Relativamente à recepção da USART, esta é feita por intermédio de uma interrupção, como está representado na Tabela 3 e na Figura 36.

Seguindo a lógica da Tabela 3, foi possível criar um fluxograma representado na Figura 36, para melhor compreensão deste método de transmissão de dados.

Tabela 3. Procedimento de recepção de dados da USART

Valor a transmitir	Caracter de Controlo	Número de dados	Exemplo
Pólo	'P'	6	P0.5674
Zero	'Z'	6	Z0.8643
Referência Linear	'R'	5	R0.007
Referência Sinusoidal	'S'	0	S
Referência Quadrada	'Q'	0	Q
Ganho	'G'	7	G13.0582

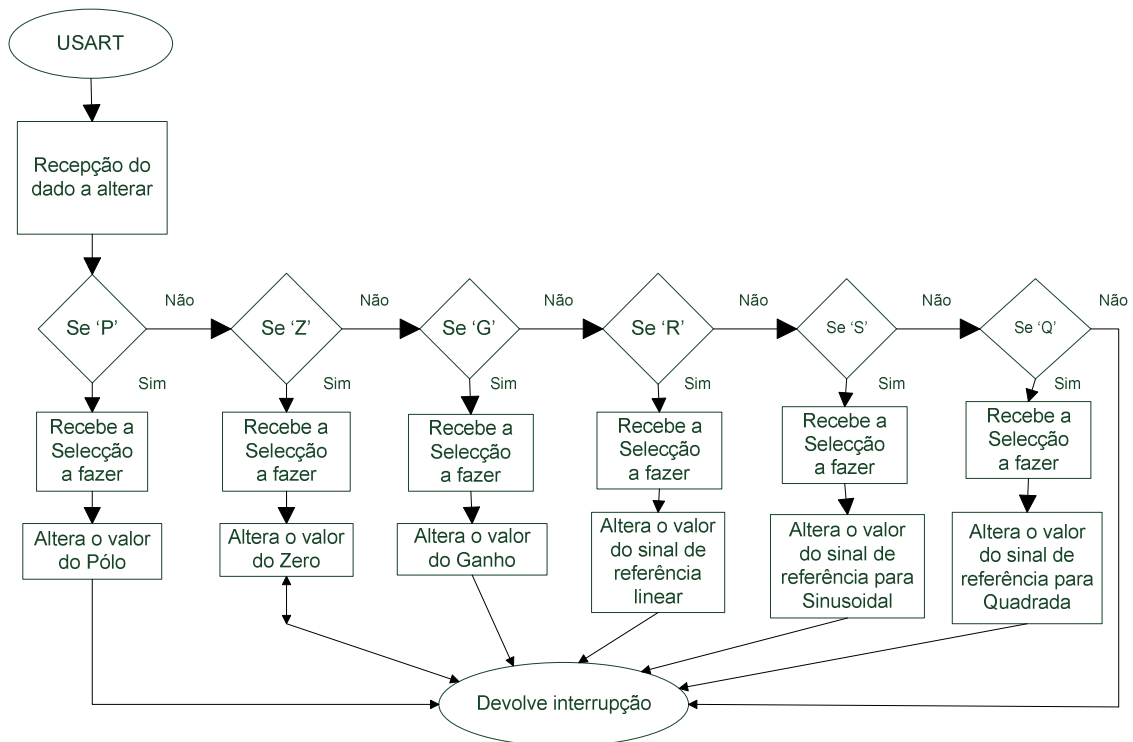


Figura 36 Fluxograma da interrupção da USART

De seguida é apresentado o excerto de código correspondente à interrupção de recepção da USART.

```

void ISR_alta_prioridade(void);
#pragma code int_alta=0x08
void int_alta(void)
{
    _asm GOTO ISR_alta_prioridade
    _endasm
}
#pragma code
#pragma interrupt ISR_alta_prioridade
void ISR_alta_prioridade(void)
{
    if (PIR1bits.RCIF == 1)
    {
        getsUSART(c,1);
        switch(c[0])
        {
            //---- ZERO -----
            case 'Z':
                getsUSART(&z,6);
                zero=atof(&z); //string_to_float
                break;
            //---- GANHO -----
            case 'G':
                getsUSART(&G,6);
                ganho=atof(&G); //string_to_float
                break;
            //----- POLO-----
            case 'P':
                getsUSART(&p,6);
                polo=atof(&p); //string_to_float
                break;
            //---- ONDA SINUSOIDAL ----
            case 'S':
                xref=sinusoide[j];
                v_ref=Ks*xref+v0;
                v_ref=1000.0*v_ref;
                break;
            //--- ONDA QUADRADA -----
            case 'Q':
                xref=quadrada[j];
                v_ref=Ks*xref+v0;
                v_ref=1000.0*v_ref;
                break;
            //--- POSIÇÃO REFERENCIA -----
            case 'R':
                getsUSART(&ref,5);
                xref=atof(&ref); //string_to_float
                v_ref=Ks*xref+v0;
                v_ref=1000.0*v_ref;
                break;
        }
    }
}

```

3.4. MODELAÇÃO DO SISTEMA

O sistema de controlo de levitação magnética utilizado está representado na Figura 37.

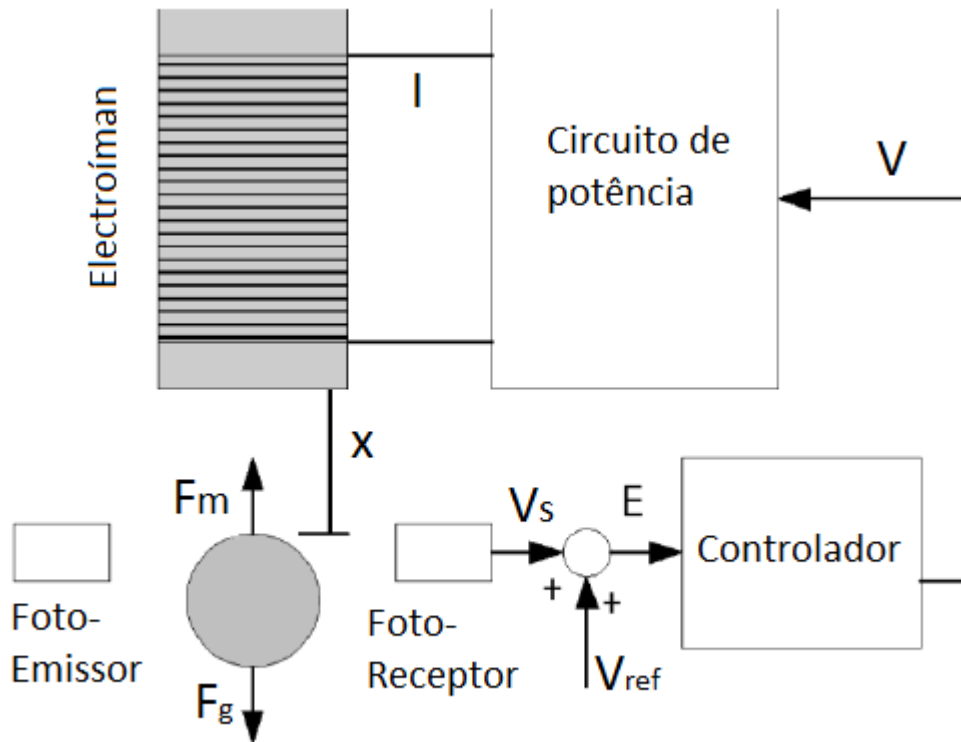


Figura 37 Sistema de controlo de levitação magnética

A força magnética (F_m) gerada pelo electroímã depende da corrente i que o percorre, e da distância x entre o objecto e o electroímã. Este sistema está dividido em dois subsistemas, o sistema eléctrico, relacionado com o electroímã, e o sistema mecânico, correspondente às forças exercidas no objecto.

Para o sistema eléctrico, a equação é dada por:

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (11)$$

Em que $v(t)$ e $i(t)$ são, respectivamente a tensão e a corrente que percorrem o electroímã, L é a indutância do electroímã e R a sua resistência.

Para o sistema mecânico, a equação correspondente é:

$$F(t) = F_g(t) - F_m(t) \quad (12)$$

Em que F é a resultante das forças aplicadas no objecto, F_g a força gravitacional e F_m a força electromagnética.

Admite-se que a força gravitacional é positiva na direcção vertical em sentido ao centro da Terra, convenção também válida para a posição do corpo em relação à base do electroíman. Aplicando a segunda lei de Newton ao diagrama de forças, obtém-se a equação (13):

$$m \frac{dx^2}{dt^2} = mg - f(x, i) \quad (13)$$

A força magnética é dada por:

$$f(x, i) = k \left(\frac{i}{x} \right)^2 \quad (14)$$

A aproximação linear obtida em torno do ponto de equilíbrio é dada por uma expansão em série de Taylor:

$$f(x, i) = f(x_0, i_0) + \frac{df}{dx_{(x_0, i_0)}} (x - x_0) + \frac{df}{di_{(x_0, i_0)}} (i - i_0) \quad (15)$$

Os valores de i_0 e de x_0 correspondem à corrente e à posição em que o objecto está a levitar. Assim:

$$f_0 = f(x_0, i_0) = k \left(\frac{i_0}{x_0} \right)^2 \quad (16)$$

resulta em:

$$f(x, i) = k \left(\frac{i_0}{x_0} \right)^2 - 2k \left(\frac{i_0^2}{x_0^3} \right) x(t) + 2k \left(\frac{i_0}{x_0^2} \right) i(t) \quad (17)$$

Quando o objecto está no ponto x_0 , posição de equilíbrio:

$$mg = f_0 = k \left(\frac{i_0}{x_0} \right)^2 \quad (18)$$

resultando em:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -2k \frac{i_0}{x_0^2} i(t) + 2k \frac{i_0^2}{x_0^3} x(t) \quad (19)$$

Substituindo:

$$k_1 = 2k \frac{i_0}{x_0^2}, k_2 = 2k \frac{i_0^2}{x_0^3} \quad (20)$$

obtém-se:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -k_1 i(t) + k_2 x(t) \quad (21)$$

De referir que as unidades do k_1 são [N/A] e do k_2 [N/m] correspondendo a variações pequenas da corrente e da posição do objecto em relação ao electroímã, que ocorrem na região de estabilidade do sistema.

Aplicando a transformada de Laplace à equação (21) obtém-se:

$$\frac{X(s)}{I(s)} = -\frac{k_1}{ms^2 - k_2} \quad (22)$$

Para um adequado dimensionamento do sistema é necessário saber o valor de x_0 e de i_0 , onde x_0 é a posição desejada e i_0 a corrente que percorrerá o electroímã nessa situação. É também necessário o conhecimento do valor da indutância e da resistência do electroímã, bem como o da massa do objecto a levitar.

A massa do objecto é de 44,6389 g. Para $x_0 = 0,8$ cm, a tensão do electroímã é de 6,13 V e a corrente que o percorre de 759 mA.

Com todos estes valores é possível calcular os parâmetros k , k_1 e k_2 :

$$k = mg \left(\frac{x_0}{i_0} \right)^2 \Rightarrow k = 0,0446389 \times 9,81 \left(\frac{0,008}{0,759} \right)^2 \Rightarrow k = 4,86496 \times 10^{-5} \quad (23)$$

$$k_1 = \left(2k \frac{i_0}{x_0^2} \right) = 2 \times 4,86496 \times 10^{-5} \left(\frac{0,759}{0,008^2} \right) = 1,1539 \quad (24)$$

$$k_2 = \left(2k \frac{i_0^2}{x_0^3} \right) = 2 \times 4,86496 \times 10^{-5} \left(\frac{0,759^2}{0,008^3} \right) = 109,4769 \quad (25)$$

Depois de calculados os valores destes parâmetros, podemos definir a função de transferência do sistema, tal como fornecido nas equações (26) e (27).

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{-1,1539}{0,0446389s^2 - 109,4769} \quad (26)$$

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{-25,8497}{(s - 49,52)(s + 49,52)} \quad (27)$$

Como é possível constatar pela equação (27), existe um pólo positivo, logo o sistema é instável. Para ser possível estabilizar o sistema é necessária a aplicação de um controlador.

De acordo com a Figura 37, o circuito de potência que tem como entrada uma tensão, neste caso referente à variação do *duty-cycle* do PWM, e tem como saída a corrente que percorre o electroímã, funciona como um conversor tensão-corrente. Este conversor contém um ganho que poderá ser obtido através da linearização do comportamento do LMD18201T. O mesmo acontece com o foto-receptor, que irá variar a tensão de saída em relação à distância do objecto ao electroímã. O ganho do actuador será designado por K_a e o ganho do sensor por K_s . Estes ganhos serão obtidos na secção seguinte.

3.4.1. OBTENÇÃO DOS GANHOS K_s E K_a

Para obtenção dos ganhos K_s e K_a foi necessário efectuar medições dos circuitos do sensor e do actuador, a fim de obter as respectivas relações.

A Tabela 4 e a Figura 39 apresentam os valores da tensão de saída do sensor (já com o condicionamento de sinal) em função da distância da esfera ao electroímã.

Tabela 4. Medidas da tensão de saída do sensor em função da distância da esfera ao electroíman

Distância (m)	LDR (V)
0,000	0,1173
0,001	0,1173
0,002	0,1173
0,003	0,1173
0,004	0,1173
0,005	0,1173
0,006	0,8651
0,007	2,3803
0,008	3,2893
0,009	4,1935
0,010	4,8045
0,011	5,0000
0,012	5,0000
0,013	5,0000

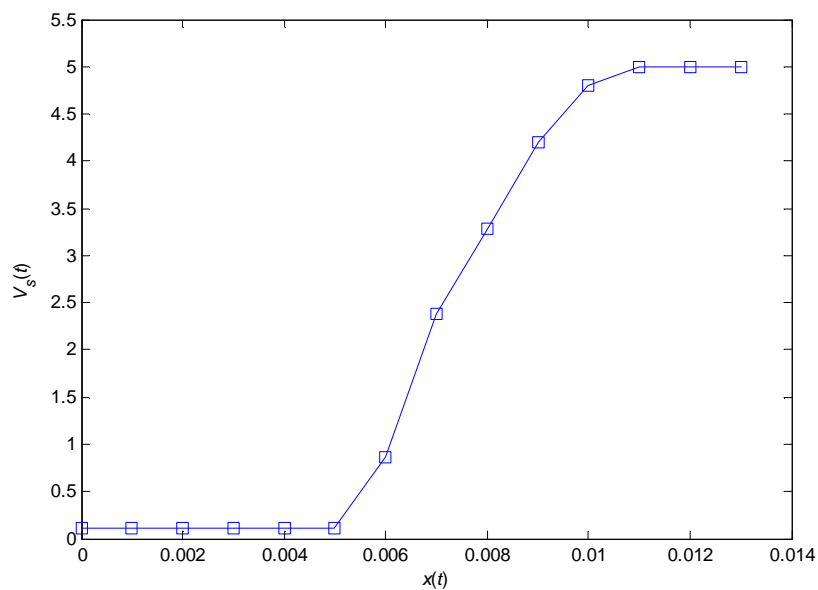


Figura 38 Tensão do LDR em função da distância do objecto ao electroíman

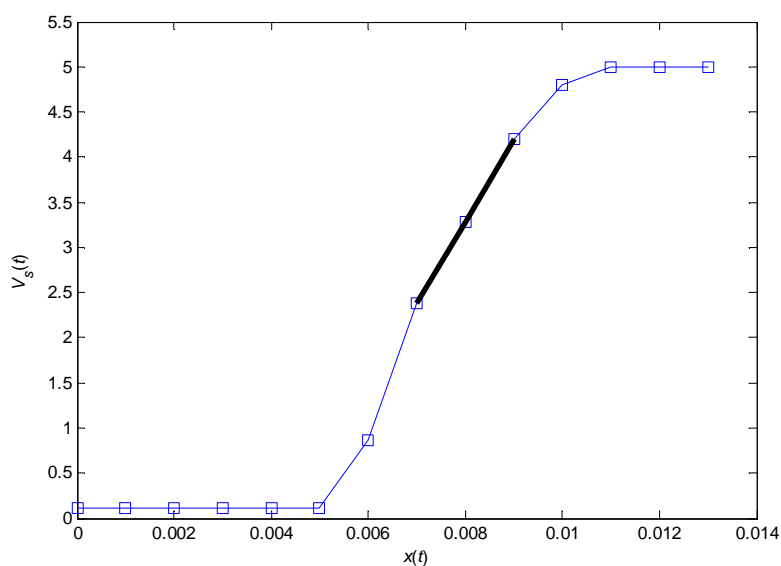


Figura 39 Tensão do LDR em função da distância do objecto ao electroíman com linearização em torno de $x_0 = 8 \text{ mm}$

A função do sensor foi obtida a partir da linearização, representada na Figura 39, entre os pontos $x \in [0,007; 0,009]$, obtendo-se:

$$V_s(t) = K_s x(t) + V_0 \tag{28}$$

$$V_s(t) = 906,6 x(t) - 3,9651 \quad (29)$$

Logo, o parâmetro $K_s = 906,6$.

