

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MAGNÉTICO PARA CONTROLAR A POSIÇÃO DE CÁPSULAS ENDOSCÓPICAS

André Filipe Ferreira Duarte

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na especialização de Energia, orientada pelo Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira e pelo Doutor José Miguel Alberto e apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

Fevereiro de 2020



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a toda a minha família, que foram o meu pilar ao longo de todos os momentos nestes últimos anos. Em especial à minha Mãe, ao meu Pai, à minha Irmã e aos meus Avós* por todo o apoio, carinho e força ao longo de toda a minha vida. Sem eles nada disto teria acontecido! Um eterno obrigado não chega!

Aos meus verdadeiros Gouveenses, ao Alessandro, ao Tiago Antunes e à Secção Jovem do RFV. A todos vocês não sei como posso agradecer todos os momentos passados, as nossas conversas, aos nossos momentos de lazer e a nossa cumplicidade. Um obrigado é pouco!

Um enorme obrigado a todos aqueles com quem tive o prazer de trabalhar ao longo da minha passagem pelo NEEEC/AAC, onde tenho que destacar o João Bento, o João Martins, o Marco Silva, o Bruno Martins e o Moisés Dias, que ficarão na memória como os companheiros da boa caneca depois das reuniões intermináveis. À Ana Rita Rodrigues, à Joana Esteves e ao Albuquerque pelas noites passadas a partilhar as diversas visões do que é o Associativismo e me terem dado força para que esta tese acabasse com um sorriso.

Um forte obrigado ao meu parceiro dos trabalhos infatigáveis, Joel Pessoa, o homem que corrigia todos os relatórios até à última vírgula. Sem esta muleta não teria alcançado o que alcancei.

Aos meus fieis colegas do laboratório, ao Miguel Antunes, ao André Silva e ao José Alberto. A todos um grande obrigado pelo apoio, pelas nossas conversas nas pausas e, claro, pela partilha de noites a trabalhar.

Um agradecimento todos os meus Professores, que em muito contribuíram para que eu enriquecesse e pudesse chegar onde cheguei, em especial ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Ferreira, por me ter lançado o desafio de iniciar este projeto, por toda a orientação e aconselhamento ao longo de todo o trabalho.

A todos aqueles que fizeram parte deste percurso e não foram mencionados até aqui e, por fim, a esta cidade que é Coimbra! Que só quem por cá passa percebe a sua mística e não lhe consegue ficar indiferente!

A todos, um muito obrigado.

Entidades

Este trabalho foi apoiado por:



Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra

Abstract

The use of magnetic fields and magnetic forces has been more and more frequent in object control, for instance, in small robots or capsules. In the medical field, this technology has brought innovative alternatives to the methods of treatment and diagnostics. These methods can be painful and cause some discomfort to the patient since most of them are invasive methods such as Digestive Endoscopy or Colonoscopy. These problems led to the idea of making these processes less invasive to the human body using endoscopic capsules controlled by means of magnetic fields.

The focus of the research study is on the development of a system to control endoscopic capsules. After the design of the system, a 3D prototype's structure was built. The prototype consists of three coils, each producing its own magnetic field, and a power stage with three step-down DC-DC converters. The produced magnetic fields, make it possible to control the position of the permanent magnet capsule.

A video camera was used to detect the position of the permanent magnet capsule and two different position control algorithms were developed. These algorithms generate signals using Pulse Width Modulation which are then used to control to magnetic field by each coil.

Using the most effective of the two proposed position control algorithms, it has been experimentally demonstrated that the position of the capsule can be precisely controlled through the magnetic fields generated by the three-coil system.

KEYWORDS: Magnetic Fields, Magnetic Forces, Endoscopic Capsules, 2D Position Control using Computer Vision, Step-Down DC-DC Converter

Resumo

A utilização de campos e forças magnéticas é cada vez mais frequente no que diz respeito ao controle de objetos, nomeadamente pequenos robôs ou cápsulas. Na área da medicina este tipo de sistemas vieram trazer soluções inovadoras no que concerne aos métodos de tratamentos e diagnósticos utilizados. Os métodos atualmente utilizados podem tornar-se dolorosos e causar algum desconforto ao paciente, uma vez que se tratam de processos invasivos como é o caso da Endoscopia Digestiva e a Colonoscopia. É com base nisto que surgiu a ideia de tornar estes processos menos invasivos ao corpo humano utilizando cápsulas endoscópicas controladas através de campos magnéticos.

O foco deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema capaz de controlar uma cápsula endoscópica. Depois de se ter feito o projeto do sistema, construiu-se a estrutura do protótipo em 3D. O protótipo é constituído por três bobinas, que produzem o seu campo magnético, e um andar de potência com três conversores DC-DC redutores (*Buck*). Os campos magnéticos produzidos por este sistema permitem controlar a posição da cápsula de ímanes permanentes.

Para se detetar a posição da cápsula de ímanes permanentes foi utilizada uma *webcam* e foram desenvolvidos dois algoritmos de controle de posição diferentes. Estes algoritmos geram os sinais PWM utilizados para o controle das bobinas, com *duty-cycle* variável.

Utilizando o algoritmo mais eficaz dos dois propostos, demonstrou-se experimentalmente que a posição da cápsula pode ser controlada com precisão, aplicando os campos magnéticos gerados pelo sistema das três bobinas.

PALAVRAS-CHAVE: Campos Magnéticos, Forças Magnéticas, Cápsula Endoscópica, Controle de Posição 2D usando Visão por Computador, Conversor DC-DC Redutor

Conteúdo

Abstract	v
Resumo	vii
Conteúdo	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Acrónimos	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura do Documento	2
2 Revisão da Literatura	3
2.1 Cápsulas Endoscópicas	3
2.2 Sistemas de Controlo Magnéticos	6
3 Enquadramento Teórico	11
3.1 Campo Magnético	11
3.2 Sistemas de Controlo	15
3.2.1 Malha Fechada	15
3.2.1.1 Realimentação (<i>Feedback</i>)	15
3.2.2 Malha Aberta	15
3.3 Posição	16
3.4 Conversor DC-DC Redutor (<i>Buck</i>)	17

3.4.1	<i>Ripple na Corrente</i>	18
3.5	Limites de Exposição aos Campos Magnéticos	19
4	Projeto	21
4.1	Ideia da Configuração	22
4.2	Desenho 3D	23
4.3	Sistema Magnético	26
4.3.1	Objeto Utilizado	27
4.4	Sistema Elétrico	28
4.4.1	Andar Inversor Utilizado	28
4.5	Sistema de Controlo	31
4.5.1	<i>Matlab R2019b</i>	31
4.5.2	<i>National Instruments</i>	31
4.6	Deteção da Posição	32
4.7	Algoritmo de Controlo	32
4.7.1	Ligação aos Equipamentos	33
4.7.2	Reconhecimento da Posição	34
4.7.3	Processamento	35
4.7.3.1	Exponencial	35
4.7.3.2	Ponderação	36
4.7.4	Geração do Sinal	37
4.8	Testes Iniciais de Funcionamento	37
5	Experiências e Resultados	39
5.1	Comparação entre os Dois Algoritmos de Controlo	40
5.2	Estabilização no Ponto Central	40
5.3	Estabilização num Ponto Aleatório	42
5.4	Seguimento de Pontos	45
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	49

Apêndices	A-1
Apêndice A Criação da Trajetória	A-1
Apêndice B Inicialização da <i>Webcam</i>	B-1
Apêndice C Ligação ao Módulo da NI	C-1
Apêndice D Processamento de Imagem	D-1
Apêndice E Algoritmo de Controlo	E-1

Lista de Figuras

2.1	Cápsula com quatro motores, câmara e alimentação por indução [3].	3
2.2	Cápsula com quatro motores, câmara e alimentação por bateria [4].	4
2.3	Cápsula de garras e pequeno motor DC [5].	4
2.4	Cápsula que utiliza o conceito de locomoção de uma minhoca [6].	4
2.5	Sistema e funcionamento da cápsula com eléctrodos [7].	5
2.6	Sistema e cápsula com ímanes permanentes [8].	5
2.7	Cápsulas passivas [9].	5
2.8	Sugestão ilustrativa de uma cápsula do futuro [10].	6
2.9	Protótipo do sistema de Arrays proposto por [11].	6
2.10	Sistema para movimentação de cápsulas endoscópicas [12] [13]	7
2.11	Protótipo de plataforma superior para manipulação de cápsulas [14].	7
2.12	Sistema desenvolvido para controlo de posição e orientação [16].	8
2.13	Configuração das doze bobinas utilizadas no projeto da Siemens e da Olympus [17].	8
2.14	Imagem do protótipo criado pela Siemens e pela Olympus [18].	9
2.15	Movimentos possíveis do projeto da Siemens e da Olympus [19].	9
3.1	Campo magnético criado por dois dipolos diferentes [21].	12
3.2	Orientação das forças entre dois ímanes [21].	12
3.3	Domínios magnéticos num material ferromagnético [20].	13
3.4	Curva de magnetização de um material ferromagnético [20].	14
3.5	Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada [23].	15
3.6	Diagrama de blocos de uma realimentação [23].	15
3.7	Diagrama de blocos de um sistema de malha aberta [23].	16
3.8	Circuito conversor básico de comutação DC-DC [28].	17
3.9	Tensão de saída do circuito [28].	18
3.10	Estados do conversor DC-DC <i>Buck</i>	19

3.11	Valores representativos dos limites de exposição aos campos.	20
4.1	Protótipo experimental completo usado para o trabalho de tese.	21
4.2	Diagrama de blocos para o funcionamento do sistema.	22
4.3	Desenho 3D modelo com múltiplas bobinas.	22
4.4	Desenho 3D das três bobinas desfasadas de 120°.	23
4.5	Desenho 3D do projeto inicial.	23
4.6	Desenho 3D do projeto final.	24
4.7	Desenho 3D das peças do projeto.	25
4.8	Bobinas utilizadas ao longo de todo o projeto.	26
4.9	Exemplo de soma de vetores aplicado num ponto.	26
4.10	Imagens do íman de Neodímio utilizado em diferentes etapas.	27
4.11	Esquema explicativo do alinhamento dos ímanes visto lateralmente.	27
4.12	Esquema do circuito eléctrico do sistema usado.	28
4.13	Andar inversor <i>Infineon Silicon Carbide (SiC)</i>	29
4.14	Placa de potência do andar inversor utilizado.	30
4.15	Placa de sinal do andar inversor utilizado.	30
4.16	Módulos utilizados da <i>National Instruments</i>	32
4.17	Imagem da <i>webcam Logitech HD Webcam C525</i> usada para detetar a posição do objeto.	32
4.18	Imagem de teste criada durante a ligação à <i>webcam</i>	33
4.19	Imagem criada pela <i>webcam</i> para saber a posição do objeto.	34
4.20	Imagens exemplificativas das retas utilizadas no algoritmo, consoante o ponto de referência.	35
4.21	Relação entre as distâncias envolvidas no sistema.	36
4.22	Exemplo de 3 sinais enviados em paralelo para a placa de sinal do andar inversor.	37
5.1	Sinais PWM aplicados ao conversor (a), tensões aplicadas às bobinas (b) e correntes que circulam nas bobinas (c).	39
5.2	Deslocamento do corpo ao longo do espaço (X,Y).	41
5.3	Valores obtidos para a experiência de estabilização no ponto central.	41

5.4	Deslocamento do corpo ao longo do espaço (X,Y).	43
5.5	Valores obtidos para a experiência de estabilização num ponto aleatório P=(400, 300).	43
5.6	Deslocamento do corpo ao longo do espaço (X,Y).	44
5.7	Valores obtidos para a experiência de estabilização num ponto aleatório P=(200, 150).	44
5.8	Pontos de referência utilizados na experiência.	45
5.9	Deslocamento do corpo ao longo do espaço (X,Y).	46
5.10	Valores obtidos para a experiência de seguimento de trajetória.	47
A.1	Função para a criação dos pontos intermédios para a trajetória.	A-1
B.1	Função para a inicialização da comunicação com a <i>webcam</i>	B-2
C.1	Função para a inicialização da comunicação com o Módulo da <i>National Instruments</i>	C-1
D.1	Implementação do algoritmo utilizado para processamento de imagem e obtenção da posição do objeto.	D-1
E.1	Implementação do algoritmo de controlo utilizado para geração dos valores dos <i>duty-cycles</i>	E-1

Lista de Tabelas

5.1	Pontos de referência escolhidos para seguimento.	45
-----	--	----

Acrónimos

AC *Alternate Current.*

DC *Direct Current.*

ICNIRP *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

IGBT *Insulated Gate Bipolar Transistor.*

ISR-UC *Instituto de Sistemas e Robótica, Universidade de Coimbra.*

NI *National Instruments.*

PLA *Polylactic Acid.*

PWM *Pulse Width Modulation.*

RGB *Red-Green-Blue.*

SiC *Silicon Carbide.*

TTL *Transistor-Transistor Logic.*

Capítulo I. Introdução

O controlo de objetos com recurso a forças eletromagnéticas é cada vez mais utilizado em diversas áreas e com diferentes objetivos. Para cada aplicação deste tipo de controlo é sempre necessário a verificação das forças envolvidas, bem como as correntes e intensidades dos campos magnéticos aplicados.

Este conceito pode ser aplicado em diversas áreas como a robótica, onde pode servir para o controlo de posição e movimento de pequenos robôs [1]. Outra área onde esta estratégia pode ser aplicada é a Medicina. Alguns dos tratamentos ou diagnósticos existentes até há pouco tempo podiam ser, para o paciente, algo dolorosos devido às técnicas invasivas usadas na realização da tarefa, como é o caso da Endoscopia Digestiva e a Colonoscopia. De forma a evitar e contornar estes problemas, surgiu a ideia de conseguir controlar cápsulas endoscópicas, através de campos magnéticos externos, de modo a tornar este tipo de intervenções menos invasivas [2].

I.1 Motivação

Tendo por base o tema proposto por este trabalho, a motivação para a sua realização prende-se com desenvolvimento de um sistema capaz de conseguir controlar a posição de um objeto tendo por base a criação de campos magnéticos. Esses campos, ao interagirem com o objeto magnético, similar a uma cápsula, originam forças que permitem assim deslocar o objeto para uma posição definida.

A criação de um protótipo funcional em pequena escala será o objetivo final desta dissertação, provando que o conceito do controlo de uma cápsula, com a utilização de campos magnéticos, é possível com alguma precisão.

I.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um novo sistema de controlo de posição de cápsulas endoscópicas, utilizando apenas campos magnéticos. Este trabalho é acompanhado por um pequeno protótipo funcional que, com base nos campos magnéticos criados por bobinas, permite o controlo, com alguma precisão, da posição de uma cápsula com um íman.

1.3 Estrutura do Documento

O documento está organizado da seguinte forma: depois de ter sido feita a introdução neste Capítulo, no Capítulo 2 é apresentada uma breve revisão da literatura com referência a alguns trabalhos relacionados. O Capítulo 3 apresenta alguns conceitos teóricos na base do funcionamento do sistema. No Capítulo 4 é feita a descrição do protótipo e da sua evolução ao longo do tempo. Ao longo do Capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais obtidos com o protótipo. Por fim, no Capítulo 6 são feitas as conclusões do trabalho e abordadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2. Revisão da Literatura

Antes do desenvolvimento de um sistema, é necessário conhecer sistemas ou tecnologias semelhantes que possam existir no mercado ou que já tenham sido alvo de investigação. Será feita então uma apresentação dos trabalhos existentes sobre as cápsulas endoscópicas e os sistemas de controlo magnéticos.

2.1 Cápsulas Endoscópicas

Começando a analisar os trabalhos relativos a cápsulas endoscópicas, verifica-se que existe uma enorme diversidade de projetos já realizados. Encontram-se projetos tanto a nível da fase de desenvolvimento, como da fase já experimental.

A primeira cápsula a apresentar tem a particularidade de utilizar um sistema de locomoção interno, composto por quatro motores colocados na retaguarda da mesma. Este sistema é controlado internamente e alimentado por um sistema de indução. A parte da frente da cápsula contém uma câmara que comunica sem fios com a unidade externa central de controlo, como se observa na fig. 2.1.

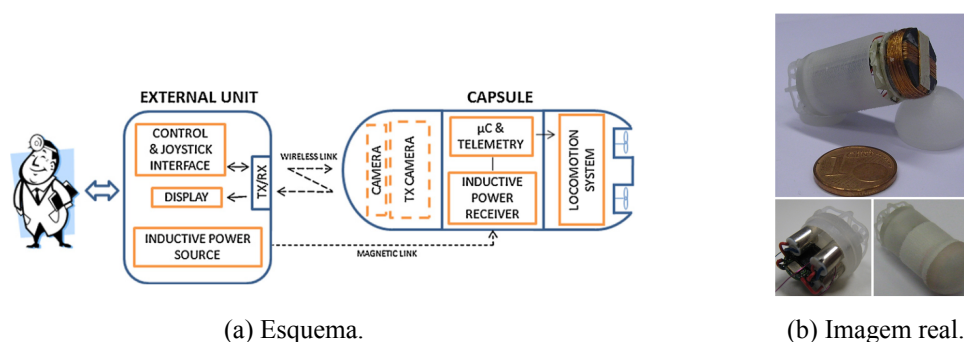


Figura 2.1: Cápsula com quatro motores, câmara e alimentação por indução [3].

Em [4], é apresentado um sistema idêntico, mas que utiliza uma bateria interna em vez da alimentação por indução, como mostra a fig. 2.2.

Na fig. 2.3a está representado outro tipo de cápsula existente, de acordo com [4], que já foi testada em animais e utiliza umas garras móveis. Estas garras abrem quando posicionadas na frente da cápsula e, através de um pequeno motor DC, origina a movimentação das garras na sua direção. Este movimento causa a deslocação para a frente da cápsula, como explica a fig. 2.3b [5].

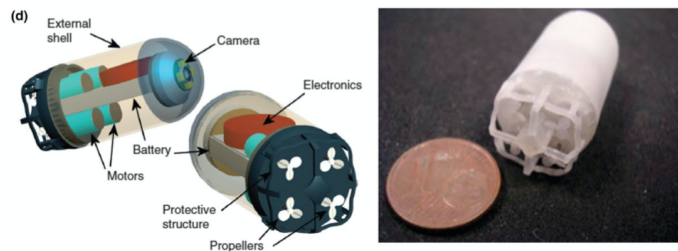
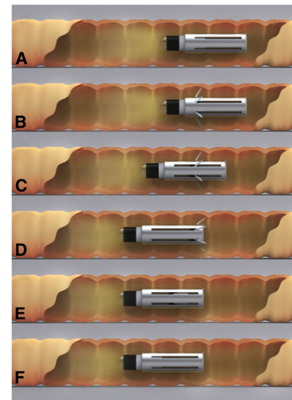


Figura 2.2: Cápsula com quatro motores, câmara e alimentação por bateria [4].



(a) Foto da cápsula.



(b) Explicação da deslocação.

Figura 2.3: Cápsula de garras e pequeno motor DC [5].

Em [6] é utilizado o conceito de locomoção de uma minhoca, ou seja, o movimento através de movimentos de retração e alongamento. Na fig. 2.4 pode observar-se os quatro estados existentes. Inicialmente a cápsula encontra-se no seu estado normal, ativa o mecanismo existente na zona frontal para se segurar à superfície em contacto e retrai-se. Posteriormente, ativa o mesmo mecanismo, mas localizado na parte de trás e desativa o da frente, para que a parte de trás se fixe à superfície, avançando a parte da frente.

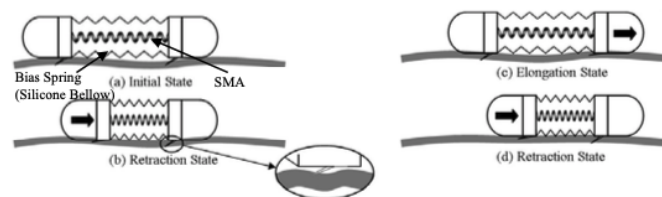
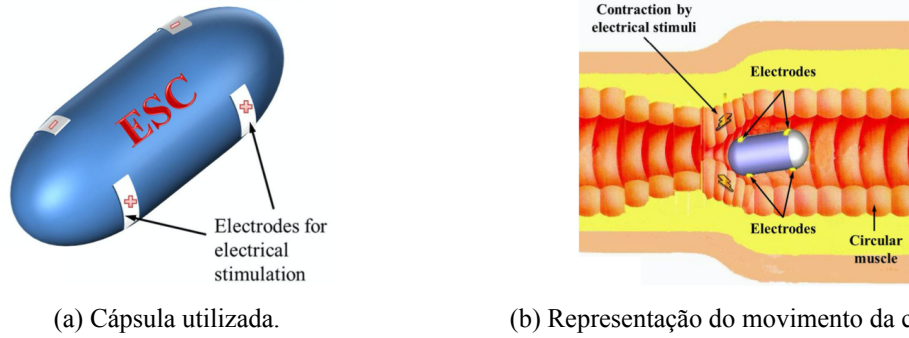


Figura 2.4: Cápsula que utiliza o conceito de locomoção de uma minhoca [6].

Existe também a utilização do mecanismo de contração que o corpo humano possui nos seus órgãos, através de estimulação elétrica [7]. A cápsula contém elétrodos à superfície, como mostra a fig. 2.5a. Ao existir a estimulação elétrica de um dos pares de elétrodos, o músculo contrai e obriga a cápsula a movimentar-se segundo a direção pretendida. O conceito pode observar-se na fig. 2.5b.

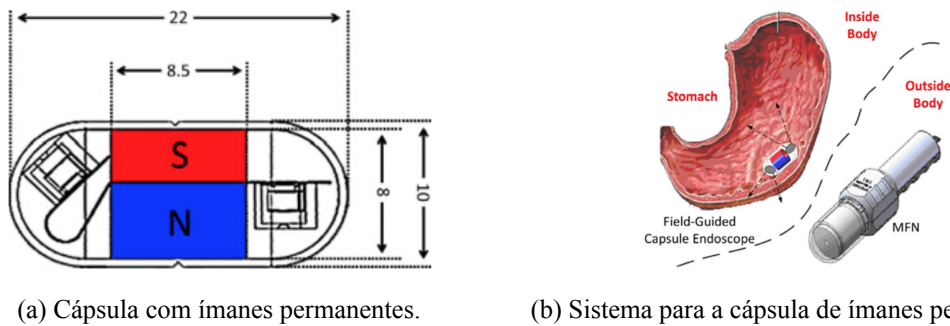
Em [8] é apresentada a cápsula mais parecida à utilizada no projeto desta dissertação, que pode



(a) Cápsula utilizada. (b) Representação do movimento da cápsula.

Figura 2.5: Sistema e funcionamento da cápsula com eléctros [7].

ser observada em fig. 2.6a. Utiliza um íman permanente fixo no seu interior para criar um campo magnético definido, permitindo assim que exista uma interação com um outro íman exterior ao corpo, como se observa na fig. 2.6b. É assim que é feito o controlo da cápsula, uma vez que a ação que o campo produzido pelo íman no exterior do corpo exerce sobre o campo interno criado pelo íman da cápsula, faz com que esta se desloque (aproxime ou afaste), consoante a orientação dos campos.



(a) Cápsula com ímanes permanentes. (b) Sistema para a cápsula de ímanes permanentes.

Figura 2.6: Sistema e cápsula com ímanes permanentes [8].

Ainda sem possibilidade de controlo externo, mas já presentes no mercado são as cápsulas endoscópicas passivas, que são ingeridas como um comprimido e fazem o percurso natural do sistema digestivo. Na fig. 2.7 podem observar-se alguns exemplos, com uma ou duas câmara nas extremidades [9].



Figura 2.7: Cápsulas passivas [9].

É objetivo da área da medicina a conceção de uma cápsula capaz de efetuar diversas funções.

Algumas das funcionalidades necessárias serão: locomoção, localização, visão, telemetria, energia, diagnóstico e ferramentas de tratamento [10], como sugere a fig. 2.8.

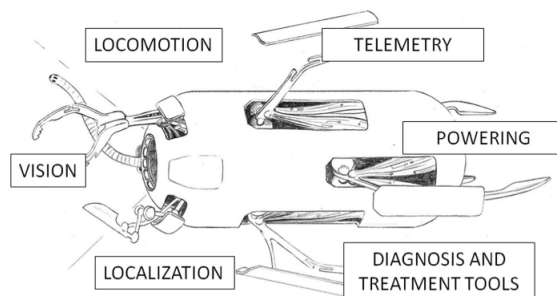


Figura 2.8: Sugestão ilustrativa de uma cápsula do futuro [10].

2.2 Sistemas de Controlo Magnéticos

Em trabalhos já realizados, podemos observar diferentes tipos de técnicas utilizadas para o controlo de cápsulas endoscópicas. Em [11] é aplicado um mecanismo constituído por um par de arrays de electroímans, inferior e superior, onde a cápsula, colocada entre as duas plataformas, é direcionada e controlada através do campo magnético criado por todos os electroímans, como se observa na fig. 2.9.

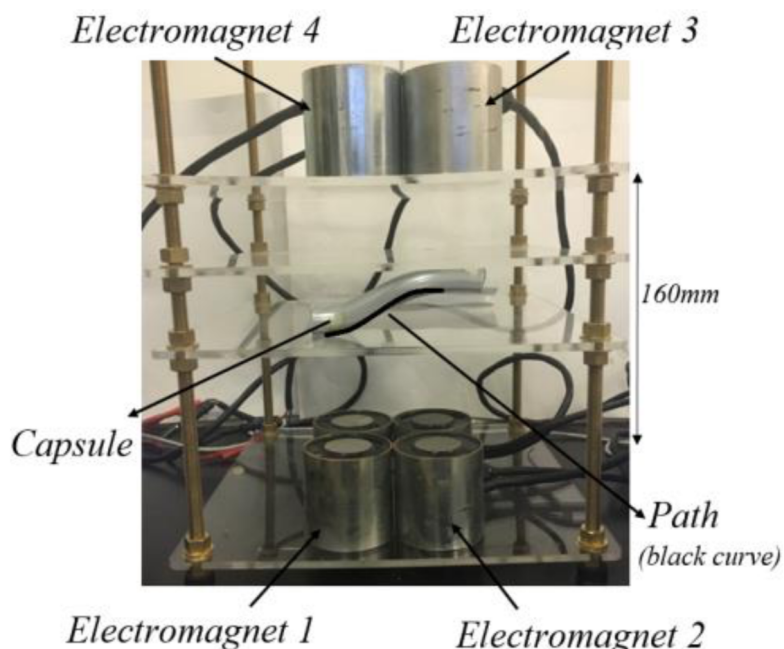


Figura 2.9: Protótipo do sistema de Arrays proposto por [11].

A utilização de um braço robótico equipado com um íman permanente, aproveita a locomoção magnética ativa para controlar e movimentar uma pequena cápsula dotada de pequenos ímanes. Este projeto é demonstrado em [12] [13] e apresentado na fig. 2.10.