Para a obtenção de K_a foi traçado a gráfico que relaciona a tensão aplicada ao electroíman $v_a(t)$ e a corrente $i(t)$ que percorre o mesmo, conforme mostram a Tabela 5 e a Figura 41.

Tabela 5. Medidas da corrente que percorre o electroíman em função da tensão aplicada

Tensão (V)	Corrente (A)
0	0,01
1,08	0,027
2,15	0,075
3,22	0,154
4,27	0,262
5,31	0,397
6,13	0,559
7,15	0,745
8,12	0,954
9,11	1,188
10,07	1,456
10,33	1,506

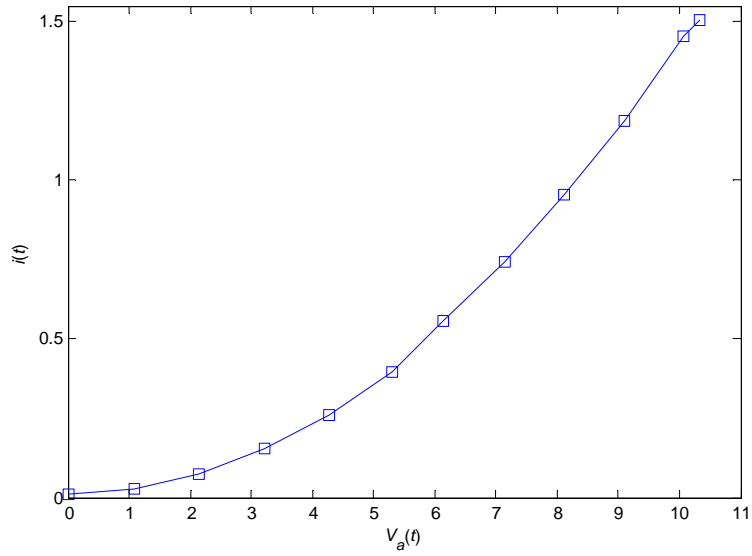


Figura 40 Variação da corrente no electroímã em função da tensão aplicada

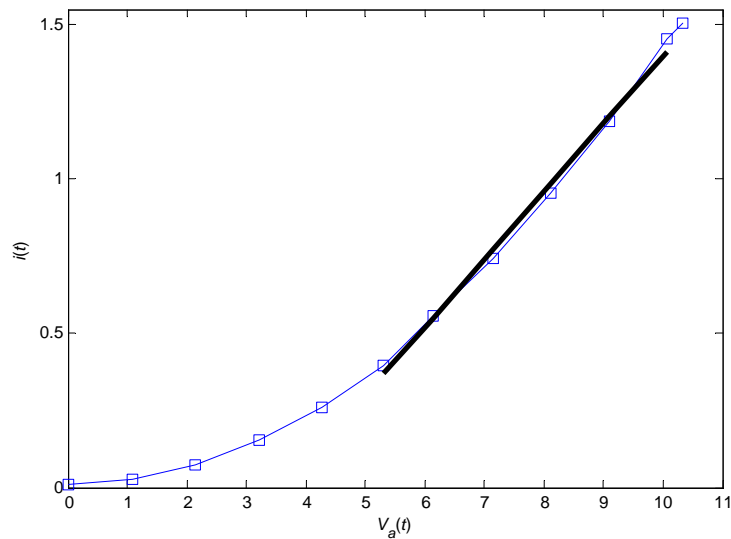


Figura 41 Variação da corrente no electroímã em função da tensão aplicada com linearização em torno de $i_0 = 759$ mA

A função do actuador foi obtida a partir da linearização entre os pontos 5,31 V e 10,07 V, representada na Figura 41, obtendo-se:

$$i(t) = K_a V_a(t) + I_0 \quad (30)$$

$$i(t) = 0,2194 V_a(t) - 0,7948 \quad (31)$$

Logo, o parâmetro $K_a = 0,2194$.

Com a obtenção destes ganhos, surge uma nova função de transferência do sistema que relaciona a tensão de entrada $V_a(t)$ e a tensão de saída do sensor $V_s(t)$:

$$\frac{V_s(s)}{V_a(s)} = \frac{-25,8497 \times K_s \times K_a}{(s - 49,52)(s + 49,52)} = \frac{-5141,7335}{(s - 49,52)(s + 49,52)} \quad (32)$$

Esta função de transferência será usada para o projecto do controlador. Para melhor compreensão desta função de transferência, é possível visualizar na Figura 42 o diagrama de blocos completo do sistema de levitação magnética.

A Figura 43 mostra uma fotografia da estrutura desenvolvida para o sistema de levitação magnética.

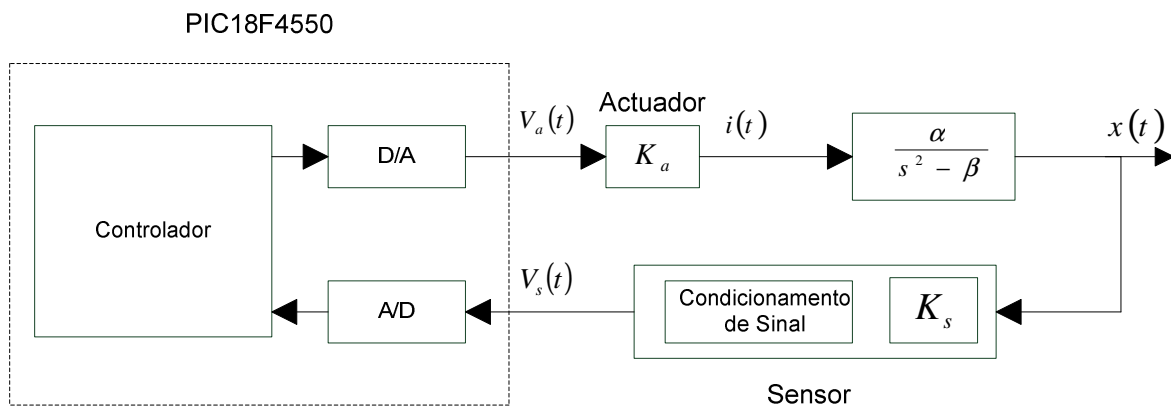


Figura 42 Diagrama de blocos do sistema de levitação

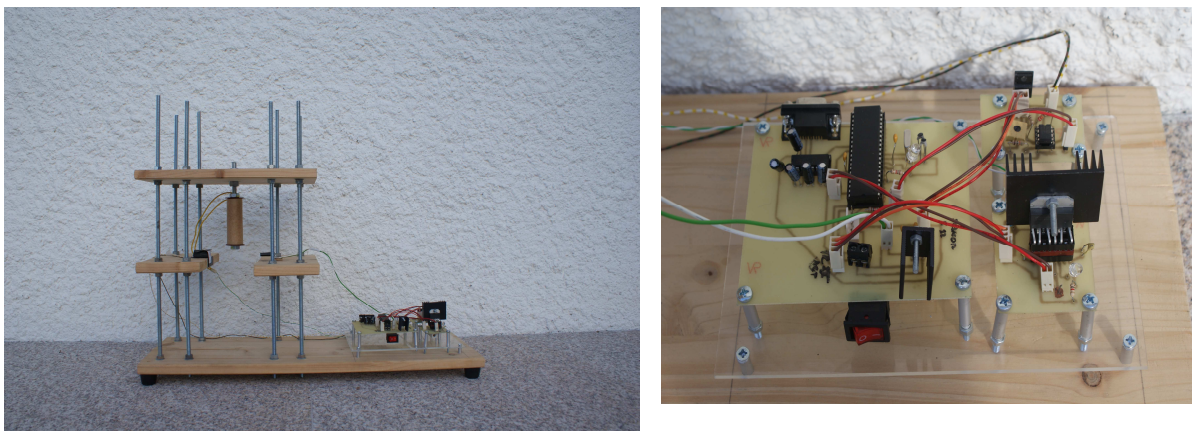


Figura 43 Estrutura do sistema de levitação magnética

3.5. INTERFACE GRÁFICA

Para comunicação entre o PC e o *hardware* foi desenvolvida uma interface gráfica em ambiente MATLAB. Esta interface é desenvolvida utilizando a ferramenta *guide* do MATLAB. Esta aplicação permite ao programador criar uma interface gráfica simples e intuitiva.

O objectivo desta interface gráfica é a recepção de dados do sensor de posição, a qual nos permitirá observar a posição do objecto através de um gráfico e o envio das constantes dos diversos controladores. A interface gráfica está ilustrada na Figura 44.

No canto superior esquerdo existe uma caixa de texto para a introdução dos valores a serem transmitidos para a PIC a fim de se proceder ao controlo do sistema. Para o envio da constante é necessário clicar no botão “Transmitir”. Os valores enviados para o PIC ficam registados na *listbox* situada na zona central da parte superior da interface.

No canto superior direito existe uma *listbox* onde nos é indicada quais as portas COM a que temos acesso. O que nos possibilita escolher a porta onde está ligado o sistema. Na parte inferior desta *listbox* existe uma caixa de texto onde nos é possível seleccionar o *baud rate* a utilizar pelo MATLAB.

Do lado esquerdo existe informação sobre os controladores e os valores que devem ser transmitidos para a PIC para se efectuar o controlo.

Por fim, para a geração do gráfico com a informação relativa à posição da esfera, é possível inserir o tempo de simulação desejado. A caixa de texto relativa à inserção do nome do ficheiro com o qual se quer guardar as variáveis da posição (*pos*) e o tempo (*t*), é utilizada para definir o nome a dar ao ficheiro *.mat*, criado pelo MATLAB, que fica guardado no directório do MATLAB. Para aceder às variáveis é necessário utilizar o comando *load* na janela de comando seguido do nome do ficheiro seleccionado pelo utilizador.

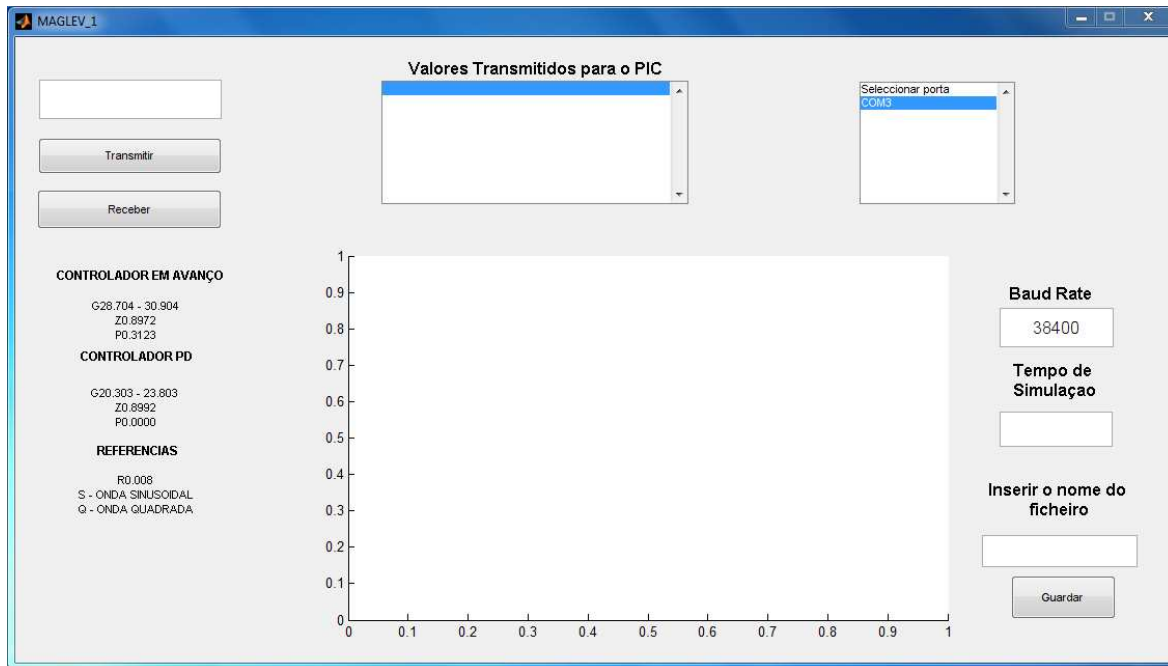


Figura 44 Interface gráfica desenvolvida

4. CONTROLO DO SISTEMA

Neste capítulo será descrito o projecto dos diferentes controladores utilizados para estabilizar o sistema de levitação magnética.

4.1. CONTROLADORES UTILIZADOS

4.1.1. CONTROLADOR PID

O controlador PID é um controlador genérico utilizado no controlo industrial. O objectivo do PID é corrigir o erro existente entre uma medição e um valor pré-definido.

Este tipo de controlo é muito útil, devido à sua aplicabilidade na maioria dos sistemas de controlo quer, sejam sistemas lineares ou sistemas não lineares. Com o PID é possível obter um controlo satisfatório de vários sistemas, embora por vezes não seja possível obter um controlo óptimo.

Um diagrama de blocos ilustrando este tipo de controlo está representado na Figura 45.

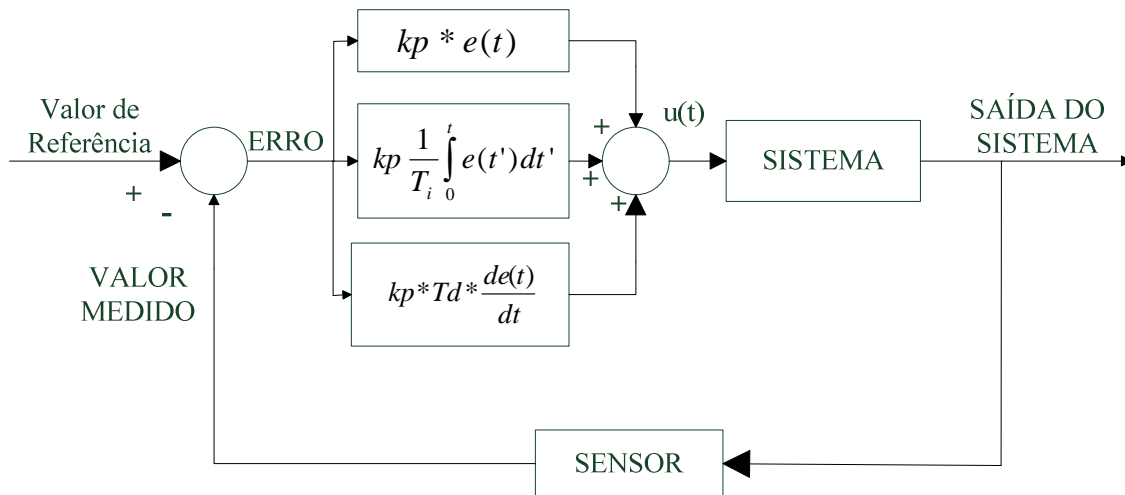


Figura 45 Diagrama de blocos de um sistema de controle com um controlador PID

Este sistema de controle possui funções importantes, tais como: proporciona realimentação negativa, a acção integral permite eliminar o erro em regime permanente (para entradas de referência) e a acção derivativa permite diminuir o *overshoot* do sistema.

O controlador PID resulta da combinação dos modos proporcional, integral e derivativo. A expressão que consagra os três tipos de acções de controle é dada por:

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t') dt' + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (33)$$

Em que k_p é o ganho proporcional, T_i a constante de tempo integral e T_d a constante de tempo derivativa.

A função de transferência do PID é dada por :

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (34)$$

No controlador PID, o modo integral é usado para eliminar o erro em regime permanente. O modo derivativo, com o seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e a redução da tendência para oscilar.

Nos sistemas de segunda ordem, um ganho elevado tem o efeito de reduzir o tempo de subida e o erro em regime permanente. O controle integral terá como efeitos eliminar o

erro em regime permanente, mas por outro lado terá o inconveniente de aumentar o *overshoot*. Este problema poderá ser resolvido com a aplicação da parte derivativa [16].

Os parâmetros para cada uma das acções terão que ser parametrizados em função da aplicação a que o controlador se destina.

A Tabela 6 mostra a principal função de cada uma das acções do controlador PID.

Regra geral, pode dizer-se que se adiciona o modo proporcional para obter um determinado tempo de subida, o modo derivativo para obter um determinado *overshoot* e o modo integral para eliminar o erro em regime permanente.

Tabela 6. Síntese da influência de cada acção do controlador PID

Acção	Tempo de subida	<i>Overshoot</i>	Tempo de estabelecimento	Erro em regime permanente
Proporcional	Diminui	Aumenta	Não se altera	Diminui
Integral	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
Derivativo	Não se altera	Diminui	Diminui	Não se altera

4.1.2. CONTROLADOR EM AVANÇO

A principal finalidade do controlador em avanço é suprir um atraso de fase estabelecido pelas próprias características do sistema original. Este tipo de compensação permite remodelar o lugar de raízes de maneira a serem obtidos os pólos desejados em malha fechada.

Em geral, os efeitos deste tipo de controlador correspondem a um aumento no amortecimento com menores tempos de subida e de estabelecimento, o que corresponde no domínio das frequências a um aumento na largura de banda, o que torna a resposta mais rápida. Além disso, as margens de ganho e de fase são melhoradas, contudo o erro em regime permanente não é afectado.

Este tipo de controlador é dado pela função de transferência:

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_c \frac{s + z_1}{s + p_1}, p_1 > z_1 \quad (35)$$

É possível concluir que o controlador em avanço actua na resposta transitória do sistema da mesma forma que actua um controlador PD.

4.2. DISCRETIZAÇÃO DOS CONTROLADORES

Um sistema de controlo em tempo contínuo com realimentação pode ser apresentado como mostra a Figura 46. Neste caso, todos os sinais envolvidos são sinais contínuos, e tanto o controlador como o sistema podem ser descritos no domínio de Laplace.

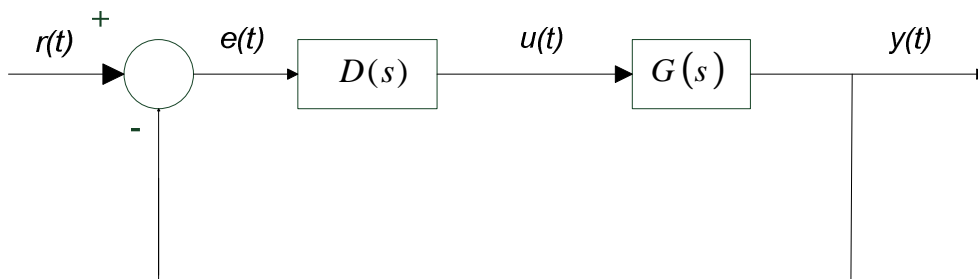


Figura 46 Exemplo de um sistema de controlo em tempo contínuo

Já os sistemas de controlo em tempo discreto envolvem a discretização do controlador. Um sistema de controlo em tempo discreto utiliza um computador em conjunto com uma placa de aquisição de dados para a implementação do controlador. Sendo assim, está implícito no método que ocorra pelo menos uma passagem do tempo contínuo para o tempo discreto, denominada discretização ou amostragem do sinal, e uma passagem do tempo discreto para o tempo contínuo, chamada de reconstrução.

A implementação em tempo real do controlador para um sistema de controlo em tempo discreto com realimentação, onde o controlador é implementado digitalmente, pode ser observada na Figura 47.

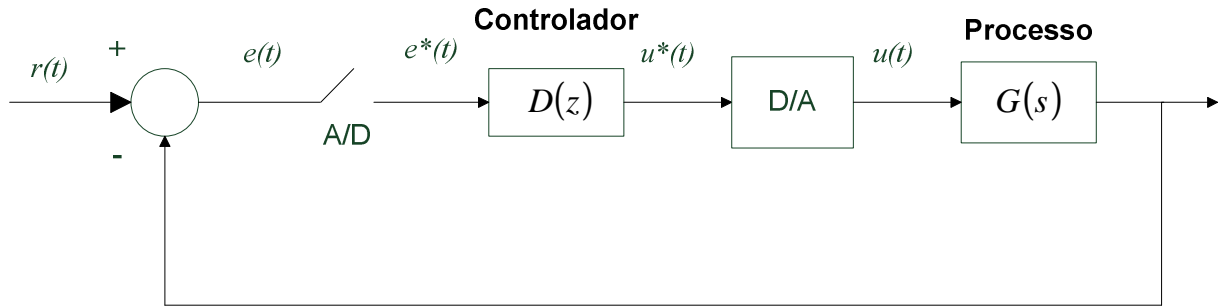


Figura 47 Exemplo de um sistema de controlo em tempo discreto

Os métodos mais utilizados para a discretização são: regra dos rectângulos em avanço (Regra de Euler), regra dos rectângulos em atraso e a regra dos trapézios. Estes métodos são utilizados para se obter os equivalentes discretos dos controladores contínuos. As diferentes funções de transferência são obtidas a partir da derivada das equações às diferenças resultando uma aproximação às equações diferenciais [25].

A regra dos rectângulos em avanço tem a seguinte equação às diferenças:

$$u(kT) = (1 - aT) u(kT - T) + aT e(kT - T) \quad (36)$$

resultando na seguinte função de transferência:

$$H(z) = \frac{a}{\left(\frac{z-1}{T}\right) + a} \quad (37)$$

Dada uma função de transferência contínua $H(s)$, o equivalente discreto é obtido usando a substituição:

$$H(z) = H(s) \Big|_{s=\frac{z-1}{T}} \quad (38)$$

Passando para a equação às diferenças dos rectângulos em atraso, temos que:

$$u(kT) = u(kT - T) - aT [u(kT) - e(kT)] \quad (39)$$

obtendo-se de seguida a seguinte função de transferência:

$$H(z) = \frac{a}{\left(\frac{z-1}{Tz}\right) + a} \quad (40)$$

Logo, para uma dada função de transferência $H(s)$ o equivalente discreto obtido pela regra do retângulos em atraso é o seguinte:

$$H(z) = H(s) \Big|_{s=\frac{z-1}{Tz}} \quad (41)$$

Por fim, a regra dos trapézios é representada pela seguinte equação às diferenças:

$$u(kT) = u(kT - T) - \frac{aT}{2} [u(kT - T) + u(kT)] + \frac{aT}{2} [e(kT - T) + e(kT)] \quad (42)$$

A partir da equação (42) é possível obter a seguinte função de transferência discreta:

$$H(z) = \frac{a}{\left(\frac{2z-1}{Tz+1}\right) + a} \quad (43)$$

Para a aproximação discreta ao controlador contínuo $H(s)$, usa-se a seguinte substituição:

$$H(z) = H(s) \Big|_{s=\frac{2z-1}{Tz+1}} \quad (44)$$

Um resumo das três regras está representado na Tabela 7.

As três aproximações preservam a ordem do controlador, embora a primeira regra não garanta que um sistema contínuo estável se mantenha estável no domínio discreto.

4.2.1. CONTROLADOR PID

Para a implementação do controlador PID no microcontrolador é necessário converter a função de transferência contínua numa função de transferência discreta. Para tal, foram usadas diferentes regras de discretização, como descritas na subsecção anterior.

Tabela 7. Resumo das três principais regras de discretização

Método	Função de transferência discreta
Regra em avanço (Euler)	$s \leftarrow \frac{z-1}{T}$
Regra em atraso	$s \leftarrow \frac{z-1}{Tz}$
Regra trapezoidal, bilinear ou Tustin	$s \leftarrow \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}$

Em primeiro lugar foram efectuadas discretizações parciais, isto é, foram discretizados separadamente os termos constituintes do PID, efectuando-se posteriormente a soma dos três termos discretos.

Na parte integral é utilizada a regra trapezoidal, obtendo-se a seguinte função de transferência:

$$D_I(z) = K_I \left(\frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1} \right) \quad (45)$$

seguiu-se a parte derivativa, em que foi utilizada a regra das diferenças em atraso, obtendo-se a seguinte função de transferência:

$$D_D(z) = K_D \left(\frac{z-1}{Tz} \right) \quad (46)$$

Para obtenção do controlador PID digital é necessário proceder à soma das três componentes (proporcional, integral e derivativa). A soma das três componentes resulta na seguinte equação:

$$\begin{aligned} D(z) &= K_P + \frac{K_I T}{2} \frac{z+1}{z-1} + \frac{K_D}{T} \frac{z-1}{z} \\ &= \frac{(K_I T/2 + K_D/T + K_P)z^2 + (K_I T/2 - 2K_D/T - K_P)z + K_D/T}{z(z-1)} \end{aligned}$$

$$= \frac{Az^2 + Bz + C}{z(z-1)} \quad (47)$$

em que A, B e C são dados por:

$$A = \frac{K_I T}{2} + \frac{K_D}{T} + K_P \quad (48)$$

$$B = \frac{K_I T}{2} - 2 \frac{K_D}{T} - K_P \quad (49)$$

$$C = \frac{K_D}{T} \quad (50)$$

A implementação do PID digital, no microcontrolador, é efectuada da forma ilustrada na Figura 48. Esta implementação é baseada na equação às diferenças do PID (equação 51). O sinal v_ref é a referência de entrada e var_VAD é o sinal obtido do A/D.

$$u(k) = u(k-1) + A e(k) + B e(k-1) + C e(k-2) \quad (51)$$

$$u(k) = u(k-1) + A e(k) + C e(k-2) \quad (52)$$

em que:

$$x(k) = u(k) + B e(k) \quad (53)$$

4.2.2. CONTROLADOR EM AVANÇO

Para a implementação do controlador em avanço foi também necessário discretizar a função de transferência contínua (35). Para tal, foi utilizada a regra das diferenças em atraso, obtendo-se:

$$D(z) = K \frac{z - \alpha}{z - \beta}, \alpha > \beta \quad (54)$$

Em que:

$$K = K_c \frac{1 + z_1 T}{1 + p_1 T} \quad (55)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + z_1 T} \quad (56)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + p_1 T} \quad (57)$$

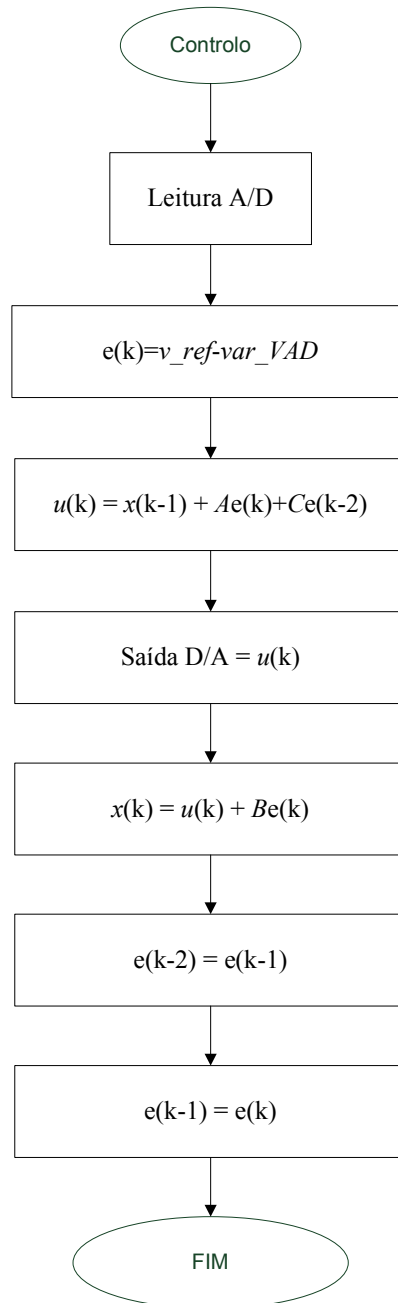


Figura 48 Implementação digital do controlo PID

A implementação do controlador em avanço digital no microcontrolador, é efectuada da forma demonstrada na Figura 49. Esta implementação é baseada na equação às diferenças

do controlador em avanço (equação 58). Mais uma vez, v_ref é a referência de entrada e var_VAD o sinal obtido do A/D.

$$u(k) = \beta u(k-1) + K e(k) - K\alpha e(k-1) \quad (58)$$

$$u(k) = x(k-1) + K e(k) \quad (59)$$

em que:

$$x(k) = \beta u(k) - K\alpha e(k) \quad (60)$$

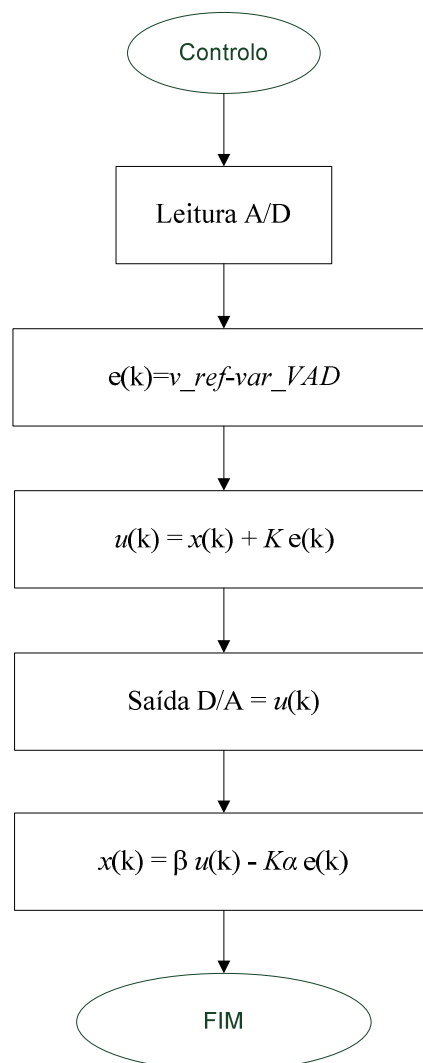


Figura 49 Implementação digital do controlo em avanço

4.3. PROJECTO DO CONTROLADOR

Para o projecto do controlador é necessário ter em conta a função de transferência do sistema de levitação, assim como todos os ganhos aplicados ao sistema, neste caso o ganho do actuador (K_a) e o ganho do sensor (K_s), tal como ilustra a Figura 50. Um diagrama de blocos mais pormenorizado está representado na Figura 51.

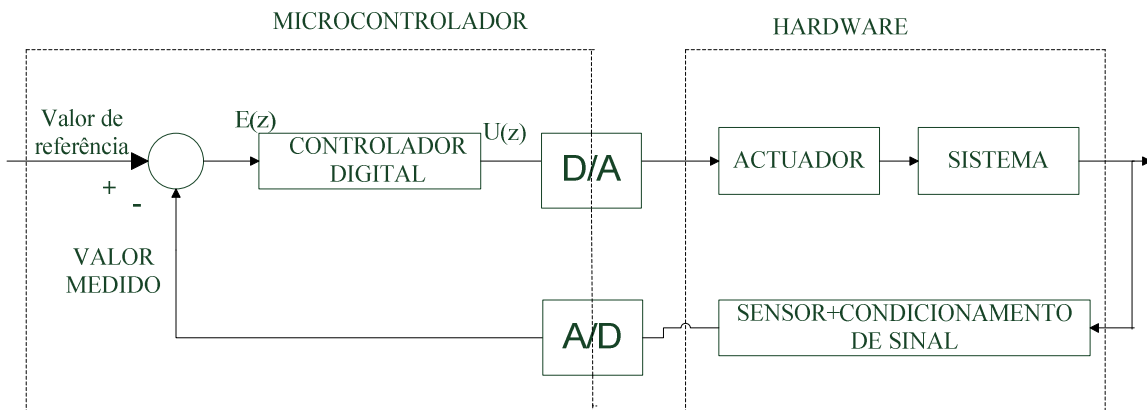


Figura 50 Diagrama de blocos do sistema de controlo

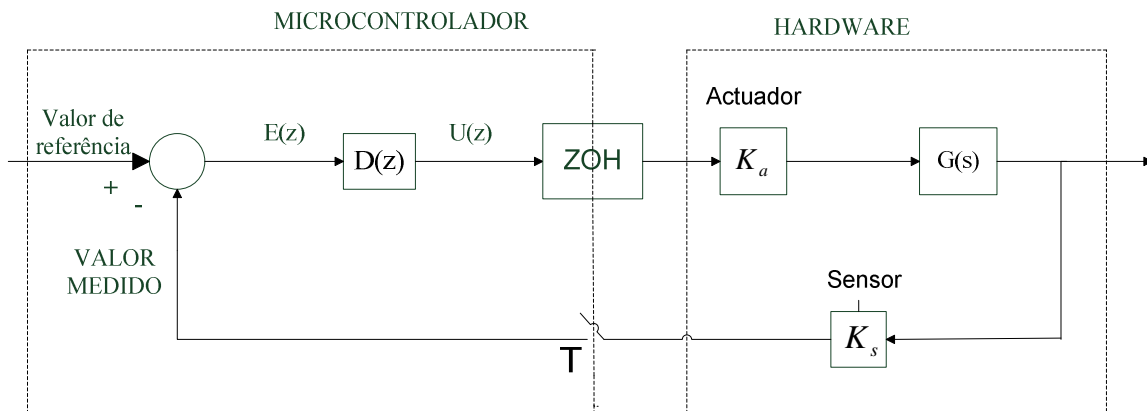


Figura 51 Diagrama de blocos equivalente do sistema de controlo

O projecto do controlador é feito directamente no domínio digital usando o método do lugar de raízes discreto. Para tal, é necessário transformar a função de transferência no domínio contínuo (analógico), para o domínio discreto (digital), usando a transformada de Z.