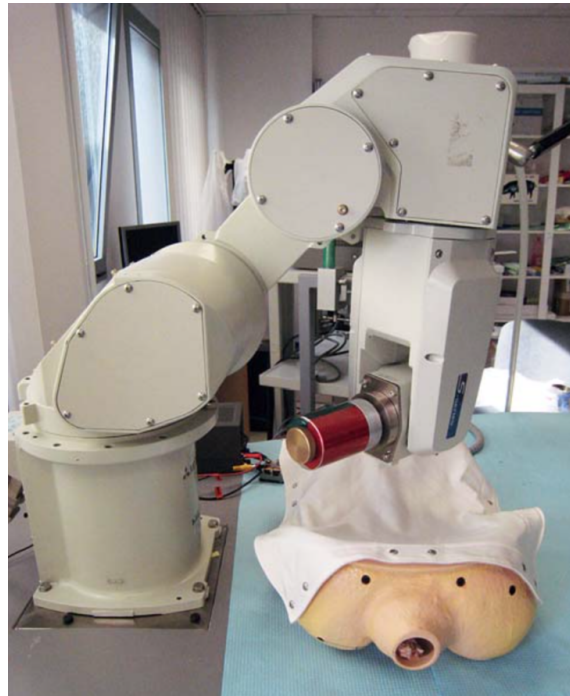


Figura 2.10: Sistema para movimentação de cápsulas endoscópicas [12] [13]

Em [14], como observado na fig. 2.11, existe uma plataforma superior composta por eletroímãs que é usada para a manipulação da cápsula através de campos e forças magnéticas num pequeno protótipo simulador de uma endoscopia.

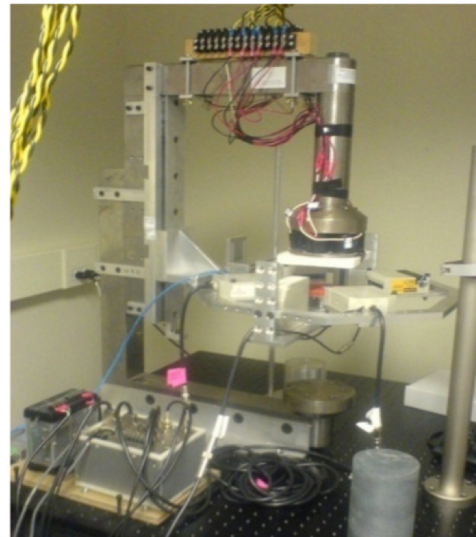
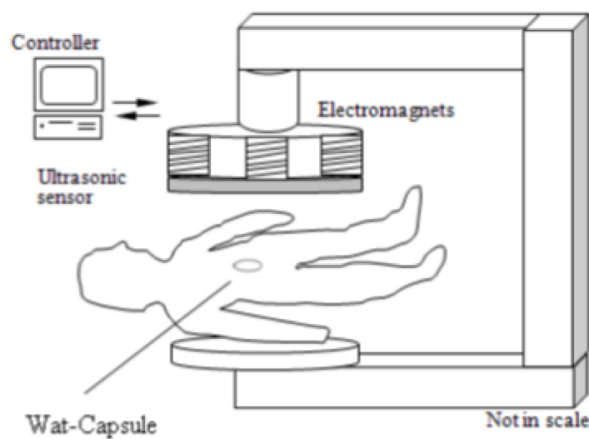


Figura 2.11: Protótipo de plataforma superior para manipulação de cápsulas [14].

Além de toda a componente de investigação sobre a possibilidade de manipulação e controlo de posição de uma cápsula endoscópica, existem também vários estudos específicos sobre a sua orientação, novamente através da utilização de campos e forças magnéticas [15] [16], fig. 2.12.



Figura 2.12: Sistema desenvolvido para controlo de posição e orientação [16].

Num projeto mais recente, realizado pela *Olympus* em conjunto com a *Siemens*, onde já se iniciaram testes em pessoas, é possível realizar movimentos mais complexos que o simples controlo de posição e orientação. São utilizadas doze bobinas que possibilitam a realização de movimentos que antes não eram conseguidos [17], como mostra a fig. 2.13. Pode-se observar que as bobinas identificadas com os números de 1 a 6 estão dispostas como se fossem as faces de um cubo, as bobinas 8/10 e 7/9 estão colocadas sobre o plano superior e sob o plano inferior, respetivamente, perpendicularmente uma à outra e as bobinas 11 e 12 estão colocadas perpendicularmente à face 1 e 2, respetivamente

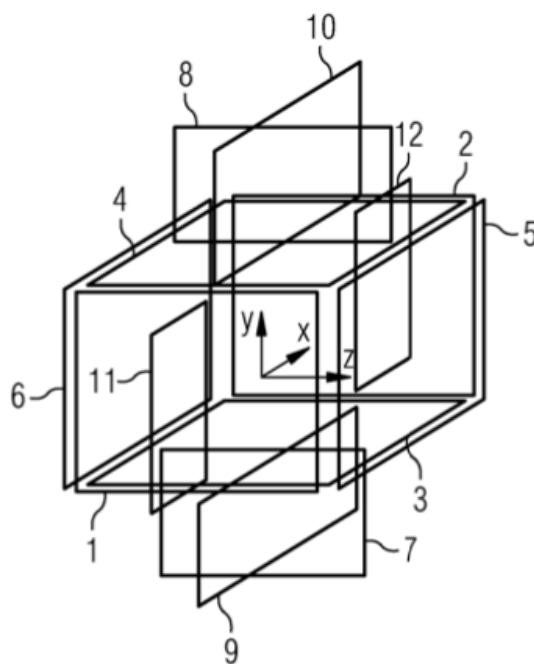


Figura 2.13: Configuração das doze bobinas utilizadas no projeto da Siemens e da Olympus [17].

Na fig. 2.14 podemos ver o protótipo criado e na fig. 2.15 podemos observar alguns dos movi-

mentos que esta nova configuração permite fazer.



Figura 2.14: Imagem do protótipo criado pela Siemens e pela Olympus [18].

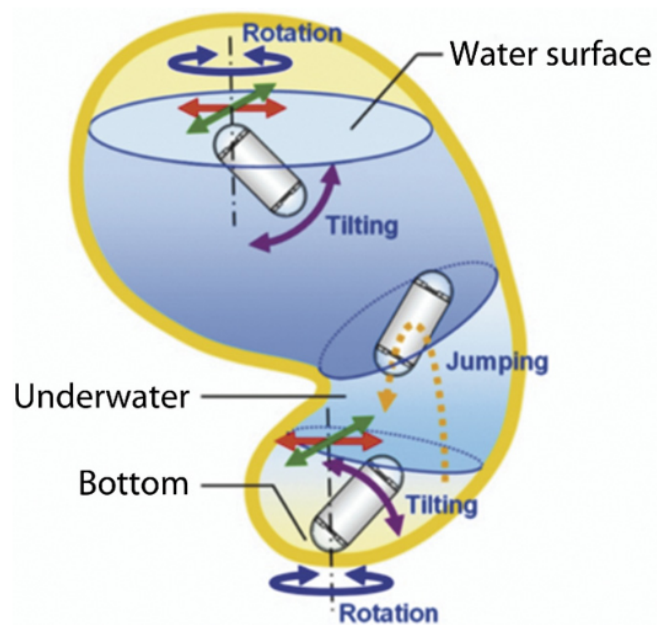


Figura 2.15: Movimentos possíveis do projeto da Siemens e da Olympus [19].

Capítulo 3. Enquadramento Teórico

Para uma melhor interpretação de todo o problema é necessário começar por clarificar alguns dos conteúdos envolvidos nesta temática.

3.1 Campo Magnético

O campo magnético define-se essencialmente pelas duas Equações de *Maxwell* eq. (3.1) [20].

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (3.1)$$

onde \vec{B} é a indução magnética em *tesla* (T) ou *weber/metro²* (Wb/m^2), \vec{H} o campo magnético em *ampere/metro* (A/m), \vec{J} a densidade de corrente em *ampere/metro²* (A/m^2) e \vec{D} a densidade de fluxo elétrico em *coulomb/metro²* (C/m^2).

Passando as eq. (3.1) para a sua forma integral e não considerando a variação do campo elétrico ao longo do tempo vamos obter as eq. (3.2), também conhecidas como Leis de *Gauss* e *Ampère*, respetivamente.

$$\begin{cases} \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 & \text{(Lei de Gauss)} \\ \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_S \vec{J} \cdot d\vec{s} = Ni & \text{(Lei de Ampère)} \end{cases} \quad (3.2)$$

Tendo em conta o material onde se propaga o campo magnético (\vec{H}), este pode relacionar-se com a indução magnética (\vec{B}) através da eq. (3.3).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.3)$$

onde μ é permeabilidade magnética do material. Esta relaciona-se com a permeabilidade do vazio (μ_0) por uma constante que caracteriza o tipo de material onde o campo está inserido a permeabilidade

relativa do material (μ_r) segundo a eq. (3.4).

$$\mu = \mu_r \mu_0 \tag{3.4}$$

O campo magnético pode ser originado através de ímanes permanentes ou de correntes elétricas. Desconsiderando a ocorrência de desmagnetização, o campo criado por ímanes permanentes é constante. Por outro lado, as correntes podem gerar campos magnéticos de diferentes intensidades e variáveis ao longo do tempo.

Segundo o perfil que as linhas de campo apresentam, observa-se a presença de pares de pólos magnéticos, isto é, um polo Norte e um polo Sul, sendo que as linhas se dirigem no sentido do primeiro para o segundo. Dizemos que estamos perante um dipolo magnético, como se observa na fig. 3.1.

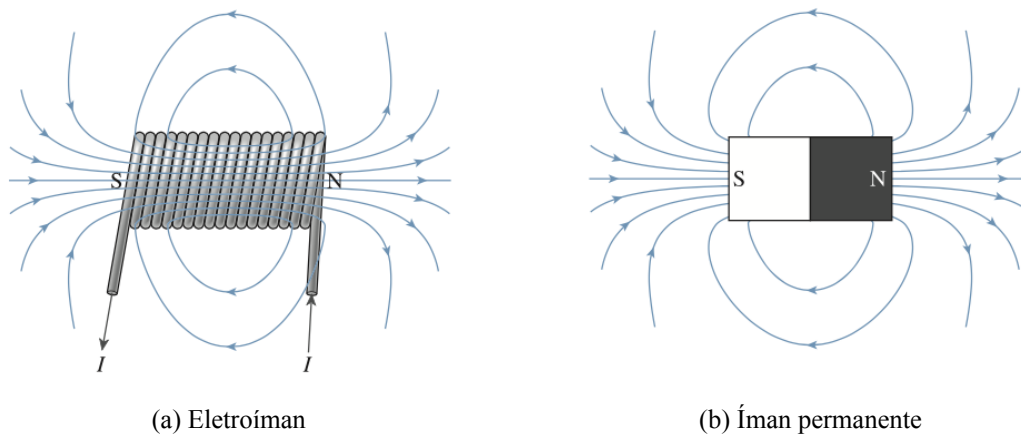


Figura 3.1: Campo magnético criado por dois dipolos diferentes [21].

Tendo por base o perfil do campo tem-se que quaisquer polos magnéticos exercem forças entre si. Sempre que estejam presentes polos com a mesma polaridade, estes repelem-se. Caso sejam polos com polaridades diferentes, estes atraem-se.

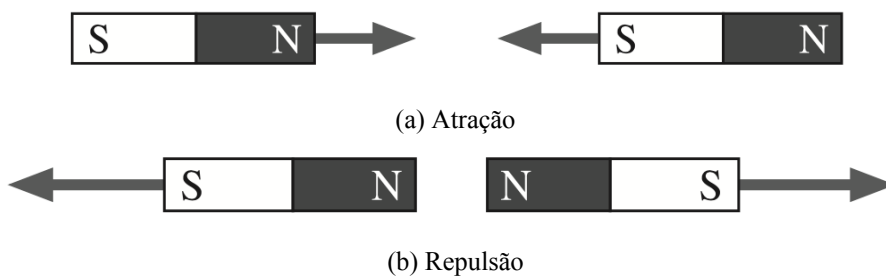


Figura 3.2: Orientação das forças entre dois ímanes [21].

O comportamento dos materiais ferromagnéticos pode ser facilmente explicado tendo em consideração os domínios magnéticos. Um domínio magnético trata-se de uma região na qual todos os dipolos magnéticos estão perfeitamente alinhados. Cada domínio tem a sua direção, originando que um material ferromagnético possa não estar magnetizado. Pode verificar-se na fig. 3.3, vários domínios com as respetivas orientações.

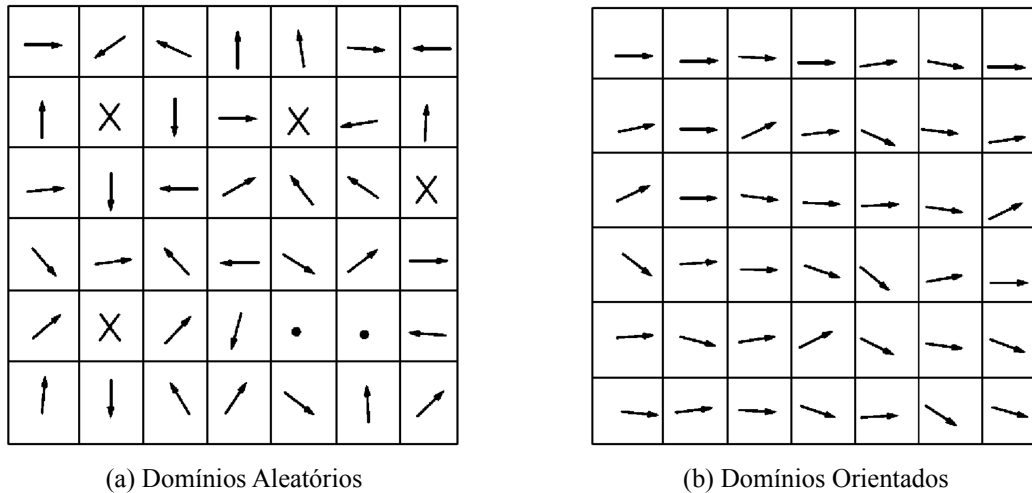


Figura 3.3: Domínios magnéticos num material ferromagnético [20].

Quando o material ferromagnético é colocado sob o efeito de um campo externo, todos os dipolos tendem a alinhar-se segundo esse campo. Isto vai originar com que os domínios que já se encontravam alinhados com o campo aplicado possam aumentar o seu tamanho devido à reorientação dos seus domínios vizinhos. À medida que aplicamos um campo \vec{H} ao material ferromagnético, a indução magnética (\vec{B}) deste torna-se mais forte, selando assim certos domínios quando estes estiverem perfeitamente orientados com o campo. Ocorre assim a magnetização do material que possui uma curva característica, a curva $B - H$, de um material ferromagnético pode ser visualizada na fig. 3.4 [20].

Qualquer campo pode ser criado, no vázio (μ_0), a uma distância r , por um elemento de comprimento dl de um fio percorrido por uma corrente i como nos diz a lei de Biot-Savart na eq. (3.5). Este vai ser sempre perpendicular a dl e a r [22].

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (3.5)$$

No caso de uma bobina, com N espiras, o campo criado vai variar proporcionalmente, ou seja, ao aumentar-se o número de espiras, o campo criado irá aumentar de forma proporcional. O mesmo acontece com a corrente que percorre as espiras, que como se verifica pela lei de de Biot-Savart, na

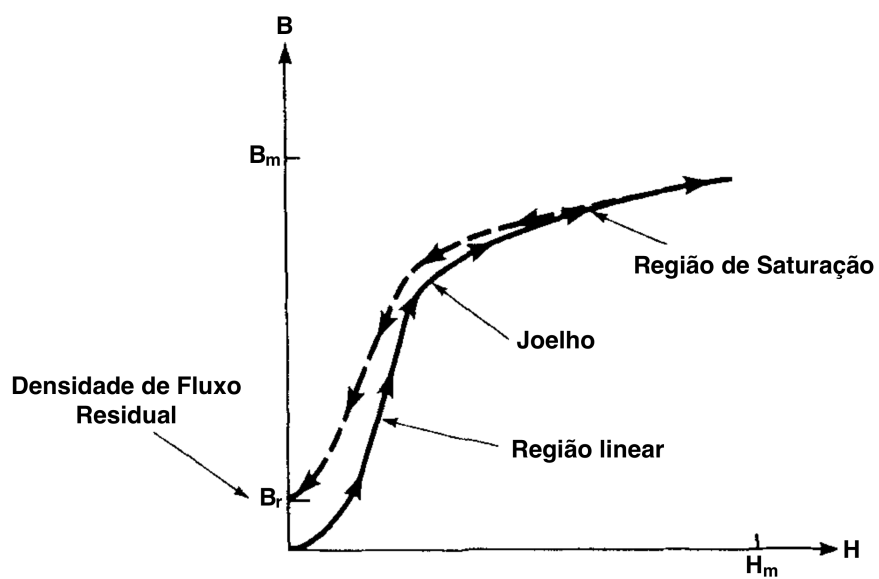


Figura 3.4: Curva de magnetização de um material ferromagnético [20].

eq. (3.5), quanto maior a corrente envolvida na criação do campo, maior será o mesmo.

3.2 Sistemas de Controlo

3.2.1 Malha Fechada

Os sistemas de controlo de malha fechada implicam sempre o uso de sistemas de controlo por *feedback*. Na prática estes sistemas usam a diferença entre o sinal de entrada (referência) e a saída (*feedback*), que pode ser o sinal original ou outro em função desse, como se observa na fig. 3.5. Este sinal vai realimentar o controlador, a fim de reduzir o erro na saída e chegar ao valor desejado.

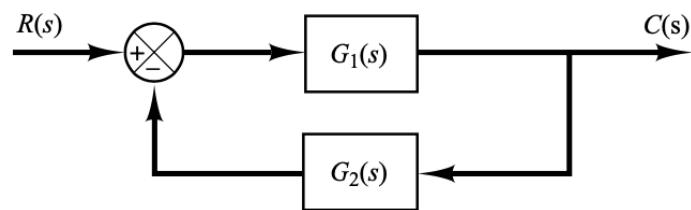


Figura 3.5: Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada [23].

onde $R(S)$, $C(S)$ e $G_i(S)$ correspondem ao sinal de referência, ao sinal de saída e às funções transferência existentes, respetivamente.

3.2.1.1 Realimentação (Feedback)

A relação entre a saída e a entrada de referência pode ser tida em conta resultando assim, num controlo através de *feedback*, como exemplifica a fig. 3.6.

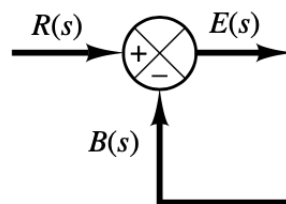


Figura 3.6: Diagrama de blocos de uma realimentação [23].

onde $R(S)$, $B(S)$ e $E(S)$ correspondem ao sinal de referência, ao sinal de *feedback* e ao erro entre os dois anteriores, respetivamente.

3.2.2 Malha Aberta

Os sistemas em que a saída não afeta o controlo, isto é, não existe qualquer *feedback*, é chamado de controlo de malha aberta, representado na fig. 3.7. Em qualquer sistema de controlo de malha aberta a saída não é comparada com a entrada de referência, ou seja, para uma dada entrada existe

uma condição de operação fixa. Assim, a precisão do sistema resulta da sua calibração e da presença ou não de distúrbios, limitando a execução da tarefa desejada. Este tipo de sistemas de controlo pode ser usado quando a relação entre a entrada e a saída são conhecidas e não haja quaisquer perturbações internas ou externas.

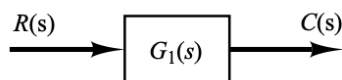


Figura 3.7: Diagrama de blocos de um sistema de malha aberta [23].

onde $R(S)$, $C(S)$ e $G_1(S)$ correspondem ao sinal de referência, ao sinal de saída e à função transferência existente, respetivamente.

Observações

Uma vantagem do sistema de controlo em malha fechada é o facto de não ser sensível a distúrbios externos e a variações internas dos parâmetros do sistema, devido ao *feedback*. É possível usar componentes relativamente baratos e imprecisos para obter um controlo mais preciso de terminado sistema, ao contrário do sistema de malha aberta. O sistema de controlo de malha aberta é mais fácil e barato de construir, no entanto só é recomendável para sistemas cujas entradas são conhecidas antecipadamente e nas quais não há distúrbios ou variações imprevisíveis nos componentes do sistema [23].

3.3 Posição

É essencial ter a informação real ou estimada da posição do corpo que está sobre o efeito das forças magnéticas, pois só assim se conseguem resultados finais mais precisos. A posição de um corpo quando sujeito a um campo magnético pode ser obtida de diversas formas, sejam elas diretas ou indiretas.

No caso de estarmos perante um objeto ferromagnético podemos ter em consideração que a alteração da sua posição, quando colocado sob influência de um campo magnético, faz alterar a indutância do enrolamento que o criou, o que origina alguma variação no *ripple* da corrente [24]. Através destas alterações é possível estimar a posição do corpo.

Outra forma possível para a estimação da posição do corpo é a variação de um campo magnético conhecido e através da alteração de B_i para B_{i+1} . Com a utilização métodos baseados em Jacobianos

[25], é possível estimar a posição seguinte do corpo:

$$p_{i+1} = p_i + \nabla_p f^{-1}(p_i) \Delta B_i \quad (3.6)$$

Por outro lado, a utilização de sensores pode também ser viável quando se trata de saber a posição de um corpo. Os mais utilizados para estes fins são os sensores de Efeito de *Hall* [26], onde é possível obter um valor de tensão que irá corresponder a um certo nível de intensidade do campo magnético a ser medido. Consoante esse valor pode-se determinar uma posição aproximada do objeto.

Na presença de ímãs permanentes podemos também utilizar para deteção da sua posição, a captação de imagens através de uma simples *webcam* e de seguida processar esses dados de forma a que o objeto seja reconhecido nas imagens captadas [27]. Assim, utilizou-se este método no sistema desenvolvido, uma vez que é possível determinar a posição exata do objeto.

3.4 Conversor DC-DC Redutor (Buck)

A tensão aplicada a uma dada carga pode ser controlada através da utilização de conversores. O objetivo é variar a tensão média aplicada à bobina para que se consiga controlar a corrente que nela circula e, conseqüentemente, controlar a força aplicada ao objeto. Sendo assim, o mais adequado para o que se pretende, é o conversor DC-DC redutor (*Buck*), uma vez que se consegue ter uma tensão de entrada DC fixa e controlar-se a tensão média de saída para valores até à tensão aplicada na entrada.

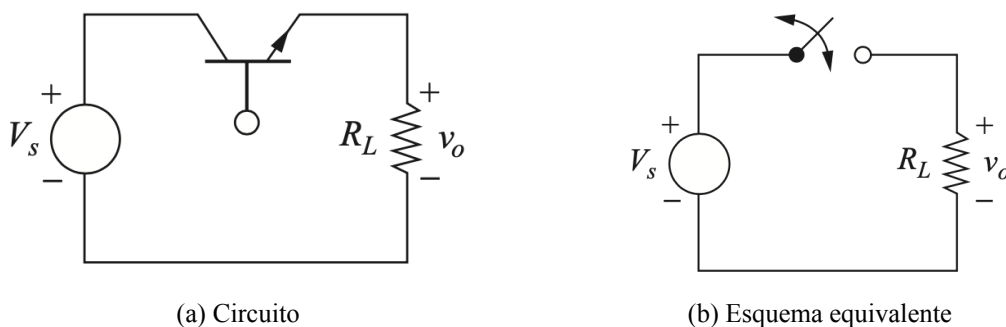


Figura 3.8: Circuito conversor básico de comutação DC-DC [28].

Na fig. 3.8 pode-se observar o circuito básico de um conversor, em que a fig. 3.8a apresenta o circuito com o componente eletrónico e a fig. 3.8b apresenta o circuito equivalente. O objetivo deste circuito é aplicar a tensão de entrada na saída durante um certo período de tempo (t_{on}), como retrata a fig. 3.9, e consoante esse intervalo de tempo a tensão média de saída aplicada à carga irá variar de

0V até ao valor da tensão aplicado na entrada.

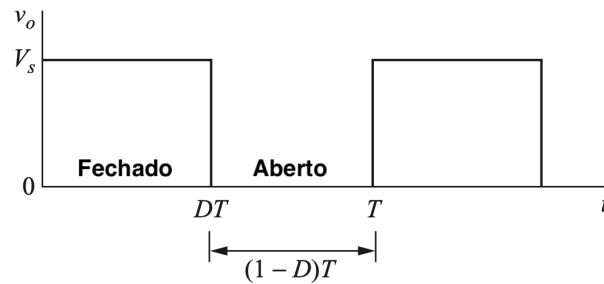


Figura 3.9: Tensão de saída do circuito [28].

Isto pode ser comprovado matematicamente através da eq. (3.7) tendo em conta o *duty-cycle* (D) obtido considerando a eq. (3.8) [28].

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s(t) dt = V_s D \quad (3.7)$$

$$D \equiv \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f \quad (3.8)$$

3.4.1 Ripple na Corrente

Se considerarmos o conversor DC-DC apresentado na fig. 3.10 e fizermos a sua análise de circuito para os dois estados possíveis, a fig. 3.10b representa o circuito para quando o IGBT está em condução e a fig. 3.10c para quando o IGBT está ao corte.