Assim, utilizando um tempo de amostragem de $T = 0,003$ s, a função de transferência discreta do sistema de levitação é dada por:

$$\begin{aligned}
G(z) &= (1 - z^{-1}) Z \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} \\
&= (1 - z^{-1}) Z \left\{ \frac{25,8998}{s(s - 49,52)(s + 49,52)} \right\} \\
&= 0,00011654 \frac{(z + 1)}{(z - 1,16)(z - 0,8619)} \tag{61}
\end{aligned}$$

Através da equação (61) é possível obter o respectivo lugar de raízes do sistema no domínio digital, o qual se encontra representado na Figura 52. Como é possível verificar, o sistema mantém-se instável, tal como no domínio contínuo.

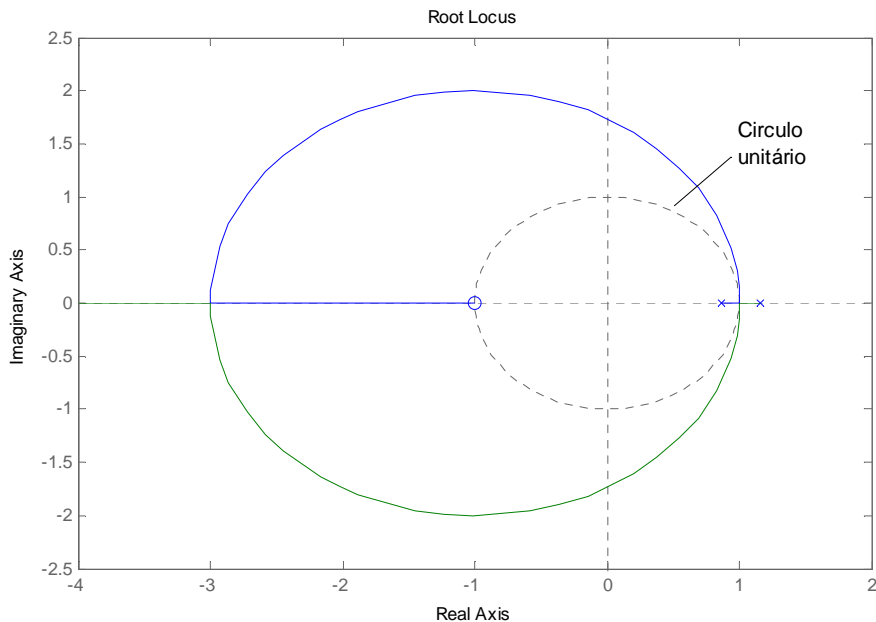


Figura 52 Lugar de raízes discreto

Dado que o sistema é instável, é necessária a implementação de um controlador, para possibilitar a estabilização do sistema. Para isso, é necessário “puxar” o lugar de raízes para a esquerda, de forma a este ficar dentro do círculo unitário.

4.3.1. PROJECTO DO CONTROLADOR EM AVANÇO

O controlador em avanço é dado pela seguinte função de transferência, já anteriormente referida, equação (54).

Para o projecto deste controlador foi utilizada a seguinte função em malha aberta do sistema:

$$G_1(z) = 0,00011654 K_a \cdot K_s \frac{(z+1)}{(z-1,16)(z-0,8619)}$$

$$= 0,02318 \frac{(z+1)}{(z-1,16)(z-0,8619)} \quad (62)$$

Para a primeira implementação, foi projectado um controlador em avanço (equação 54), com o intuito de anular um pólo do sistema, sendo efectuados os cálculos para a obtenção do K e do β , dos quais resultou a seguinte função de transferência:

$$D(z) = K \frac{z-0,8619}{z-\beta} \quad (63)$$

Pretende-se que o sistema cumpra as especificações desejadas de um coeficiente de amortecimento (ζ) igual a 0,5 e uma frequência natural (ω_n) igual a 625 rad/s. Com estas especificações temos um *overshoot* percentual (M_p) de 16,7 % e um tempo de subida (t_r) de 0,0029 s. Assim, os pólos desejados para o sistema são:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (64)$$

$$z_{1,2} = e^{s_{1,2}T} = -0,0207 \pm j0,3911 \quad (65)$$

Utilizando o método do lugar de raízes discreto, a partir da condição de fase (equação 66) e condição de módulo (67) obtiveram-se os valores de $\beta = -0.4853$ e de $K = 30,9043$, respectivamente.

$$\angle D(z) G_1(z) \Big|_{z=z_1} = -180^\circ \quad (66)$$

$$|D(z) G_1(z)| \Big|_{z=z_1} = 1 \quad (67)$$

Logo, $D(z)$ possui a seguinte forma:

$$D(z) = 30,9043 \frac{z-0,8619}{z+0,4853} \quad (68)$$

sendo a função de transferência em malha aberta dada por:

$$D(z)G_1(z) = 0,71637 \frac{(z+1)}{(z-1,16)(z-0,8619)} \quad (69)$$

O respectivo lugar de raízes discreto está ilustrado na Figura 53. A partir deste gráfico verifica-se que o sistema se tornou estável, com os pólos em malha fechada indicados.

Para a simulação do sistema, é necessária a função de transferência em malha fechada do sistema de controlo:

$$\begin{aligned} T(z) &= \frac{G_1(z)D(z)}{1 + G_1(z)D(z)} \\ &= 0,71637 \frac{(z+1)}{z^2 - 0,04149z + 0,1534} \end{aligned} \quad (70)$$

A Figura 54 ilustra a resposta ao degrau do sistema para a função de transferência (70).

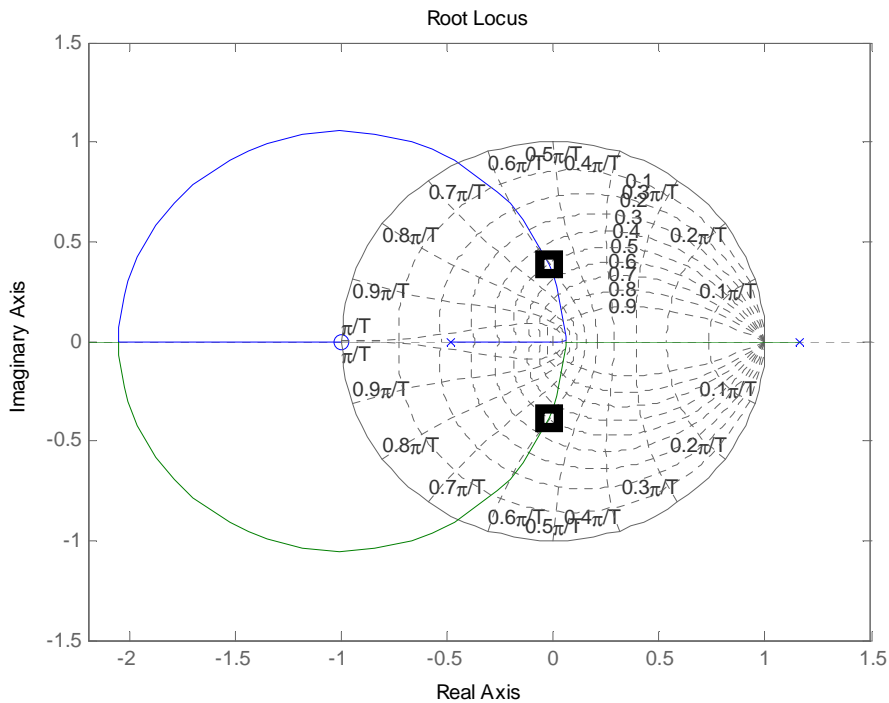


Figura 53 Lugar de raízes sistema

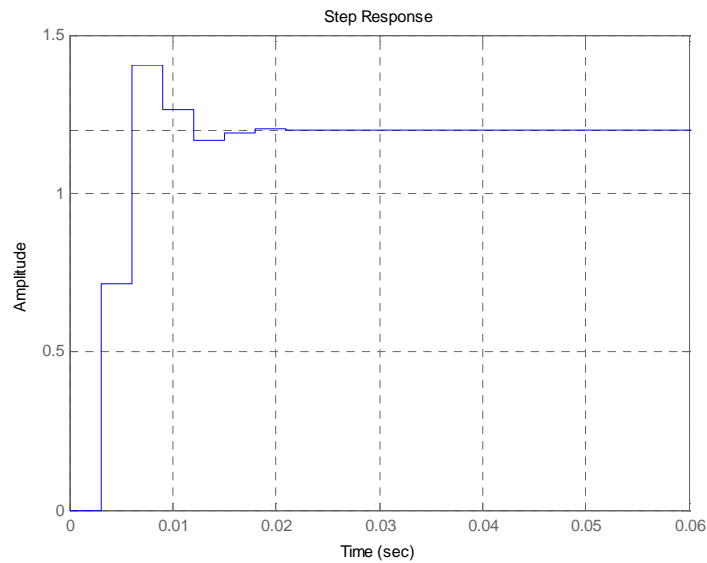


Figura 54 Resposta ao degrau do sistema

Com ajuda do MATLAB é possível verificar que $M_p = 17,0044\%$, o tempo de pico $t_p = 0,006$ s, o tempo de estabelecimento $t_s = 0,024$ s e o tempo de subida $t_r = 0,006$ s. Dado que se pretendia que $M_p < 20\%$ e $t_r < 0,1$ s, pode-se dizer que o sistema cumpre as especificações.

Para a implementação do controlador no microcontrolador é necessário converter a função de transferência discreta para uma equação às diferenças.

A transformação é efectuada através dos seguintes passos:

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = 30,9043 \frac{z - 0,8619}{z + 0,4853} = 30,9043 \frac{1 - 0,8619z^{-1}}{1 + 0,4853z^{-1}} \quad (71)$$

$$U(z)(1 + 0,4853 z^{-1}) = 30,9043 (1 - 0,4853 z^{-1})E(z) \quad (72)$$

$$U(z) + 0,4853 z^{-1} U(z) = 30,9043 E(z) - (30,9043 \cdot 0,4853 z^{-1} E(z)) \quad (73)$$

$$u(k) + 0,4853 u(k - 1) = 30,9043 e(k) - (30,9043 \cdot 0,4853 e(k - 1)) \quad (74)$$

Desta forma é possível chegar ao valor de saída $u(k)$:

$$u(k) = -0,4853u(k - 1) + 30,9043e(k) - (30,9043 \cdot 0,4853e(k - 1)) \quad (75)$$

Para implementação da equação (75) no microcontrolador, aos valores de cada parâmetro foram atribuídas variáveis.

$$u(k) = \underbrace{-0.4853}_{a_1} u(k-1) + \underbrace{30,9043}_{b_0} e(k) - \underbrace{26,6364}_{b_1} e(k-1) \quad (76)$$

De forma a reduzir o tempo de cálculo no microcontrolador a expressão (76) foi simplificada da seguinte forma:

$$u(k) = b_0 e(k) + x(k-1) \quad (77)$$

$$x(k) = a_1 u(k) + b_1 e(k) \quad (78)$$

De seguida, é mostrado o excerto de código desenvolvido para a implementação do controlador em avanço, no microcontrolador.

```
b_1=(-1)*(ganho*zero);
var_VAD=v_ref-media_AD; //(mV)
u=(-1)*((b0*var_VAD)+x);
if(u>=10000.0)
{
    u=10000.0;
}
if(u<=0.0)
{
    u=0.0;
}
dc=1023*(u/10000);
SetDCPWM2(dc);//duty-cycle aplicado ao sistema
x=((a1*u)+(b1*var_VAD));
```

4.3.2. PROJECTO DO CONTROLADOR PD

Nesta segunda experiência, projectou-se um controlador PD. O PD é dado pela função de transferência:

$$D(z) = K_D \left(1 + \left(\frac{T_d}{T} \right) \frac{z-1}{z} \right) = K \frac{z-\alpha}{z} \quad (79)$$

em que:

$$K = K_D + \frac{K_D}{T} \quad (80)$$

$$\alpha = \frac{K_D}{K_D + K_P T} \quad (81)$$

Inicialmente foi realizada a simulação em MATLAB, de seguida efectuou-se nova simulação, desta feita, no SIMULINK, para depois ser feita a implementação no sistema real.

O método de projecto utilizado é o lugar de raízes discreto, o mesmo que foi utilizado no controlador em avanço. Os objectivos mantêm-se os mesmos, um sistema rápido e com pouco *overshoot*; para isso, utilizaram-se os valores do coeficiente de amortecimento (ζ) inferior a 0,5 e a frequência natural igual a 325 rad/s. A estas especificações correspondem um tempo de subida de $t_r = 0,0055$ s e um *overshoot* de $M_p = 16,7\%$. Na Figura 55 estão representados os lugares de raízes do sistema para $\omega_n = 625$ rad/s e $\omega_n = 325$ rad/s, respectivamente.

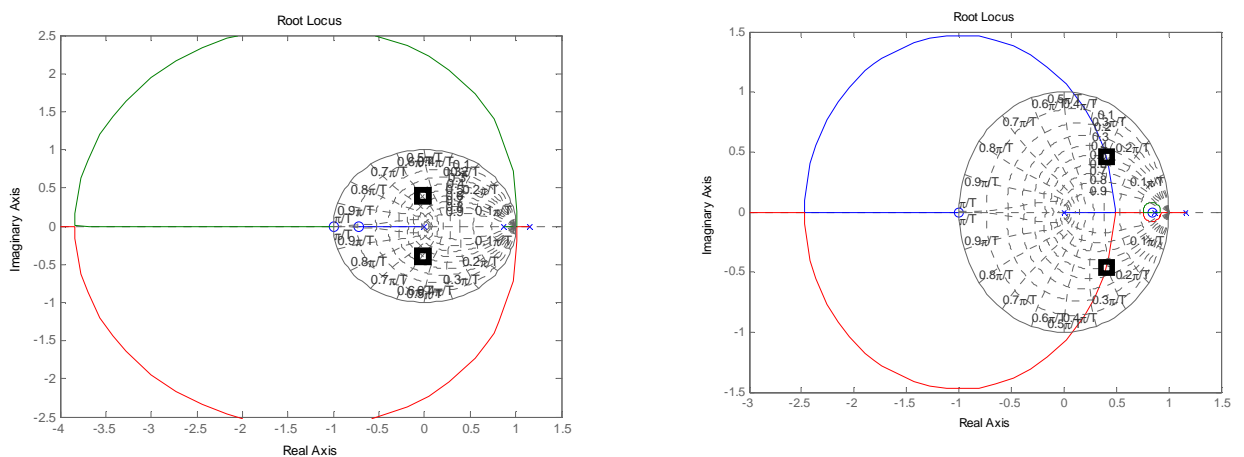


Figura 55 Lugar de Raízes com $\omega_n = 625$ rad/s (esquerda); Lugar de Raízes com $\omega_n = 325$ rad/s (direita)

Como é possível observar, confirma-se que com o valor de $\omega_n = 625$ rad/s o sistema não estabiliza. Com a redução de ω_n para 325 rad/s é possível estabilizar o sistema, conforme mostra a Figura 55 (lugar de raízes da direita).

Com as especificações desejadas, os pólos discretos para o sistema são:

$$z_{1,2} = 0,4979 \pm j0,4591 \quad (82)$$

Para o projecto do controlador foi utilizada a equação (79), sendo efectuados cálculos para obter o valor de K e α .

Utilizando o método do lugar de raízes discreto, a partir da equação de fase (equação 66) e da condição de módulo (equação 67) obtiveram-se os valores de $\alpha = 0,8452$ e de $K = 16,9765$.

Logo, $D(z)$ possui a seguinte forma:

$$D(z) = 16,9765 \frac{z - 0,8452}{z} \quad (83)$$

A função de transferência em malha aberta é:

$$D(z)G_1(z) = 0,37223 \frac{(z+1)(z-0,8452)}{z(z-1,16)(z-0,8619)} \quad (84)$$

O respectivo lugar de raízes está ilustrado na Figura 56.

Para a simulação do sistema, é necessária a função de transferência em malha fechada do sistema de controlo:

$$\begin{aligned} T(z) &= \frac{G_1(z) D(z)}{1 + G_1(z) D(z)} \\ &= 0,37223 \frac{(z+1)(z-0,8452)}{(z-0,834)(z^2 - 0,8158z + 0,3772)} \end{aligned} \quad (85)$$

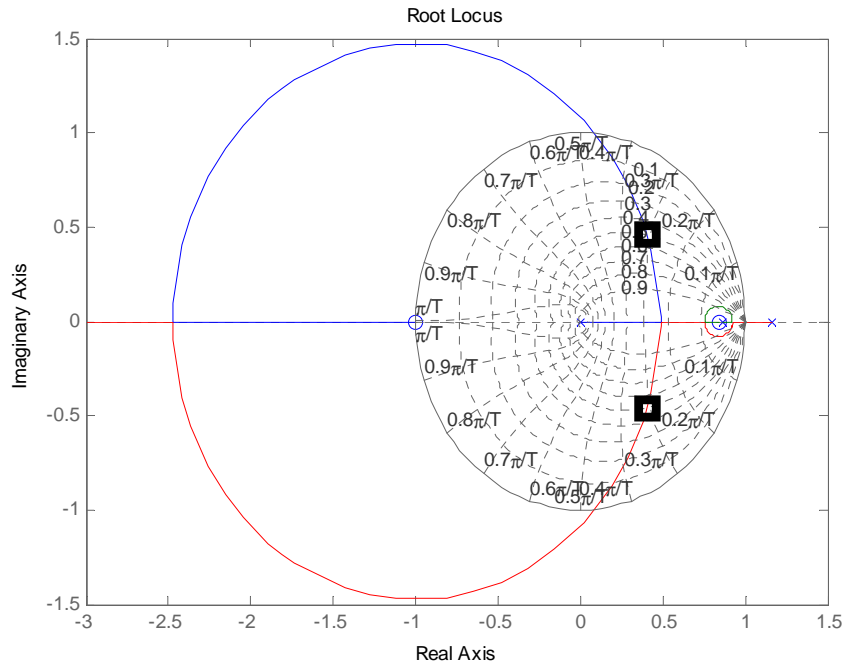


Figura 56 Lugar de raízes do sistema com $\omega_n=325$ rad/s

A partir do lugar de raízes verifica-se que o sistema se tornou estável. Este facto é corroborado através da resposta do sistema a uma entrada em degrau, conforme mostra a Figura 57.