Através da lei 2ª lei de Kirchhoff, obtemos a eq. (3.9) para o circuito da fig. 3.10b e a eq. (3.10) para o circuito da fig. 3.10c.

$$V_{dc} = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad (3.9)$$

$$0 = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad (3.10)$$

Fazendo a devida manipulação nas equações anteriores, vamos obter as eq. (3.11) e eq. (3.12)

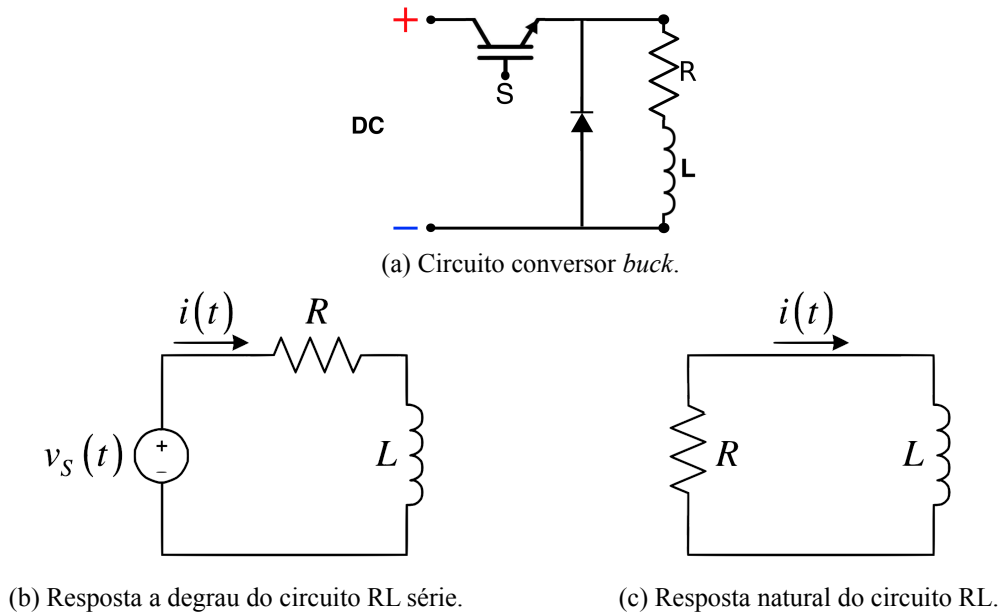


Figura 3.10: Estados do conversor DC-DC *Buck*.

para os estados ON e OFF, respetivamente [29].

$$i(t) = \frac{V_{dc}}{R} + \left(i(t_0) - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)} \quad (3.11)$$

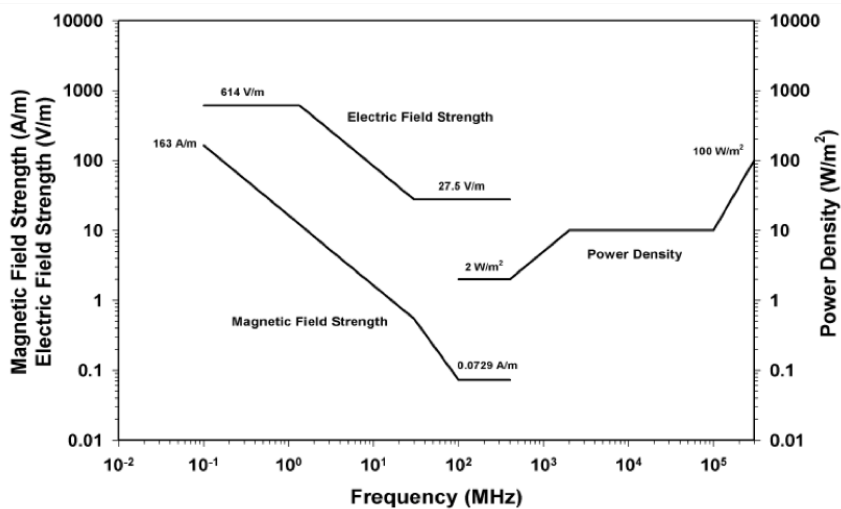
$$i(t) = i(t_0) e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)} \quad (3.12)$$

É assim que se comporta a corrente quando está perante um sistema como o utilizado neste projeto.

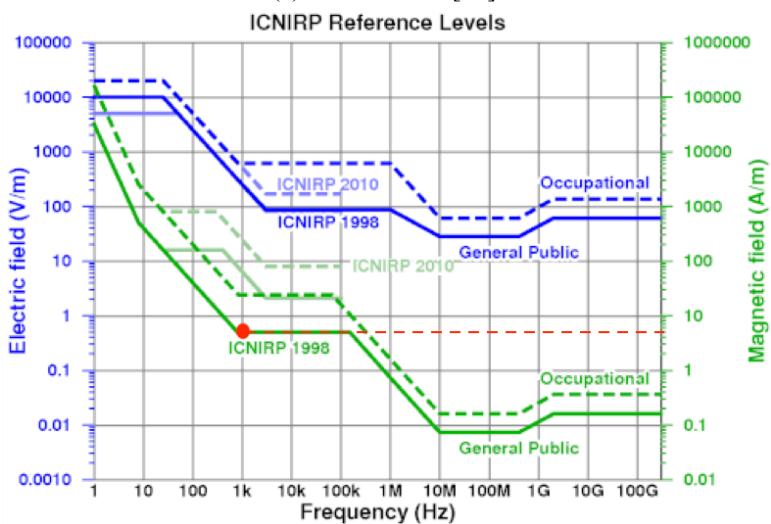
3.5 Limites de Exposição aos Campos Magnéticos

Todos os sistemas que utilizam radiações magnéticas, têm que ter em conta os limites estabelecidos pelas normas internacionais existentes. Neste trabalho, esta questão não foi considerada, uma vez que o objetivo do trabalho foi a criação de um pequeno protótipo e verificação experimental básica do mesmo. No entanto, é extremamente importante referir que as normas existentes para este tipo de radiações estabelecem regras e limites para a sua utilização, principalmente quando expostas a seres humanos. Neste projeto foi utilizada um frequência de comutação de 1k Hz que, pela norma emitida pela entidade ICNIRP, permitem campos magnéticos com intensidades até 4 A/m, como assinalado a vermelho na fig. 3.11b. As duas normas são emitidas pelas duas entidades reguladoras, IEEE para a norma representada na fig. 3.11a [30] e ICNIRP para a norma representada na fig. 3.11b

[31].



(a) Norma IEEE [30].



(b) Norma ICNIRP [32].

Figura 3.11: Valores representativos dos limites de exposição aos campos.

Capítulo 4. Projeto

Neste capítulo irá ser feita uma descrição do projeto e de todo o trabalho que foi desenvolvido durante o mesmo. Na fig. 4.1 pode-se visualizar todo o conjunto experimental. O número 1 corresponde à *webcam* utilizada, o número 2 ao protótipo desenhado em 3D onde se encontram as bobinas, o número 3 à placa da NI, o número 4 ao andar potência utilizado, o número 5 ao computador para o processamento e o número 6 ao ambiente gráfico do *Matlab* utilizado no projeto. Este sistema teve como base de funcionamento o diagrama de blocos apresentado na fig. 4.2. O utilizador define a posição que deseja através da atribuição de pontos de referência e, tendo também em conta a posição da cápsula (*feedback*), é aplicado um algoritmo de controlo. Daí resulta um valor do *duty-cycle* do sinal PWM usado pelo conversor DC-DC para gerar a tensão aos terminais das bobinas. Através disso é imposta uma nova posição à cápsula que será captada pela *webcam* e processada para ser novamente utilizada numa nova iteração. Todos os processos e algoritmos envolvidos neste sistema foram criados de raiz.

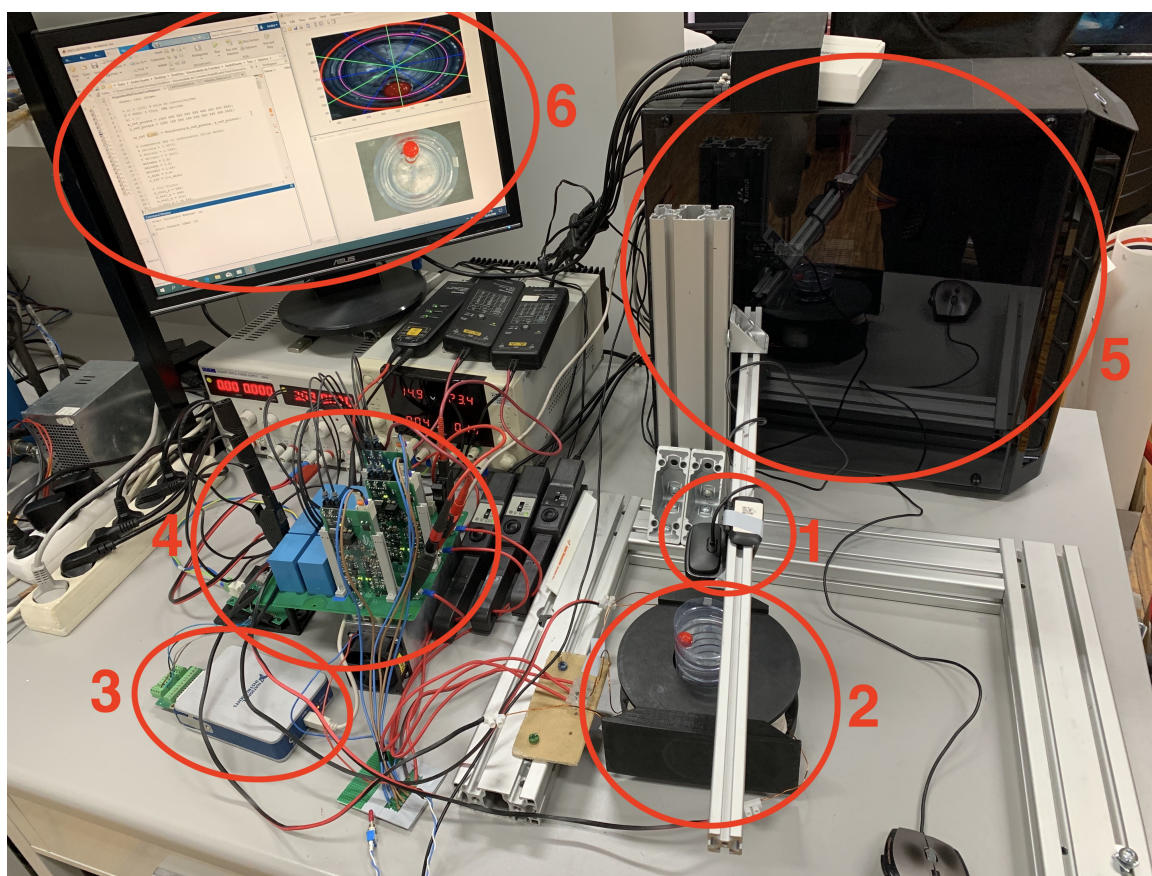


Figura 4.1: Protótipo experimental completo usado para o trabalho de tese.

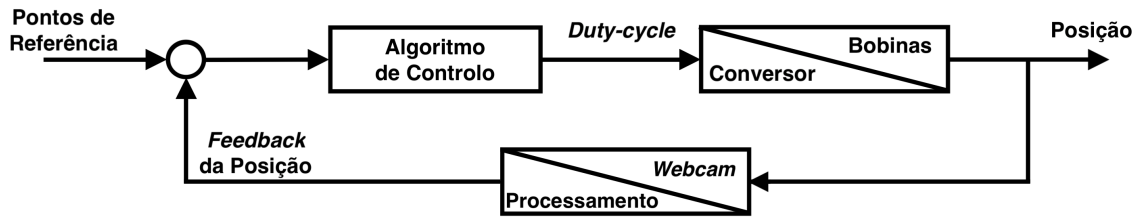


Figura 4.2: Diagrama de blocos para o funcionamento do sistema.

4.1 Ideia da Configuração

Após a análise dos projetos já existentes, observou-se que a maior parte dos sistemas compostos por eletroímãs utilizavam uma configuração semelhante entre si no que toca à orientação das suas bobinas. Surgiu então a ideia de se utilizar inúmeras bobinas dispostas paralelamente entre si, como mostra a fig. 4.3, permitindo o controlo mais fino dos campos magnéticos criados ao longo de toda a área útil. Como visto anteriormente, através da conjugação da intensidade dos campos magnéticos utilizados consegue-se exercer uma força de atração ou repulsão sobre o corpo. Com esta disposição, cada bobina cria o seu próprio campo magnético e a soma de todos os envolvidos, originam um campo resultante capaz de fazer deslocar a cápsula de forma eficaz. No entanto, a utilização de uma quantidade avultada de bobinas não tornava o projeto exequível nesta primeira fase de prova de conceito.

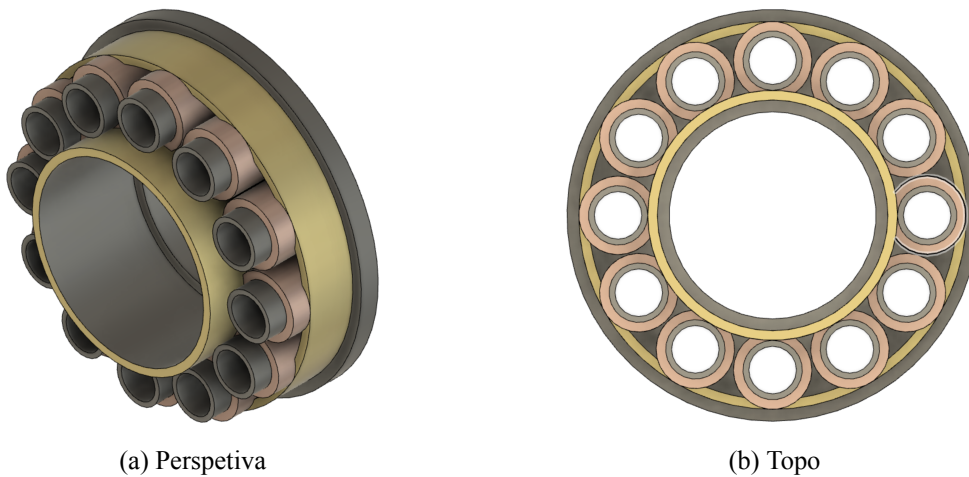


Figura 4.3: Desenho 3D modelo com múltiplas bobinas.

Decidiu-se então utilizar apenas três bobinas desfasadas de 120° no espaço para que fosse possível percorrer todo o plano pretendido pelo objeto e ainda para que pudesse ser utilizado um sistema de controlo semelhante aos das máquina elétricas rotativas. A fig. 4.4 representa o esquema das bobinas e da sua disposição no espaço.