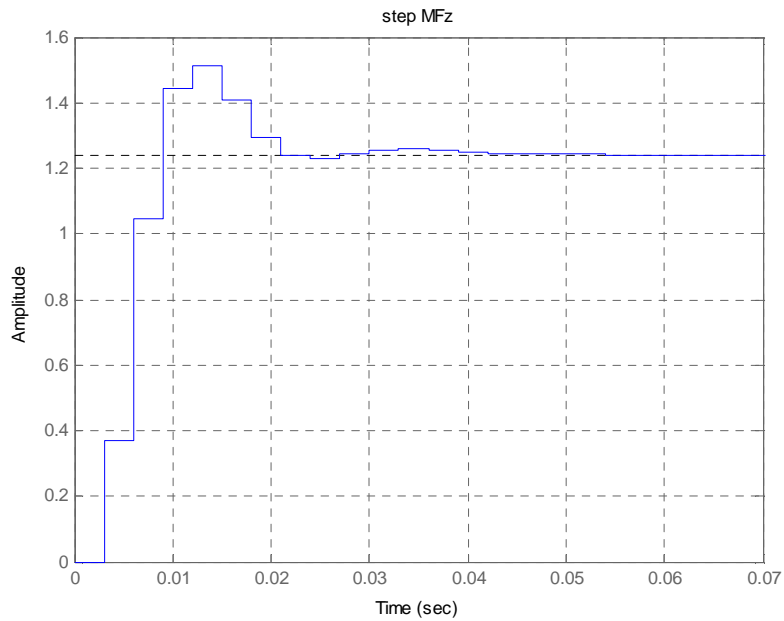


Figura 57 Resposta ao degrau do sistema

Através do MATLAB é possível verificar que $M_p = 23,7761\%$, o tempo de pico é de $t_p = 0,012$ s, o tempo de estabelecimento é cerca de $t_s = 0,054$ s, e o tempo de subida é de $t_r = 0,006$ s. Conclui-se que o tempo de subida é inferior ao pretendido, mas o *overshoot* é superior ao desejado, apesar de o sistema ser estável.

Visto que a especificação do *overshoot* não foi concretizada com sucesso foi efectuada uma nova simulação. A única alteração efectuada foi no valor da frequência natural do sistema (ω_n). O valor de ω_n passou de 325 rad/s para 340 rad/s, tornando a resposta do sistema mais rápida. Isto pode ser visualizado através do lugar de raízes discreto, da Figura 58.

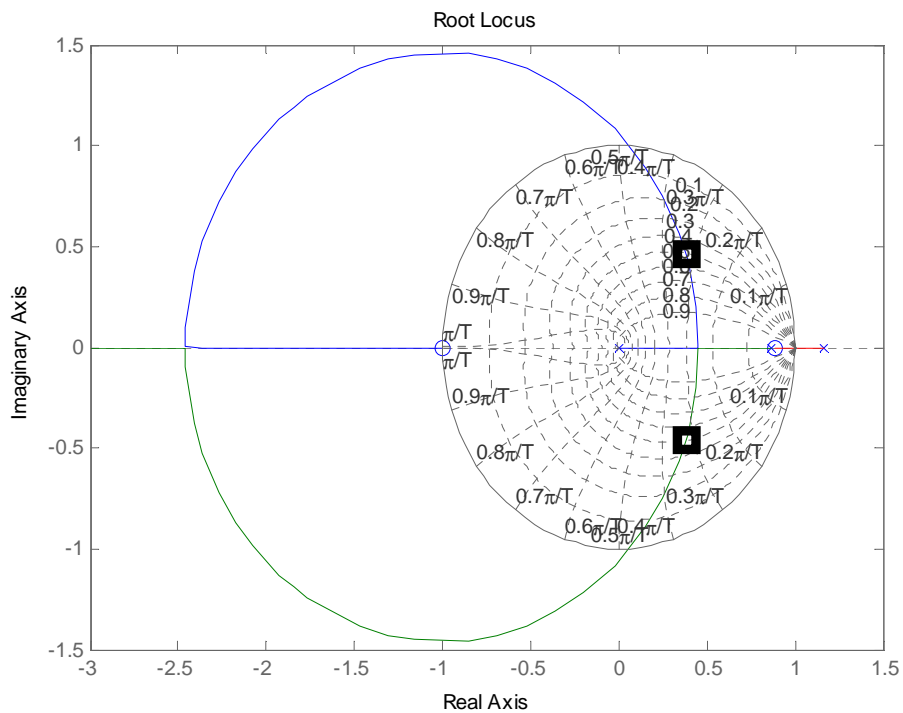


Figura 58 Lugar de raízes do sistema com $\omega_n=340$ rad/s

Através do lugar de raízes é possível notar que o valor de ζ é aproximadamente de 0,5, sendo o valor de $\omega_n \approx 340$ rad/s. A resposta ao degrau do sistema, para estes pólos desejados, está ilustrada na Figura 59.

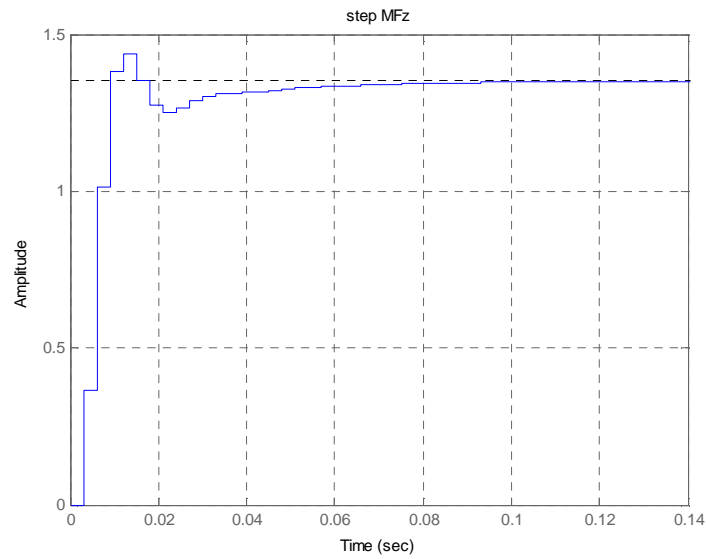


Figura 59 Resposta ao degrau do sistema com $\omega_n=340$ rad/s

A resposta ao degrau permite-nos obter os valores de M_p , t_r , t_s e t_p . O *overshoot* diminuiu drasticamente para $M_p = 6,4884\%$, o tempo de subida voltou a ser de $t_r = 0,006$ s e o tempo de pico é de $t_p = 0,012$ s, sendo o tempo de estabelecimento $t_s = 0,096$ s.

O novo controlador é então dado pela função de transferência discreta:

$$D(z) = 15,7546 \frac{z - 0,8835}{z} \quad (86)$$

A conversão para a equação às diferenças é efectuada da mesma forma que no caso do controlador em avanço, obtendo-se:

$$u(k) = 15,7546 e(k) - 13,9192 e(k - 1) \quad (87)$$

$$u(k) = b_0 e(k) + x(k - 1) \quad (88)$$

em que:

$$x(k) = b_1 e(k) \quad (89)$$

Para a implementação do controlador no microcontrolador é utilizado o seguinte excerto de código:

```
b_1=(-1)*(ganho*zero);  
  
var_VAD=v_ref-media_AD; //(mV)  
u=(-1)*((b0*var_VAD)+x);  
if(u>=10000.0)  
{  
    u=10000.0;  
}  
if(u<=0.0)  
{  
    u=0.0;  
}  
dc=1023*(u/10000);  
SetDCPWM2(dc);//duty-cycle aplicado ao sistema  
x=b1*var_VAD;
```

Como é possível observar, o código é similar ao que foi implementado para o controlador em avanço descrito no ponto 4.3.1. A diferença está unicamente no valor das variáveis, conforme se constata comparando as equações às diferenças dos dois controladores, equações (75) e (87), respectivamente.

5. TESTES E RESULTADOS

Depois de efectuado o projecto dos controladores, neste capítulo, serão apresentados os testes realizados, bem como os resultados obtidos e respectivas simulações.

5.1. CONTROLADOR EM AVANÇO

O primeiro teste efectuado foi com o controlador em avanço projectado no Capítulo 4. Inicialmente foi efectuada uma simulação no MATLAB/Simulink, conforme o diagrama de blocos da Figura 60.

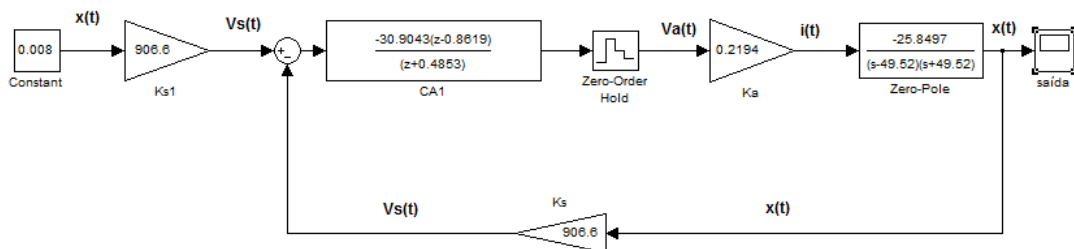


Figura 60 Diagrama de blocos do sistema de controlo construído no Simulink

Na Figura 61 está representada a resposta ao degrau do sistema. Verifica-se que o sistema simulado tem um *overshoot* igual a $M_p = 17,0164\%$ e um tempo de subida de

$t_r = 0,004$ s, revelando uma resposta rápida e um *overshoot* aceitável, no entanto não estabiliza na posição desejada de 8 mm. Este erro (em regime permanente) é justificado pelo tipo de controlador utilizado (avanço) face ao tipo de sistema que se pretende controlar (sistema Tipo 0).

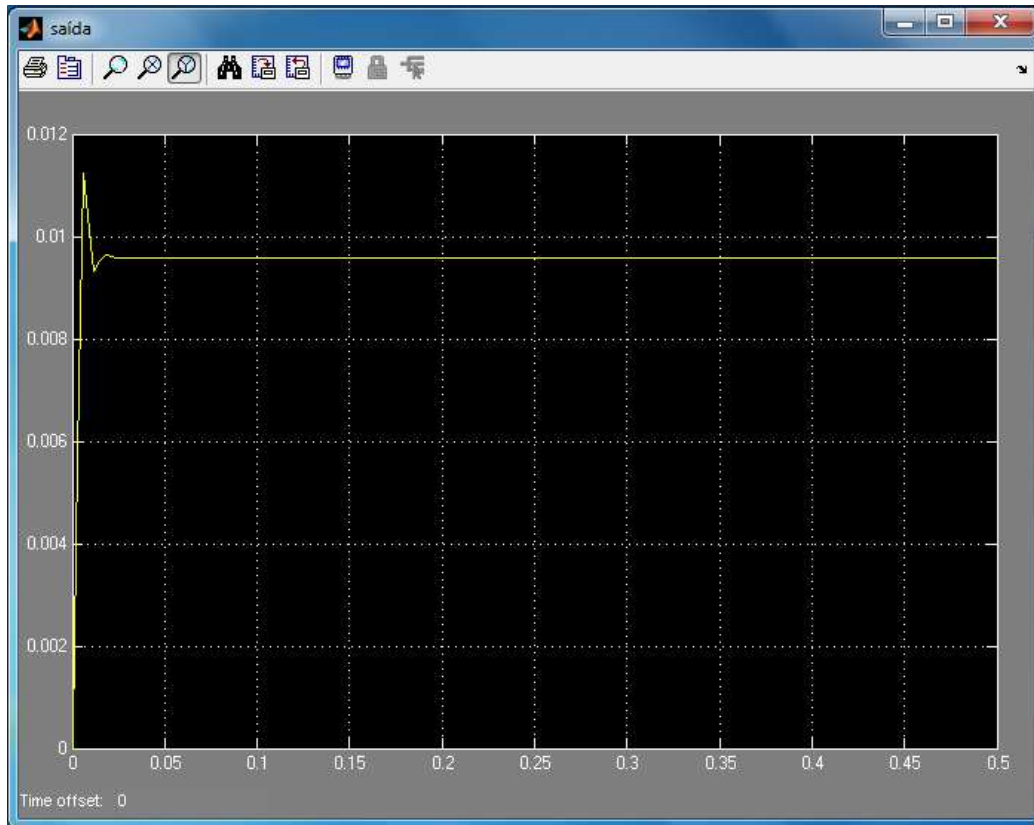


Figura 61 Resposta ao degrau do sistema com o controlador em avanço

Este controlador foi testado no sistema real, tendo estabilizado para a referência de 8 mm. No entanto, o sistema tornava-se instável para as entradas de referência de onda sinusoidal e quadrada, adiante referidas. Este facto pode ser devido a imperfeições no modelo do sistema de levitação magnética.

A dinâmica do sistema pode ser alterada com um ajuste mais fino dos parâmetros (K, α, β) do controlador. Após algumas tentativas, chegou-se aos valores de $K = 18,043$, $\alpha = 0,8972$ e $\beta = 0,3123$ tal como ilustra o diagrama de blocos da Figura 62.

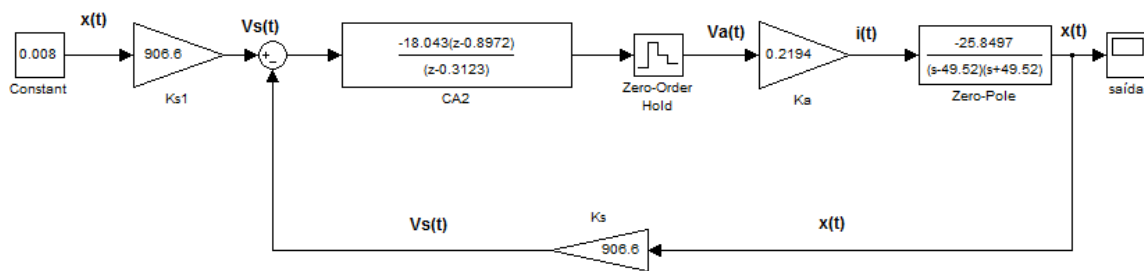


Figura 62 Novo diagrama de blocos com novo controlador em avanço

A resposta ao degrau do sistema do novo controlador está ilustrada na Figura 63, mantendo-se o erro em regime permanente.

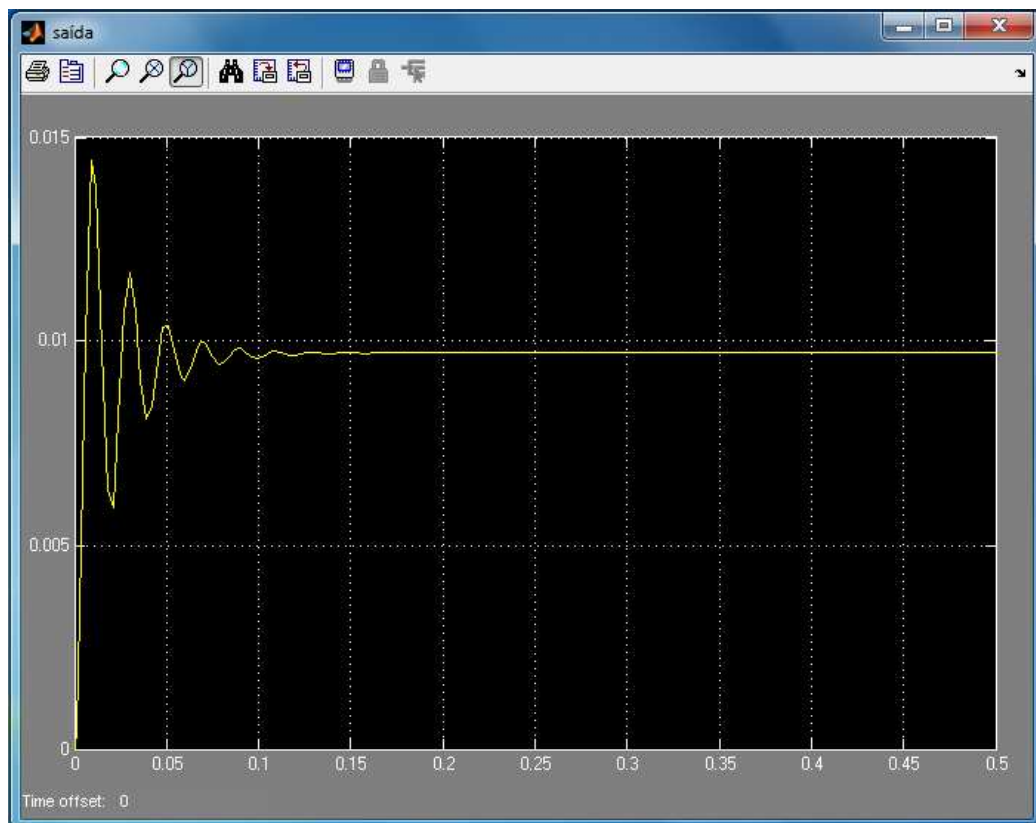


Figura 63 Resposta ao degrau do sistema com o novo controlador em avanço

Depois de encontrado o controlador foi possível passar às experiências no sistema de levitação real.