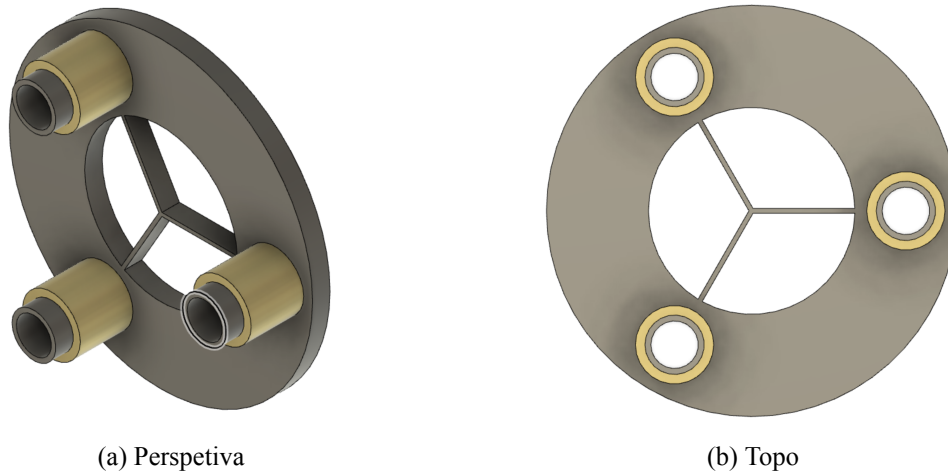


Figura 4.4: Desenho 3D das três bobinas desfasadas de 120°.

4.2 Desenho 3D

Para que fosse possível realizar o projeto começou-se por fazer o desenho 3D no *Software Fusion 360* de toda a estrutura que suporta as bobinas do sistema, para que posteriormente pudesse ser feita a sua impressão, usando filamento PLA. Inicialmente foi feita uma estrutura de teste para verificar a estabilidade do projeto, bem como para verificação das medidas finais. Na fig. 4.5 pode-se ver uma estrutura com espaço para a colocação de 6 bobinas pequenas e com suporte na vertical. Após alguns testes básicos verificou-se que os tamanhos não eram os adequados, tanto a nível de largura como a nível de espaço para a colocação de bobinas que fossem suficientemente adequadas à criação de campos compatíveis com o problema apresentado.

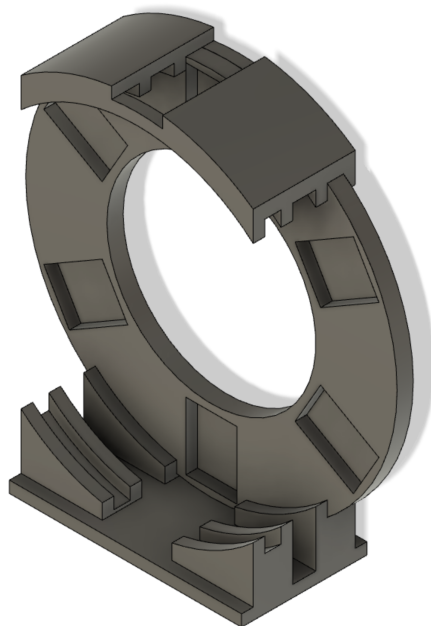
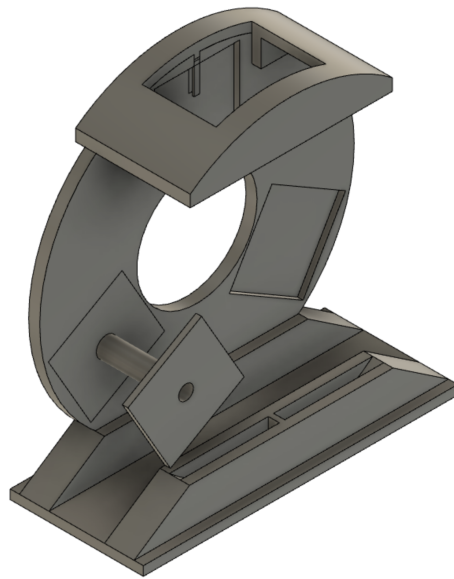
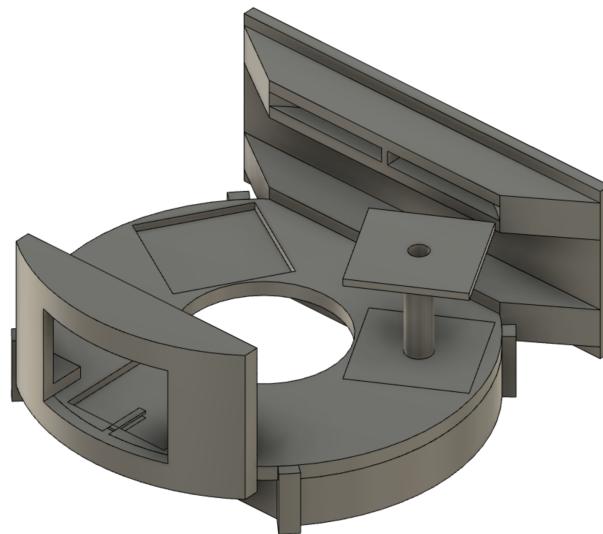


Figura 4.5: Desenho 3D do projeto inicial.

Após esta análise foi feito um novo desenho da estrutura do projeto, onde se colocou apenas espaço para três bobinas. Os suportes apresentados na fig. 4.7a, desfasados espacialmente de 120° , estão construídos com o objetivo de poderem funcionar em diversas orientações, já que as suas três dimensões (Comprimento, Largura e Profundidade) são iguais. A abertura da estrutura circular apresentada foi idealizada para ter o diâmetro de uma garrafa de água de meio litro. Foi também idealizada uma base para que a estrutura se mantivesse na vertical. No entanto, devido às dificuldades em operar o sistema na vertical, foi elaborada uma base para o sistema passasse a funcionar na horizontal. Na fig. 4.7 podem-se observar todas as peças separadas e na fig. 4.6 o sistema montado em perspectiva.



(a) Vertical



(b) Horizontal

Figura 4.6: Desenho 3D do projeto final.

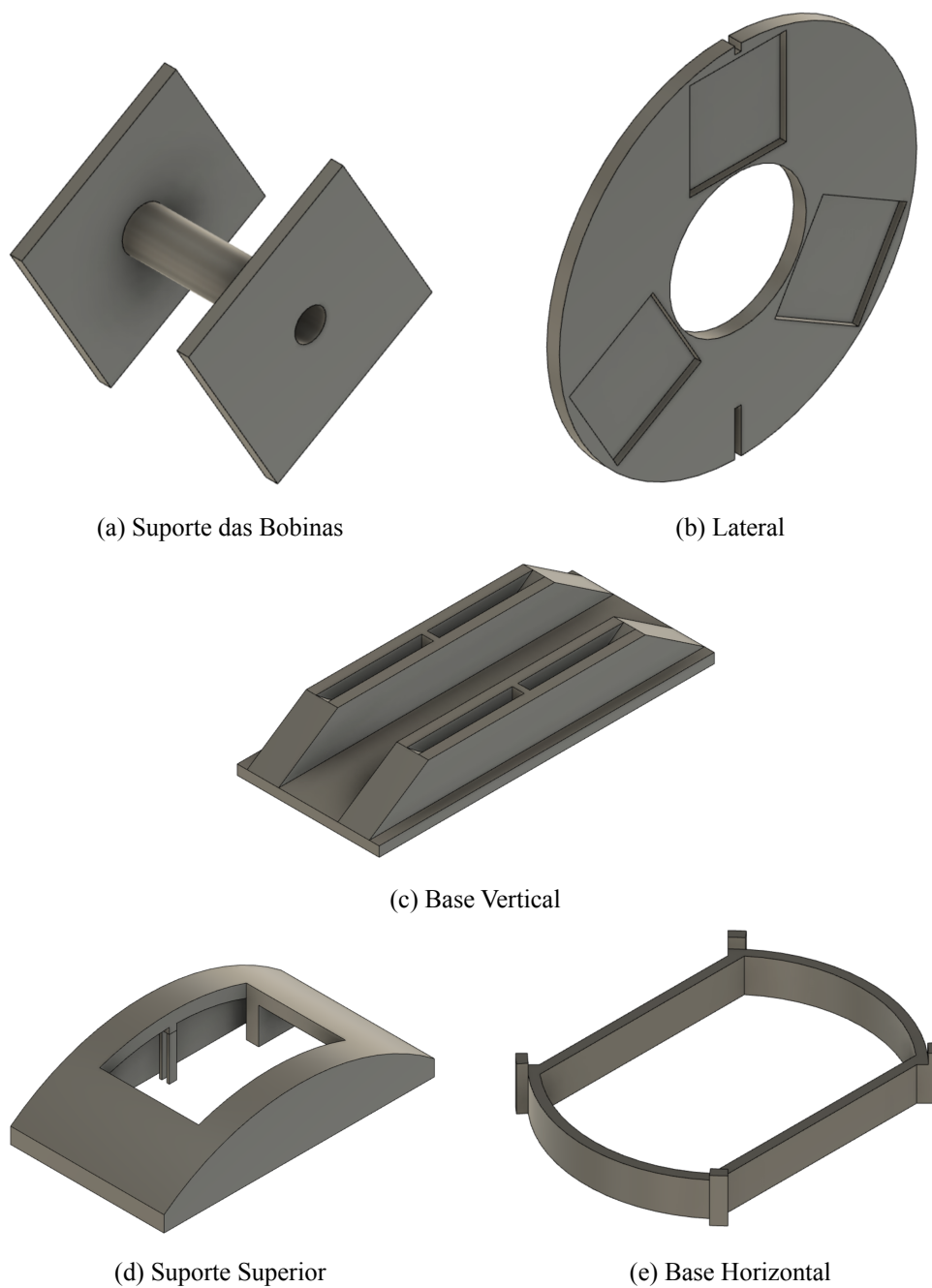


Figura 4.7: Desenho 3D das peças do projeto.

4.3 Sistema Magnético

Relativamente à componente magnética do sistema, mais precisamente à origem dos campos magnéticos envolvidos, estes surgem pela excitação de bobinas enroladas com fio de cobre de 1 mm de diâmetro. As bobinas foram enroladas nos suportes apresentados anteriormente, onde se colocou o maior número de espiras possível até perfazer todo o espaço útil dos suportes, como se pode observar na fig. 4.8. Cada uma das bobinas tem aproximadamente 600 espiras enroladas e as suas indutâncias, para as mesmas características de funcionamento, são $L = 1.62mH \pm 5\%$ com um fator de qualidade de $Q = 3.86 \pm 1.5\%$.



Figura 4.8: Bobinas utilizadas ao longo de todo o projeto.

Tendo em conta cada um dos campos criados e considerando que estes interagem entre si e com o objeto, verifica-se que a soma de todos os campos no ponto onde o objeto se encontra, resulta num único campo e é sobre esse que o objeto vai reagir. Na fig. 4.9 pode-se observar um exemplo da força resultante da soma de três forças aplicadas num ponto, como representação do que acontece no nosso sistema.

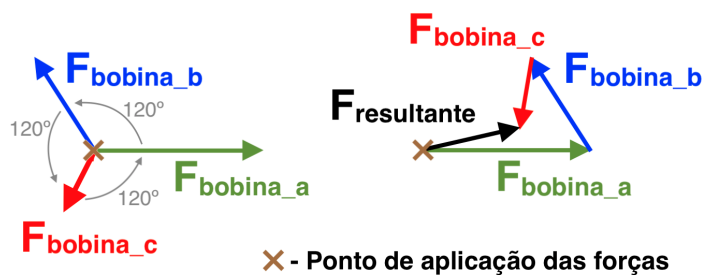


Figura 4.9: Exemplo de soma de vetores aplicado num ponto.

4.3.1 Objeto Utilizado

Para interagir com os campos magnéticos criados, utilizou-se um conjunto de ímanes de Neodímio, que se podem visualizar na fig. 4.10a, uma vez que para usar um material ferromagnético os campos necessários teriam que ser muito superiores. Este foi colocado dentro de uma cápsula com ar, com o objetivo de o colocar a flutuar e assim tornar possível alinhar-se com altura das bobinas ao solo, como se observa na fig. 4.10b. Para além disto, o conjunto dos ímanes foi dividido ao meio e invertiu-se a polaridade de um dos subconjuntos, como mostra a fig. 4.10c. Esta alteração prendeu-se com o facto do conjunto inicial ficar localizado muito na zona inferior da cápsula, originando com que o centro de massa ficasse muito deslocado do seu centro, o que levava a alguma oscilação. Com esta modificação os subconjuntos repelem-se, o que faz com que um deles fique suspenso e, assim subir significativamente o centro de massa da cápsula, tornando-a mais estável quando sobre o efeito dos campos magnéticos.

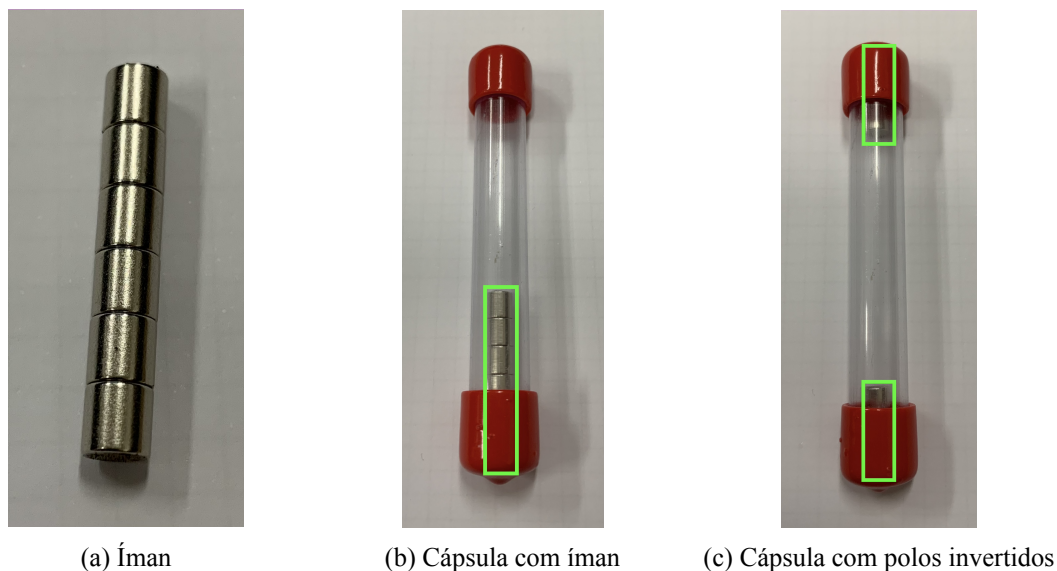


Figura 4.10: Imagens do íman de Neodímio utilizado em diferentes etapas.

Na fig. 4.11 observa-se o alinhamento vertical dos dois conjuntos de ímanes utilizados. O objetivo foi centrar os campos criados pelos ímanes com os campos criados pelas bobinas, ao mesmo tempo que se subia o centro de massa da cápsula.

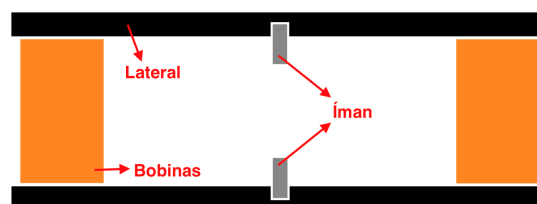


Figura 4.11: Esquema explicativo do alinhamento dos ímanes visto lateralmente.

4.4 Sistema Elétrico

Em relação ao sistema elétrico utilizado pensou-se num sistema trifásico para alimentar as três bobinas existentes no sistema. Na fig. 4.12 pode-se observar o circuito elétrico usado para alimentar as bobinas e produzir o campo magnético pretendido.

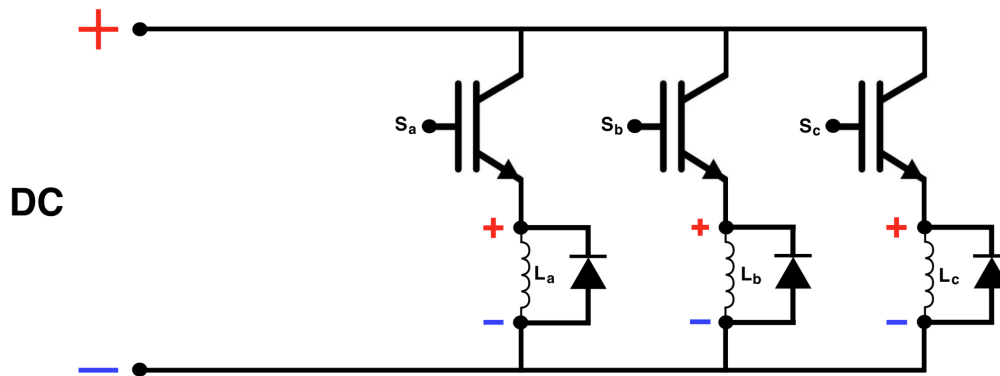


Figura 4.12: Esquema do circuito elétrico do sistema usado.

Pelo esquema apresentado na fig. 4.12, verifica-se que estamos perante um conversor DC-DC redutor (*Buck*) controlado por três sinais PWM e alimentado por uma única fonte DC, sendo que esta é a tensão máxima aplicada nas bobinas. Os três braços do conversor são compostos, cada um, por um IGBT, onde o lado das bobinas, pré-assumido como positivo, é ligado ao emissor do IGBT e o considerado como negativo é ligado ao negativo da entrada DC para que nas bobinas seja aplicada a tensão de entrada. Observa-se também um diodo em anti-paralelo com a bobina que vai funcionar como diodo de roda livre permitindo que haja uma descarga natural da bobina quando o IGBT está *off*.

Nesta montagem foi utilizada uma tensão de entrada de 3.2 V, com uma corrente limitada, na fonte, a 2.5 A. Estes valores foram definidos de modo a respeitar os limites de corrente das bobinas, prevenindo problemas de aquecimento que pudessem advir da corrente em excesso. A frequência de comutação utilizada nos IGBT foi de 1k Hz.

4.4.1 Andar Inversor Utilizado

Para concretizar o projeto foi utilizado o andar inversor que pode ser observado na fig. 4.13.

Este sistema foi reaproveitado de um projeto de testes de rendimento e comportamento deste andar inversor, realizados no ISR-UC. É composto por vários componentes, nomeadamente uma placa de potência onde se encontra a entrada proveniente da fonte DC, a saída AC para as bobinas,

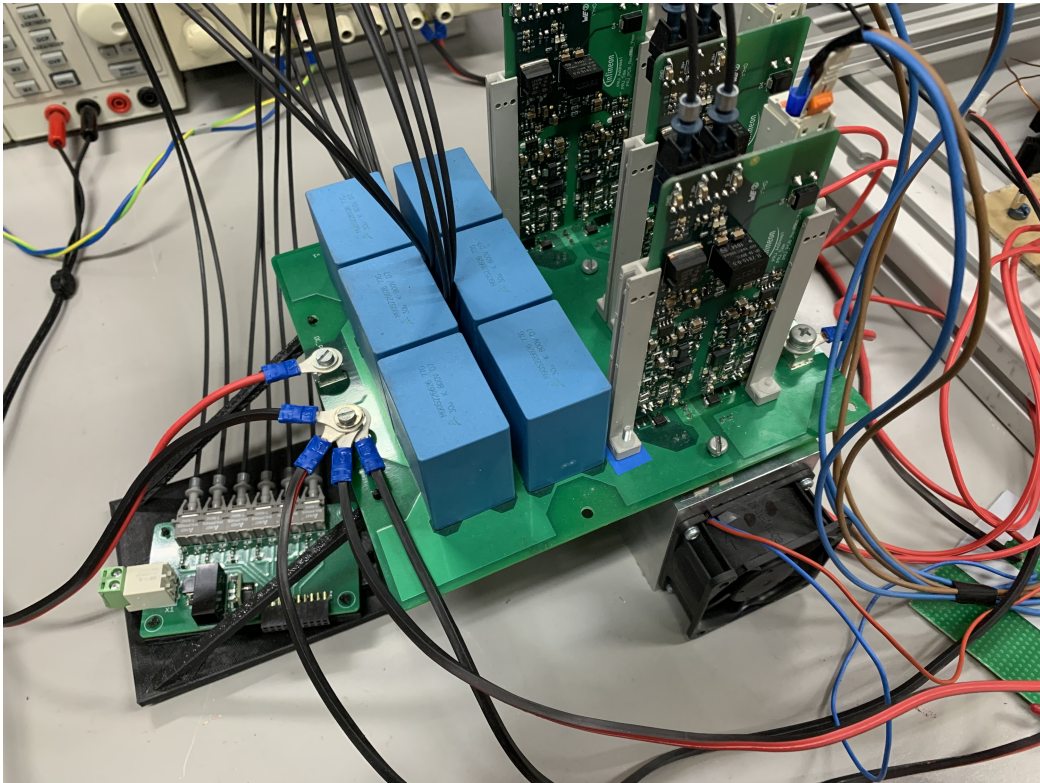


Figura 4.13: Andar inversor *Infineon Silicon Carbide (SiC)*.

toda a parte da eletrônica de potência que envolve os três braços de IGBTs SiC e os seus drivers, bem como o ventilador para arrefecimento, como se observa na fig. 4.14.

Existe ainda uma placa, que se pode observar na fig. 4.15, que recebe os seis sinais de referência para controlar os seis IGBTs SiC situados na placa de potência. Estes sinais, não são mais nem menos que sinais TTL (*Transistor-Transistor Logic*), com referência comum, que são transformados em sinais óticos e posteriormente enviados para a placa de potência onde são novamente transformados em sinais elétricos. Desta forma existe isolamento ótico entre a parte de sinais de controlo e a parte de potência.

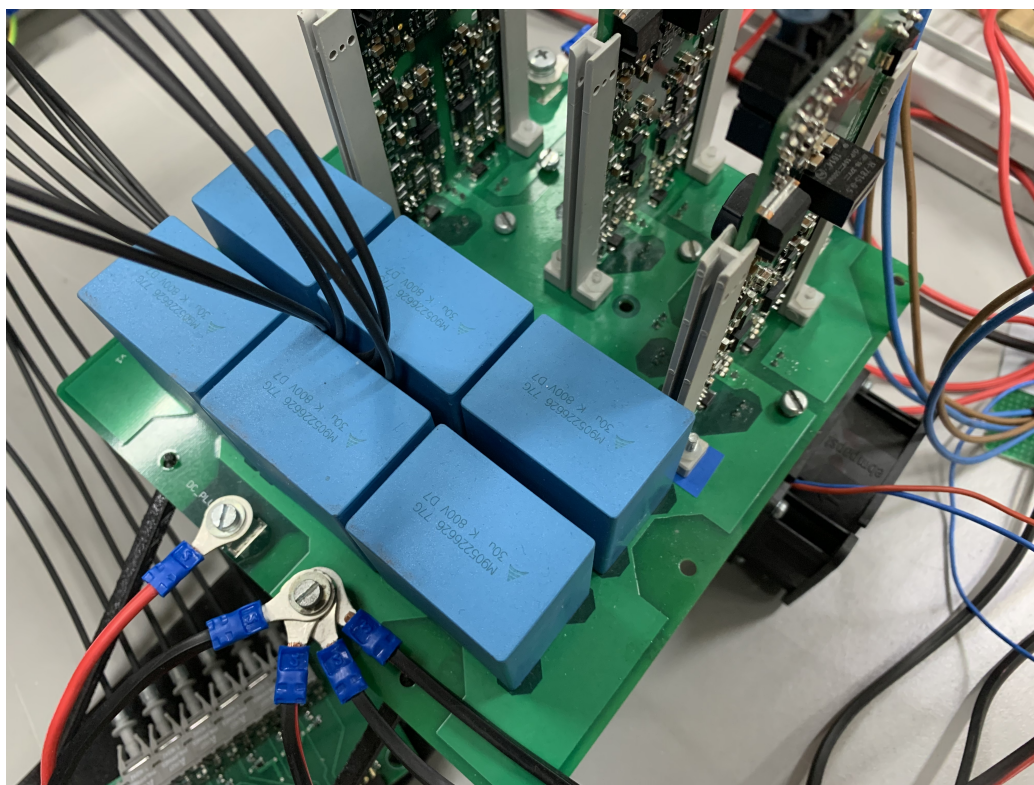


Figura 4.14: Placa de potência do andar inversor utilizado.

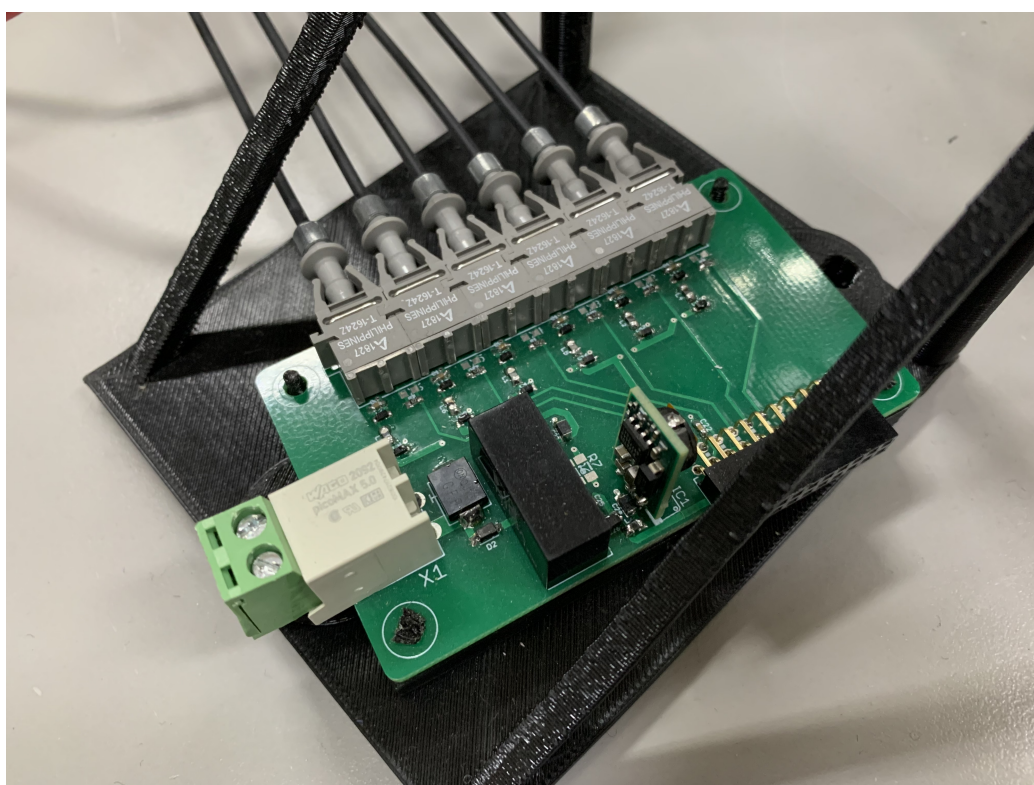


Figura 4.15: Placa de sinal do andar inversor utilizado.