Inicialmente foram efectuados testes quanto ao tempo que o objecto aguentava a levitar sempre na posição de equilíbrio. Este tempo situava-se em cerca de 3 minutos, o que nos permite implementar vários testes.

O primeiro teste consistiu em manter a bola a levitar na posição de equilíbrio ($x_0 = 8$ mm), sendo obtida a resposta da Figura 64. De notar que existe uma pequena diferença entre a posição desejada e a posição real, o que revela a existência de um erro em regime permanente.

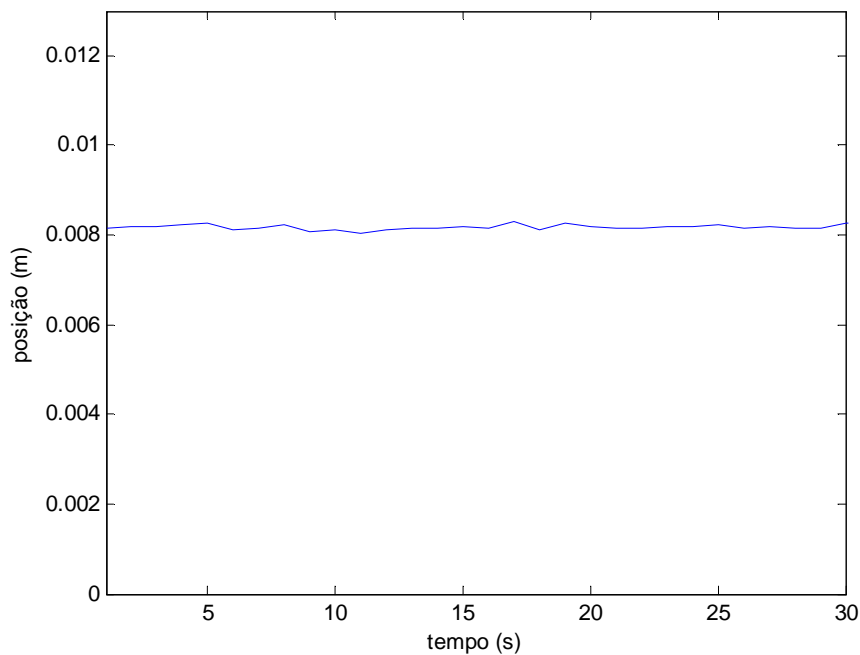


Figura 64 Posição da bola do sistema real

Após o sucesso desta experiência, representada na Figura 65, efectuaram-se testes para conseguir que o objecto seguisse determinados sinais de referência. Um desses sinais é uma onda sinusoidal como mostra a Figura 66, sendo dada pela equação:

$$x_{ref} = x_0 + A \sin(2\pi f \cdot t) \quad (90)$$

Em que $x_0 = 8$ mm é o ponto de equilíbrio, $A = 0,2$ mm e $f = 0,5$ Hz.



Figura 65 Objecto a levitar

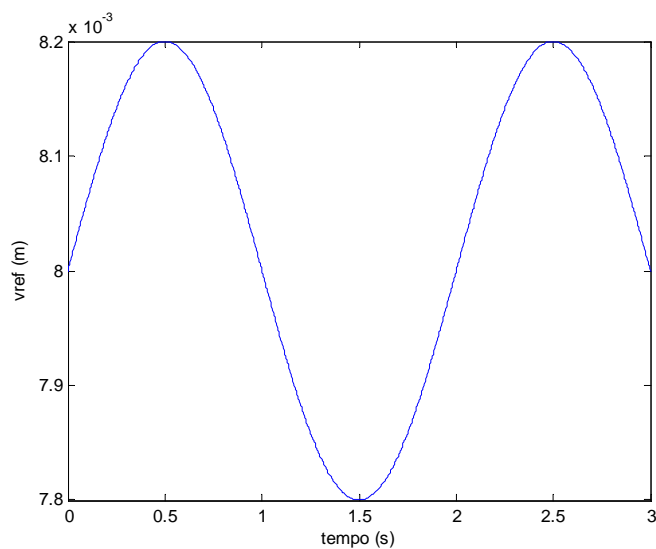


Figura 66 Entrada de referência – Onda Sinusoidal em torno do ponto de equilíbrio

A variação em torno do ponto de equilíbrio é de 0,2 mm, sendo bastante perceptível na experiência do sistema real. Os valores da onda sinusoidal são guardados na memória de programa da PIC, sendo estes obtidos através de simulação no MATLAB.

Para isso foi utilizada a seguinte instrução do PIC:

```
rom float sinusoide [667] =
{0.0080,0.0080,0.0080,0.0080,0.0080,0.0080,0.0080
, ...}
```

A resposta do sistema para a entrada de referência sinusoidal está ilustrada na Figura 67. Verifica-se em regime permanente que continua a existir um erro na posição (o sistema

oscila em torno de um valor ligeiramente superior ao valor de referência $x_0 = 8$ mm), mas o controlador suporta as variações da entrada de referência de uma forma aceitável.

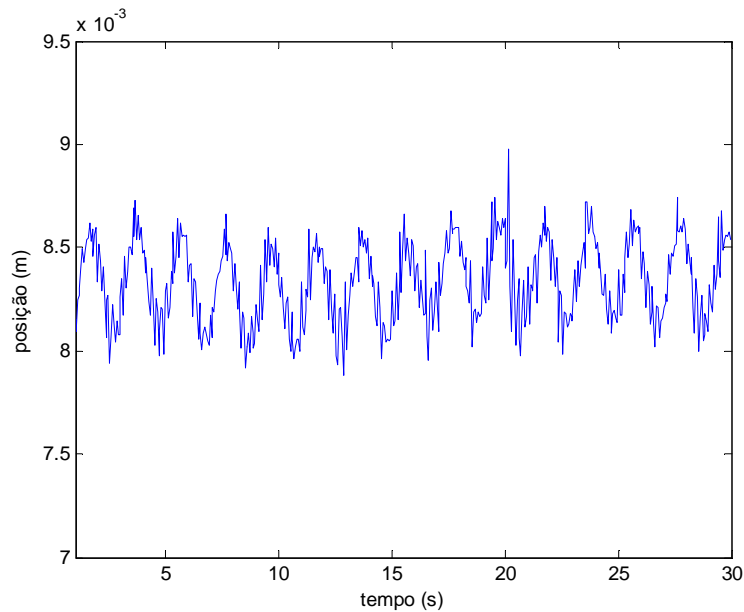


Figura 67 Posição da bola do sistema real com referência sinusoidal

De seguida testou-se o sistema com uma entrada de referência quadrada, conforme mostra a Figura 68. Neste caso, a experiência foi efectuada com variações de apenas 0,1 mm.

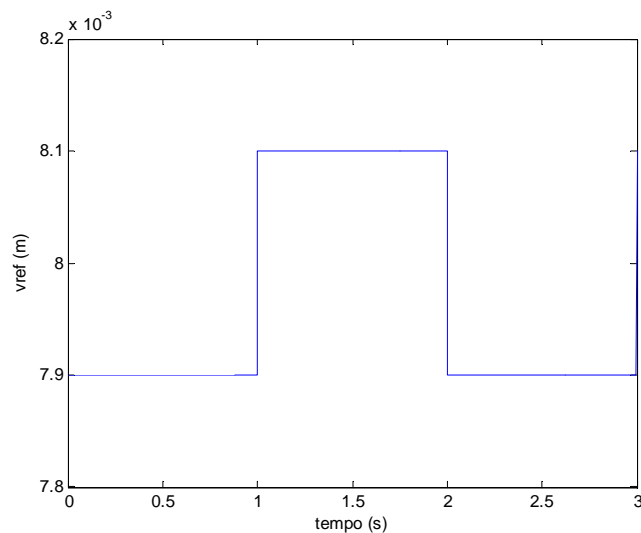


Figura 68 Entrada de referência - Onda quadrada em torno do ponto de equilíbrio

A resposta do sistema para a entrada de referência quadrada está ilustrada na Figura 69. Apesar da pequena oscilação da posição de referência, é perceptível a variação do objecto

semelhante a uma onda quadrada. Persiste o erro em regime permanente (varia em torno de um valor diferente de $x_0 = 8$ mm), como seria de esperar.

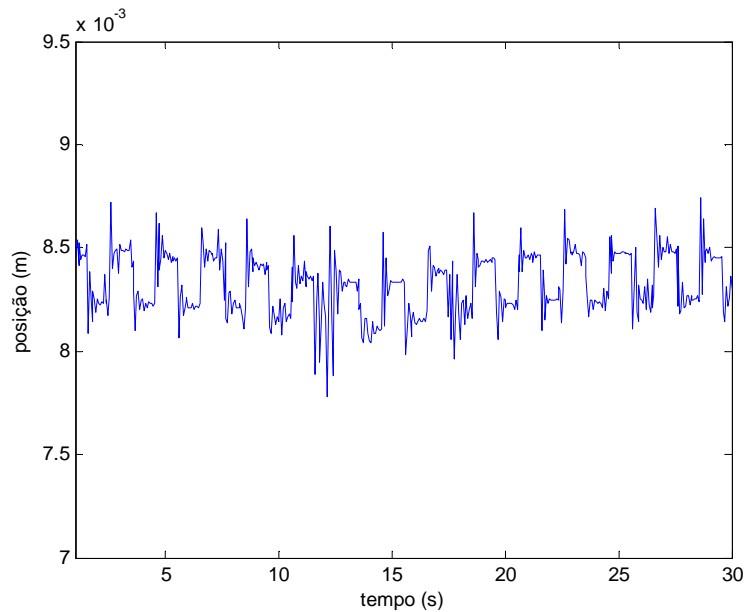


Figura 69 Posição da bola do sistema real com referência de onda quadrada de 0,1 mm

Após a finalização do teste com a entrada de referência de apenas 0,1 mm de diferença foi testado, com sucesso, a entrada de referência de onda quadrada com 0,2 mm em torno do ponto de equilíbrio, como mostra a Figura 70.

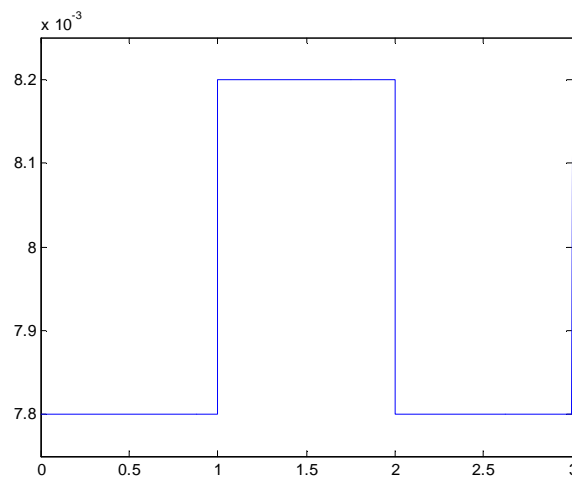


Figura 70 Entrada de referência em forma de onda quadrada de 0, 2 mm

Os valores da onda quadrada são guardados na memória de programa da PIC. Estes valores foram obtidos através de simulação no MATLAB.

Para isso foi utilizada a seguinte instrução do PIC:

```
rom float quadrada [669] =  
{0.0078,0.0078,0.0078,0.0078,0.0078,0.0078,0.0078  
,... }
```

A Figura 71 mostra a resposta do sistema à entrada de referência da onda quadrada de 0,2 mm.

É possível notar que a oscilação aumentou com o aumento da variação do sinal de referência. No entanto, a resposta continua a ser aceitável confirmando a robustez do controlador projectado.

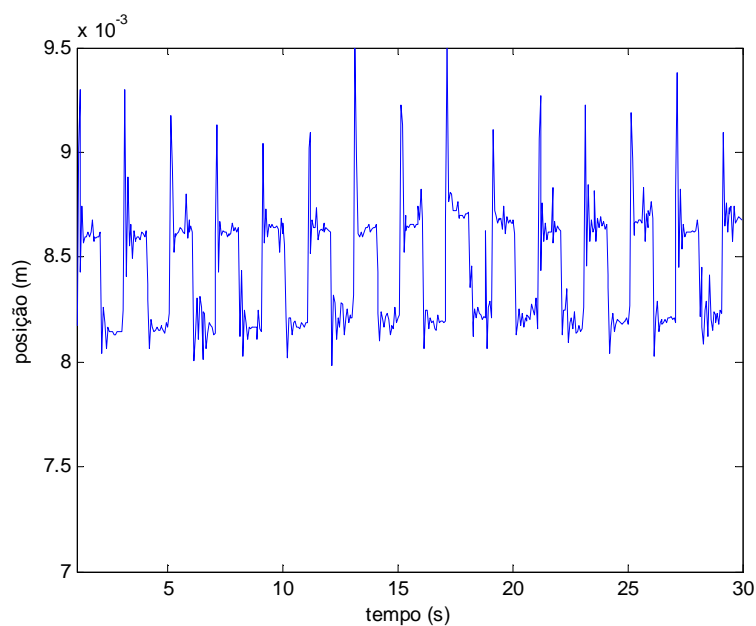


Figura 71 Posição da bola do sistema real com referência de onda quadrada de 0,2 mm

5.2. CONTROLADOR PD

Após a concretização do controlador em avanço, passou-se à implementação do controlador PD no sistema de levitação real.

No caso do controlador PD foram apresentadas duas soluções. O primeiro controlador a ser implementado (equação (83), com $K = 16,9765$ e $\alpha = 0,8452$), apresentava um *overshoot* acima das especificações, embora na simulação fosse bastante perceptível a sua estabilização. No que diz respeito ao sistema real, a sua implementação não foi viável, visto que o sistema era instável. Devido a este facto, foi implementado um segundo controlador com um ganho de $K = 15,7546$ e um zero em $\alpha = 0,8835$. Da mesma forma

que o controlador em avanço aumentou-se o valor do zero e diminuiu-se o ganho para melhorar a estabilização do sistema.

O diagrama de blocos do sistema com o controlador PD é mostrado na Figura 72. Esta simulação é efectuada devido ao facto de fornecer uma ideia do comportamento do sistema real.

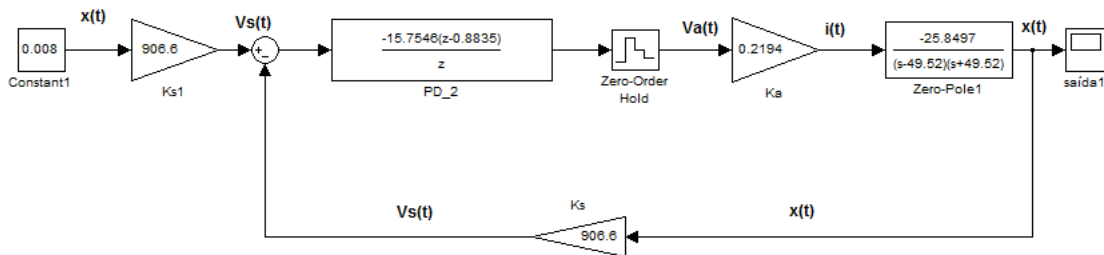


Figura 72 Diagrama de blocos do sistema com o controlador PD

O resultado da simulação é apresentado na Figura 73, sendo bastante aceitável com um tempo de subida de $t_r = 0.04$ s e um tempo de estabelecimento muito rápido. De notar que o sistema também não apresenta *overshoot*. Nota-se também que o sistema não estabiliza no ponto desejado ($x_0 = 8$ mm), mas sim em 0.0108 mm.

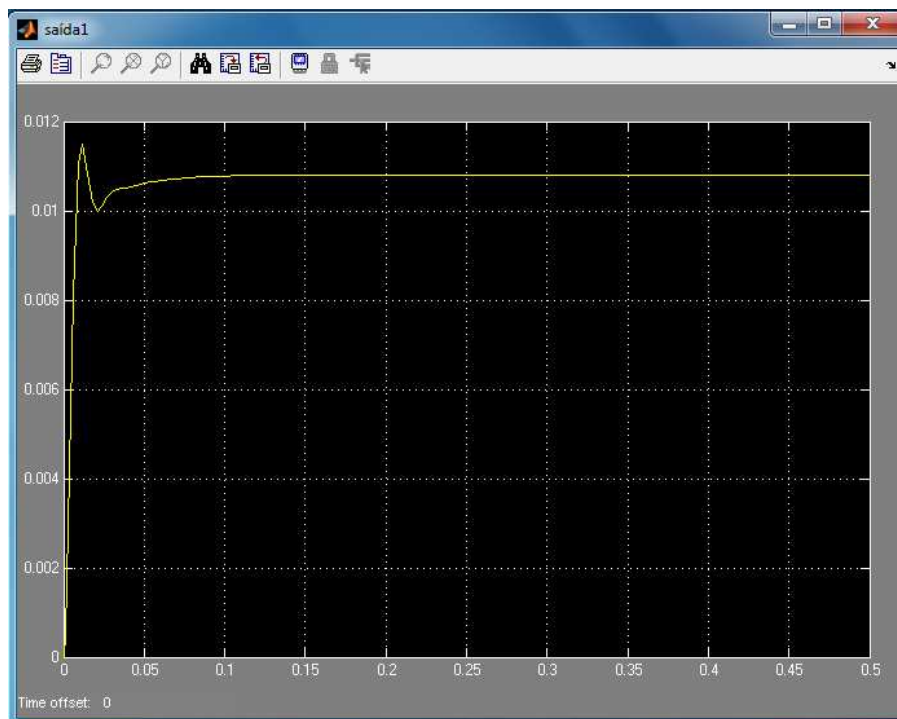


Figura 73 Resultado da simulação no SIMULINK

O erro do sistema pode ser ajustado alterando o ganho do controlador. Por exemplo, utilizando $K = 38,7546$ (em vez de $K = 15,7546$), obtemos a resposta ilustrada na Figura 74.

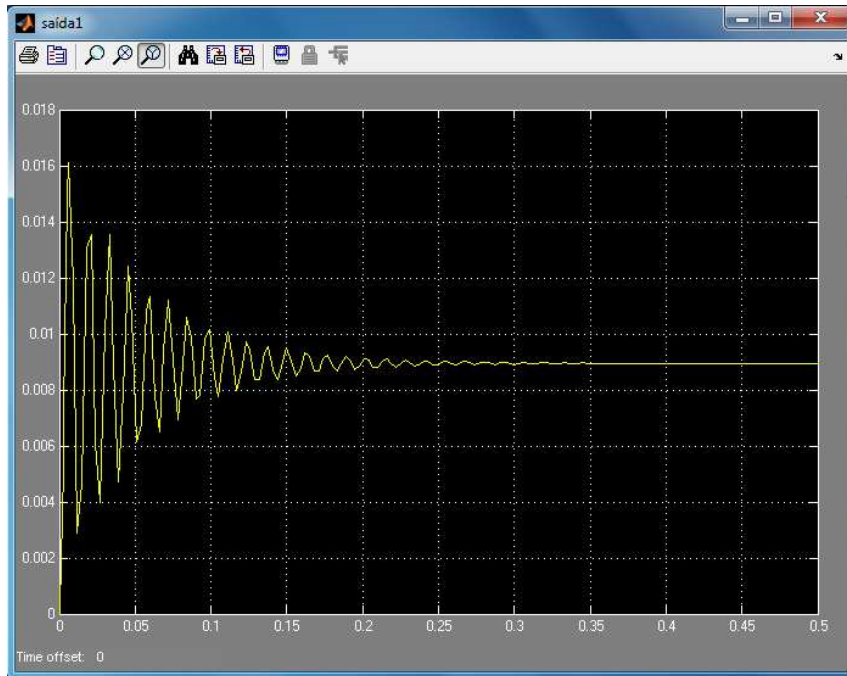


Figura 74 Resultado da simulação com alteração do ganho do controlador para $K = 38,7546$

Após as simulações efectuadas no SIMULINK foi implementado o controlador no sistema de levitação real. De notar que o controlador implementado no sistema real sofreu uma pequena alteração relativamente ao utilizado na simulação no SIMULINK. Para melhor sintonia do sistema real, o controlador passou a ter a seguinte forma:

$$D(z) = 22,303 \frac{z - 0,8992}{z} \quad (91)$$

Assim, tanto o ganho como o valor do zero sofreram pequenos aumentos relativamente ao valores originais $K = 15,7546$ e $\alpha = 0,8835$.

As experiências efectuadas com o controlador PD, foram exactamente iguais às realizadas com o controlador em avanço da secção anterior. Assim, foi realizado o teste da referência de 8 mm, seguindo-se a entrada de referência em forma de onda sinusoidal e, por fim, a experiência com a entrada de referência em forma de onda quadrada. Os resultados destas experiências encontram-se ilustrados nas Figuras 75 - 77.

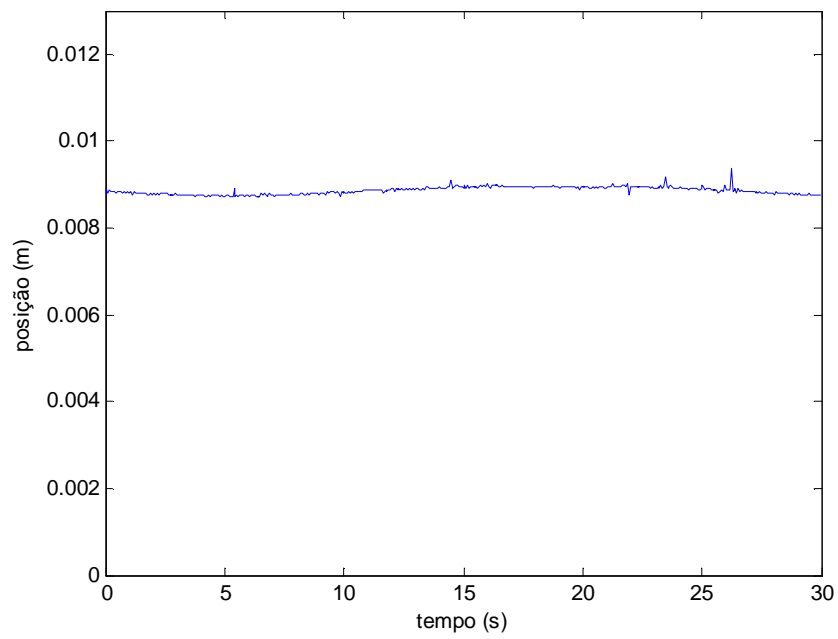


Figura 75 Resultado da experiência com referência igual a 8 mm

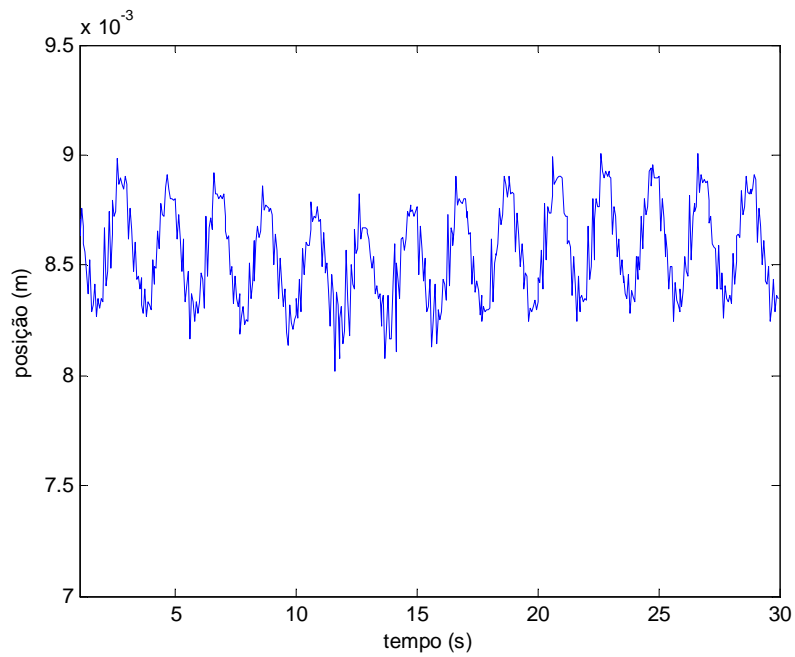


Figura 76 Resultado da experiência com referência em forma de onda sinusoidal de 0,2 mm

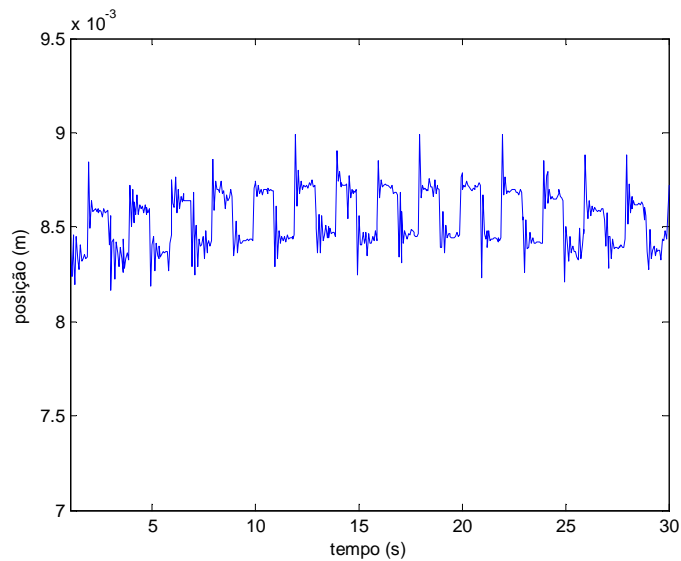


Figura 77 Resultado da experiência com referência em forma de onda quadrada de 0,1 mm

A Figura 78 mostra o gráfico da resposta de saída para uma entrada em degrau de uma onda quadrada com variações de 0,2 mm.

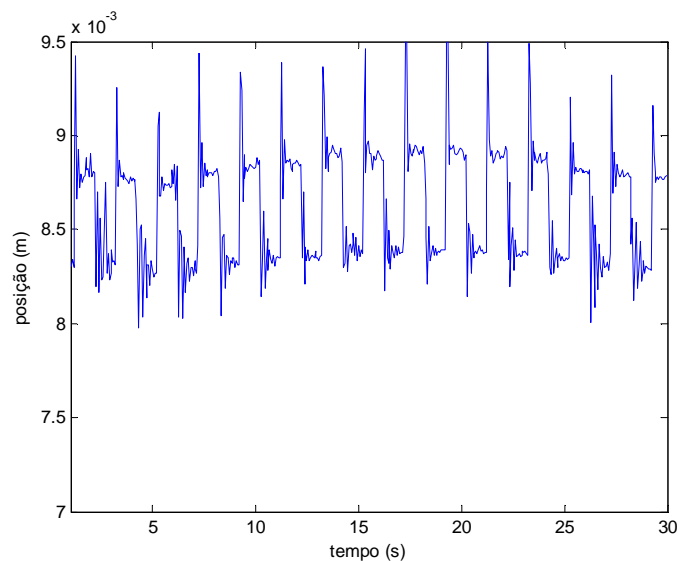


Figura 78 Resultado da experiência com referência em forma de onda quadrada de 0,2 mm

Dado que o sistema permitia recolher um maior número de amostras, pois o objecto mantinha-se a levitar durante um largo período de tempo, foi mantida a referência com variações de 0,2 mm e aumentou-se o número de amostras, resultando no gráfico representado na Figura 79. Este aumento também foi aplicado à entrada de onda sinusoidal, como ilustra a Figura 80.

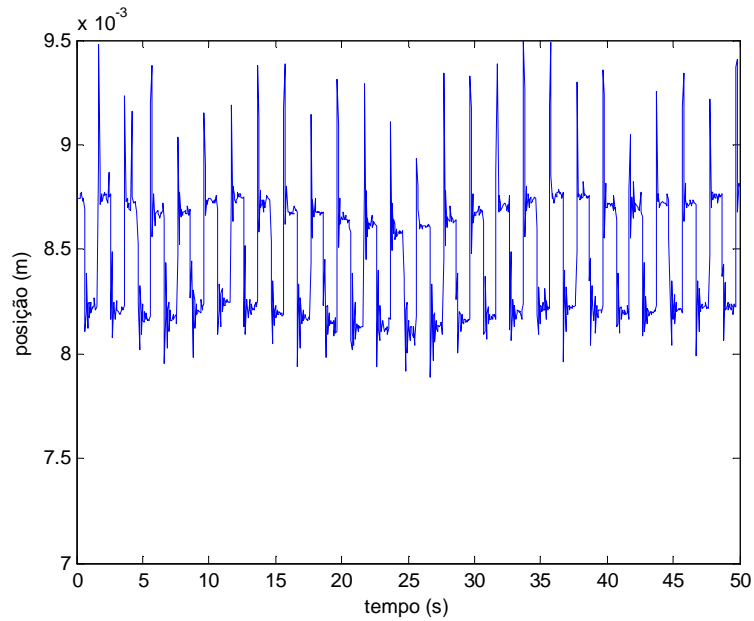


Figura 79 Resultado da experiência com referência em forma de onda quadrada com variação de 0,2 mm, mas com mais amostras do sinal recolhido

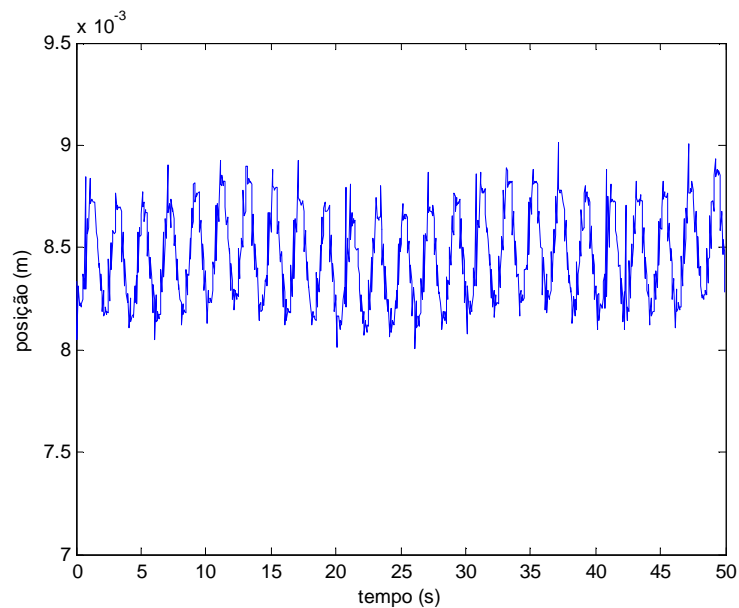


Figura 80 Resultado da experiência com referência em forma de onda sinusoidal com variação de 0,2 mm, mas com mais amostras do sinal recolhido

Os gráficos mostram, mais uma vez, que o sistema estabiliza e segue entradas com amplitudes variáveis em torno do ponto de equilíbrio, fornecendo resultados muito aceitáveis, e comprovando o bom desempenho dos controladores projectados.

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo são tecidas as conclusões obtidas a partir dos resultados e da implementação dos diversos controladores, assim como apresentadas algumas propostas de melhoria e de evolução do sistema.

6.1. ANÁLISE E CONCLUSÕES DOS RESULTADOS

O desafio de desenvolver um sistema de levitação magnética e um controlador para estabilizar um sistema instável, bem como construir tudo de raiz, foi algo bastante motivador, mas também bastante complexo, em que muitas adversidades foram ultrapassadas para o sucesso deste projecto.

Nos capítulos anteriores foram apresentados os resultados experimentais obtidos com o controlador em avanço e com o controlador PD. Da análise dos resultados obtidos

verificou-se que tanto com o controlador em avanço como com o controlador PD os objectivos foram alcançados.

É possível verificar que os controladores projectados e simulados não foram implementados no sistema real. Tal sucedeu porque os sistemas foram simulados para o maior valor de frequência natural (ω_n) possível para que o sistema estabiliza-se, o que torna a resposta muito rápida. No sistema real, a resposta teria que ser mais lenta, o que fez com que na implementação real dos controladores fossem ligeiramente diferentes.

No que concerne às experiências efectuadas, é possível verificar que foram todas elas concluídas com sucesso. De realçar que a experiência mais complexa foi a efectuada com a entrada de referência em onda quadrada, devido ao facto desta oscilação ser mais brusca do que a obtida com a onda sinusoidal. A própria implementação demonstra que as oscilações são mais elevadas do que com a onda sinusoidal; o que também é demonstrativo deste facto é o modo como a implementação foi efectuada. Primeiro foi implementada a onda quadrada com oscilação de 0,1 mm e só após a conclusão com sucesso desta experiência é que foi realizada a tentativa com a oscilação de 0,2 mm em torno do ponto de equilíbrio ($x_0=8$ mm), que também foi bem sucedida. Com a implementação da onda sinusoidal não houve esse cuidado visto que a implementação com 0,2 mm de oscilação em torno do ponto de equilíbrio apresentou um comportamento mais regular, visto que a oscilação é efectuada de uma forma mais suave do que com a aplicação da onda quadrada no sinal de referência.

É ainda possível concluir que os resultados são muito semelhantes, devido ao facto do controlador em avanço ter as mesmas características do controlador PD. Através da análise dos gráficos verifica-se que a diferença mais notória é com a implementação do controlador PD, pois o sistema possui oscilações menos significativas, estabilizando mais rápido do que com a utilização do controlador em avanço. Mais, persiste um problema no sistema, o erro em regime permanente nunca é anulado, logo o sistema nunca estabiliza exactamente no ponto de equilíbrio de 8 mm.

6.2. PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

À medida que o projecto foi avançando foram detectadas algumas falhas, surgindo novas ideias para futuras melhorias no sistema.

O primeiro problema a ser solucionado seria o aquecimento do electroíman. O aquecimento interfere com o ganho do controlador, visto que a resistência do electroíman diminui. Com o aquecimento do electroíman é necessário haver um ajuste constante do ganho do controlador, o que torna o sistema pouco robusto, não permitindo também o seu funcionamento contínuo, sendo necessário haver interrupções do trabalho para que o electroíman possa arrefecer. Assim, o electroíman exigia um projecto mais cuidado.

Outra melhoria a ser efectuada seria o tipo de comunicação utilizada entre o computador e o microcontrolador. Foi possível verificar que o envio contínuo de dados interferia com o controlo do sistema, o que provocou um atraso forçado no envio dos dados. Esta transmissão é lenta porque são necessários 10 *bits* para o envio de um carácter. Uma alternativa seria a comunicação USB, sendo esta mais rápida. O que poderia também contribuir para a melhoria do envio de dados seria a utilização de um microcontrolador com maior capacidade de memória de dados, para ser possível criar um vector que armazenasse os dados a serem enviados pela USART para o PC, visto que na memória de programa só se podem ler valores.

Outra opção para a melhoria do sistema passaria também pelo sensor de posição. O sensor utilizado dificulta bastante as medições, visto que sendo um sensor luminoso é extremamente sensível a variações. Existem opções que permitem maior exactidão, tais como a utilização de um *array* de sensores luminosos juntamente com um *array* de *leds*. Os sensores podem ser fototransistores ou fotodiodos. Outra possibilidade será a utilização de um sensor de efeito de Hall, que são sensores magnéticos que se baseiam no princípio de interacção entre campos magnéticos e as cargas eléctricas, como aliás já anteriormente foi referido. Por fim, pode-se adoptar a utilização de um sonar. Com este sensor é possível medir a distância do sensor ao objecto a levitar, logo é possível sabermos a distância exacta do objecto ao electroíman e a única medição necessária será a da distância do sonar ao electroíman.

Referências Documentais

- [1] Martins, Gonçalo, “Comboios de levitação”, visitado em 19/11/2010, disponível em <http://alumni.ipt.pt/~goncalom/Maglev.htm>
- [2] Rodrigues, A., Sena H., Martini R., Molgato R., “Levitação Magnética”, 2009, visitado em 19/11/2010, disponível em <http://pt.scribd.com/doc/33803452/Levitacao-Magnetica-Exelente>
- [3] Quintas, D., Barbosa, H. “ Levitador Magnético”, 2009, visitado em 23/11/2010, disponível em <http://eletromagnetismoifef.blogspot.com/2009/03/levitador-magnetico.html>
- [4] Sousa, B., Marques, S., “Sistema de levitação magnética”, Instituto Politécnico de Tomar – Escola Superior de Tecnologias, 2007
- [5] Modelo Educativo de um levitador magnético, Santana M., Ferreira J. e Salazar A., 2001, visitado em 09/12/2010, disponível em <http://www.pp.ufu.br/Cobenge2001/trabalhos/MTE070.pdf>
- [6] Transrapid International – Sistema de Levitação, visitado em 03/03/2010, disponível em http://www.transrapid.de/cgi-tdb/en/basics.prg?session=55f04a3f4b8da431_652721&a_no=41
- [7] Transrapid International – Sistema de Propulsão, visitado em 03/03/2010, disponível em http://www.transrapid.de/cgi-tdb/en/basics.prg?session=55f04a3f4b8da431_652721&a_no=43
- [8] Patsko, L., “Aplicações, funcionamento e utilização de sensores”, Dezembro 2006, visitado em 03/03/2011, disponível em http://www.pictronics.com.br/downloads/apostilas/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf
- [9] Silva, L., Cutin, M., Machado, S., “Sistema de Levitação Electromagnético controlado por computador”, Janeiro de 2001, visitado em 20/03/2011, disponível em <http://dc143.4shared.com/doc/-UfRmrf/preview.html>
- [10] Souza, U., Pereira, T., “Fotodiodos e Fototransistores”, visitado em 10/04/1020 disponível em <http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/Uilian&Thiago.pdf>
- [11] “Microcontroladores PIC18-Aprenda e Programe em Linguagem C”, 1ª Edição, Editora Érica Ltda, 2009
- [12] Campo Magnético – Espira e solenóide, visitado em 11/12/2010, disponível em <http://educacao.uol.com.br/fisica/campo-magnetico-espira-e-solenoide.jhtm>
- [13] Levitação magnética ou MAGLEV, visitado em 11/12/2010, disponível em <http://www.ifi.unicamp.br/~knobel/FI204/maglev.pdf>

- [14] Super turbina eólica utiliza levitação magnética, visitado em 06/02/2011, disponível em <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010115071130>
- [15] Oliveira, Marco. e Zucatelli, Fernando, Controlo de servomotores CC, 2007, visitado em 16/10/2009, disponível em <http://www.scribd.com/doc/16300774/Controle-de-Servomotores-CC>
- [16] Lourenço, João, Sintonia de controladores PID, Janeiro de 2007, visitado em 19/10/2009, disponível em <http://ltodi.est.ips.pt/smarques/CS/Pid.pdf>
- [17] Ogata, K. Engenharia de Controlo Moderno. 4ª ed. ,S.Paulo, Prentice Hall, 2007
- [18] Barbosa, Ramiro, Controlo PID - parteI, Acetatos de apoio às aulas de SISCA, 2009/2010
- [19] Dias, Mário, Electromagnetismo, Junho de 2009, visitado em 31/03/2011, disponível em http://www.anossaescola.com/cr/webquest_id.asp?questID=2005
- [20] MAGLEV – os comboios do futuro, Maio de 2009, visitado em 31/03/2011, disponível em <http://sites.google.com/site/maglevcomboiosdofuturo/tipos-de-maglev/o-projecto>
- [21] Fototransistor, Março de 2011, visitado em 31/03/2011, disponível em <http://www.aprenderelectronica.com.br/o-que-e-fototransistor-como-funciona.php>
- [22] Boletim Técnico FreeBR, Agosto de 2007, visitado em 07/04/2011, disponível em <http://www.freebr.com/boletim/boletim.tecnico.agosto2007.pdf>
- [23] Datasheet LMD18201
- [24] Datasheet INA128
- [25] Barbosa, Ramiro, Equivalentes discretos, Acetatos de apoio às aulas de SICOC, 2008/2009

Anexo A. Hardware

A.1. PLACA – CIRCUITO ACTUADOR

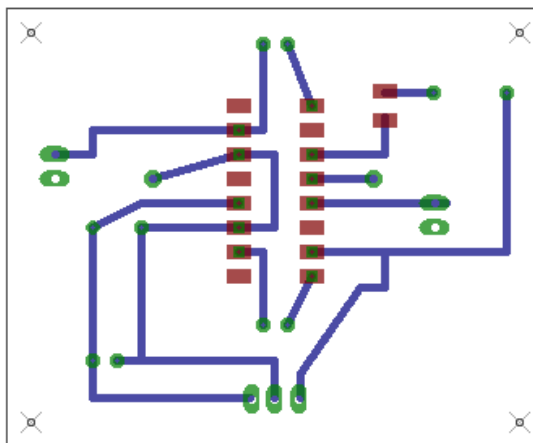


Figura 81 *Layout* da placa do circuito actuador

A.2. PLACA – CIRCUITO SENSOR

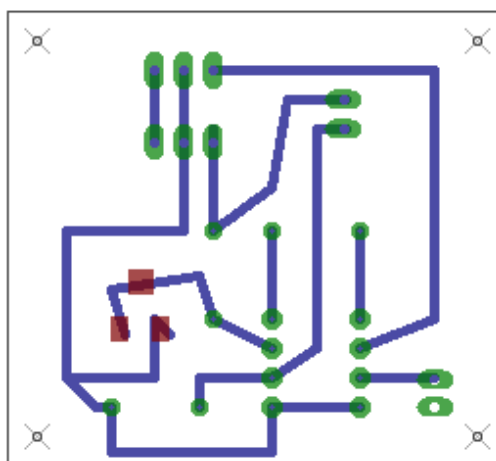


Figura 82 *Layout* da placa do circuito actuador

A.3. PLACA – COMUNICAÇÃO E MICROCONTROLADOR

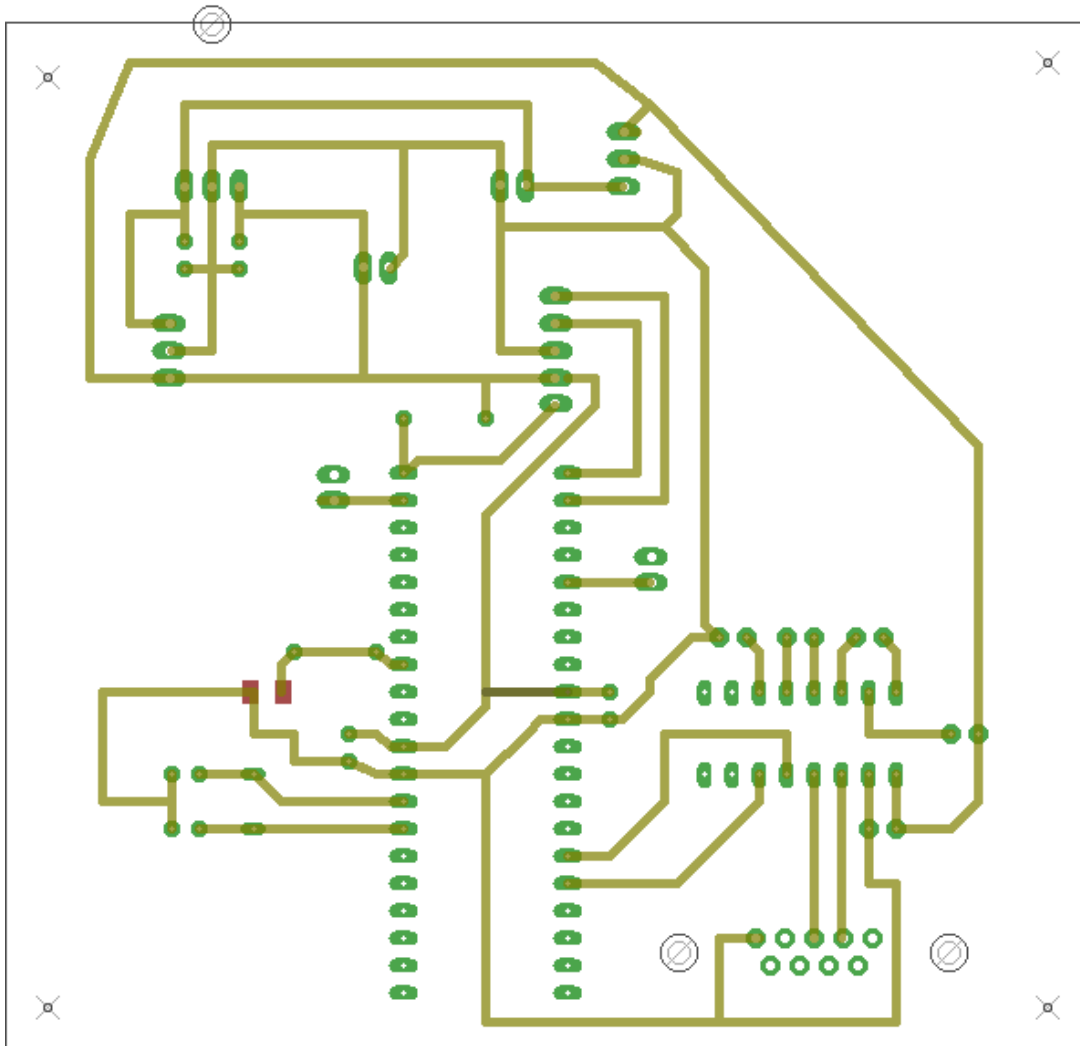
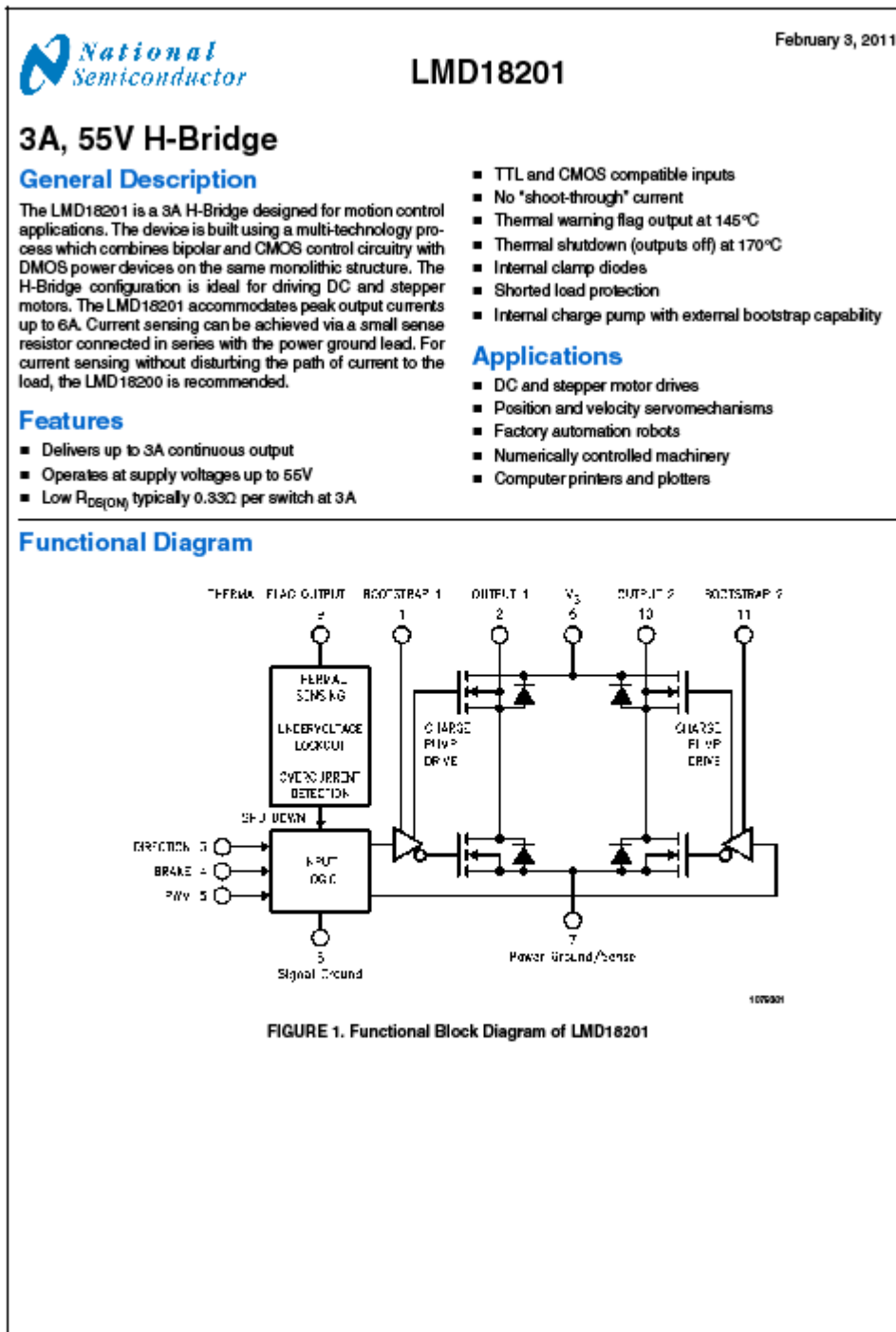


Figura 1 *Layout* da placa de comunicação e do microcontrolador

A.4. DATASHEET LMD18201T



LMD18201 3A, 55V H-Bridge