4.5 Sistema de Controlo

No que respeita ao modelo utilizado para o controlo do sistema, foi utilizado o *Software Matlab* em conjunto com módulos da *National Instruments* para satisfazer as necessidades do modelo pretendido. O facto destas duas ferramentas serem bastante poderosas é possível interligá-las para um ótimo funcionamento.

4.5.1 Matlab R2019b

A utilização desta ferramenta prendeu-se pela sua versatilidade e facilidade, através da criação de um script capaz de conjugar os diversos parâmetros que iriam ser utilizados ao longo de todo o processo. Foi possível fazer a ligação a uma *webcam* comercial, através de uma porta USB e a instalação do *Add-On "MATLAB Support Package for USB Webcams"* e assim, adquirir as imagens para que pudessem ser processadas com o intuito de se obter a posição exata do objeto, que necessitou da instalação do *Add-On "Image Processing Toolbox"*. Com este dado e os dados de referência introduzidos pelo utilizador, programou-se o algoritmo criado para que no final se pudesse obter o valor dos sinais pretendidos. Esses sinais eram então enviados, via USB para a placa da NI, através da sua comunicação com o *Matlab*.

4.5.2 National Instruments

Para ser possível interligar toda a parte de *software* e algoritmo com o *hardware*, utilizou-se o *Digital Module NI-9401*, integrado num *Chassi CompactDAQ-9171*, conforme mostra a fig. 4.16, para permitir a interligação com o *Matlab*. Este módulo permite várias configurações de saídas digitais, que para este caso foram usadas para alterar o *duty-cycle* do sinal PWM consoante o necessário.



(a) Chassi CompactDAQ-9171



(b) Digital Module NI-9401

Figura 4.16: Módulos utilizados da *National Instruments*.

4.6 Deteção da Posição

Para se poder detetar a posição do objeto a controlar, nesta primeira fase do projeto, otou-se pela utilização de uma *webcam* (*Logitech HD Webcam C525*) igual à da fig. 4.17. Com uma resolução de 640x320 pixels foi possível adquirir imagens com qualidade suficiente para que, em tempo real, fossem processadas pelo algoritmo utilizado. Desta maneira foi possível detetar com precisão a posição do objeto que estava a ser utilizado.



Figura 4.17: Imagem da *webcam Logitech HD Webcam C525* usada para detetar a posição do objeto.

4.7 Algoritmo de Controlo

O sistema de controlo utilizado permite que o utilizador introduza as coordenadas de diversos pontos de referência por onde deseja que o objeto controlado passe ao longo da experiência, desde que estes pontos se situem no interior do recipiente onde se localiza. Com estas referências é criado um vetor de pontos onde são acrescentadas diversas posições intermédios, ou seja, os pontos que o

objeto vai seguir não são só os introduzidos pelo utilizador, mas sim todos os intermédios criados pelo programa para tornar a transição entre as referências mais suave. Após isso, o sistema funciona de forma autónoma sabendo que a cada iteração vai seguir o ponto que lhe está atribuído.

Divide-se, essencialmente, em quatro partes fundamentais. São elas a ligação a todos os equipamentos utilizados, o reconhecimento da posição do objeto, o processamento de todos os dados envolvidos e, por fim, a geração do sinal a ser enviado para a placa.

4.7.1 Ligação aos Equipamentos

O primeiro equipamento a ser ligado é a *webcam*, para que se possam verificar se todos os parâmetros envolvidos estão corretos na fase inicial, bem como abrir a janela de *preview* e assim ser possível estar a acompanhar as imagens que estão a ser captadas pelo sistema em tempo real. Esta calibração é feita através da orientação da *webcam*, a localização das bobinas e as retas atribuídas ao primeiro ponto de referência introduzido pelo utilizador. Todos estes dados podem ser visualizados na fig. 4.18. As retas com a cor azul são as retas provenientes das três bobinas e que convergem no primeiro ponto de referência, as retas com a cor verde são perpendiculares às retas azuis e retratam os limites de atuação de cada uma das bobinas e as circunferências a azul, sobre a circunferência vermelha, representam a posição das três bobinas. Por fim a circunferência vermelha representa o limite físico imposto pelo recipiente e a circunferência rosa simboliza o limite virtual que o centro do objeto pode atingir, tendo em conta as suas dimensões.

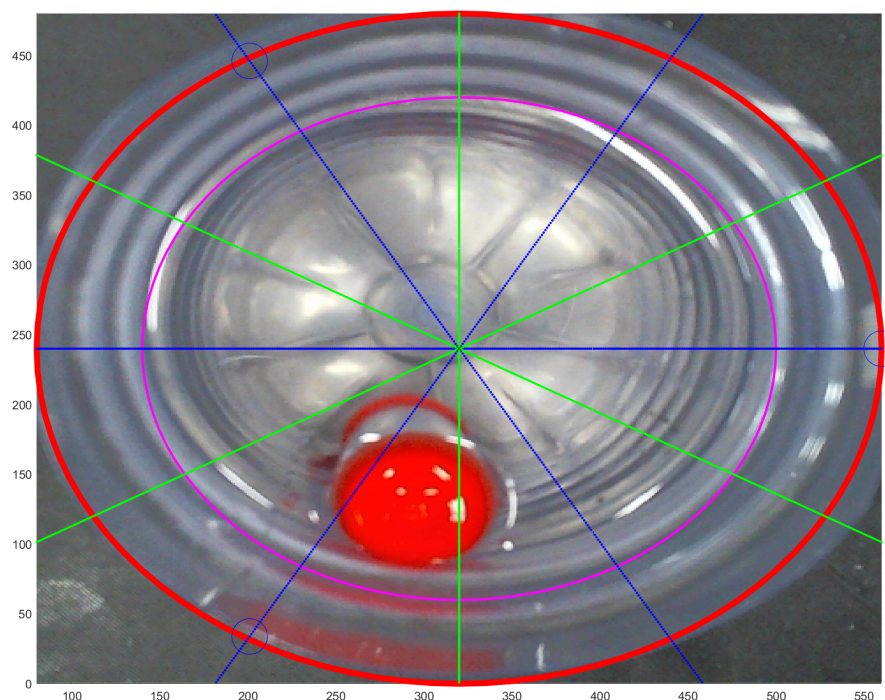


Figura 4.18: Imagem de teste criada durante a ligação à *webcam*.

Logo de seguida é ligado o conjunto da *National Instruments*. Aqui são inicializados três canais digitais de saída configurados como *Pulse Generation*. Só assim é possível fazer variar o *duty-cycle* do sinal de saída com o objetivo de se fazer variar a tensão aplicada às bobinas.

4.7.2 Reconhecimento da Posição

Neste passo, a cada iteração do sistema, isto é, a cada captura de imagem da *webcam*, obtém-se a matriz que a constitui, e determina-se o ponto com uma área e intensidade de vermelho superior. Isto é feito através da análise das três componentes de cor da imagem, ou seja, as componentes RGB (*Red-Green-Blue*) de cada pixel. Ao peso da componente "Vermelha" são retirados os pesos das componentes equivalentes ao "Verde" e ao "Azul". De seguida, retira-se totalmente as componentes "Verde" e "Azul" da imagem, obtendo apenas os valores da componente "Vermelha", o que origina uma imagem conforme a fig. 4.19. Posto isto, transforma-se a matriz com pixels RGB numa matriz binária em que a todos os valores da componente "Vermelha" acima de um limiar pré-definido é considerado a existência da cor pretendida. No caso inverso, considera-se que não existe cor. Assim, consegue-se obter facilmente todas as áreas mais vermelhas da imagem original.

Tendo em conta a matriz binária obtida, verificam-se todos aglomerados de pixels binários existentes e obtém-se o seu centro e a sua área. O conjunto que representar a maior área será aquele que corresponde ao nosso objeto, logo as coordenadas do seu centro serão usadas na fase seguinte de processamento.

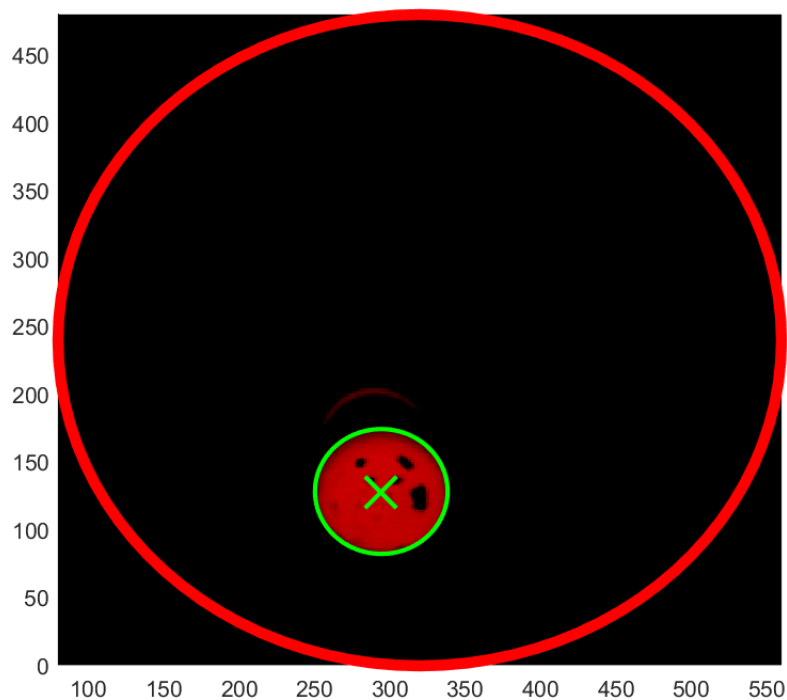
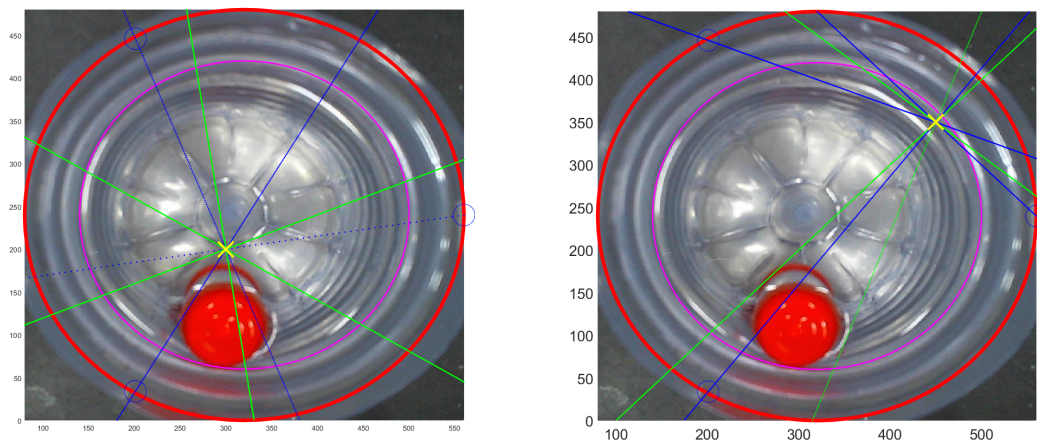


Figura 4.19: Imagem criada pela *webcam* para saber a posição do objeto.

4.7.3 Processamento

Nesta etapa, é feito o processamento dos dados, ou seja, as coordenadas resultantes da fase anterior são agora utilizadas para se saber o valor da tensão a aplicar a cada bobina. Foram utilizadas duas abordagens diferentes ao problema, a primeira utilizou uma função exponencial e a outra uma ponderação tendo em conta as várias distâncias envolvidas.

Tudo começa com a comparação das coordenadas do objeto com uma reta perpendicular à reta que une cada uma das bobinas com o ponto de referência, como se pode observar na fig. 4.20. Se as coordenadas do objeto corresponderem a um ponto na zona mais perto da bobina em questão, significa que não é desejável que seja aplicada tensão a essa bobina. Caso contrário, são aplicados os algoritmos descritos abaixo.



(a) Ponto de referência $x=300$ e $y=200$

(b) Ponto de referência $x=450$ e $y=350$

Figura 4.20: Imagens exemplificativas das retas utilizadas no algoritmo, consoante o ponto de referência.

Apesar deste controlo ser feito de forma individual, ele acontece em simultâneo o que faz com que as três bobinas estejam a ser controladas em conjunto e a força aplicada no objeto seja o somatório das forças aplicadas por cada uma das bobinas individualmente.

4.7.3.1 Exponencial

Este primeiro método tem em consideração, essencialmente, a relação entre a distância máxima que o objeto pode tomar, a distância onde se encontra e o ponto de referência. A função exponencial surge com o objetivo de se conseguir uma relação em que no ponto mais afastado do ponto de referência o valor do *duty-cycle* seria máximo, ou seja, 1 e quando estivesse perante valores próximos tivesse valores mais reduzidos, em que o mínimo seria um valor específico.

Tendo em consideração o objetivo, começou-se pela análise da função exponencial na sua forma base (e^x) e aplicaram-se várias transformações de acordo com o pretendido. É então que, após algumas modificações e alguns testes experimentais, surge a eq. (4.1). Este valor é calculado para as três bobinas em cada iteração.

$$D = e^{10^3 \frac{40 + dist_1 - dist_2}{4 \cdot dist_2^2}} \tag{4.1}$$

onde $dist_1$ representa a distância entre o ponto de referência e o objeto, medido sobre a reta que liga a bobina em questão e o ponto de referência, e $dist_2$ descreve a distância entre o ponto de referência e a distância máxima que o objeto pode tomar sobre a reta que liga a bobina e o ponto de referência.

4.7.3.2 Ponderação

O segundo processo teve em consideração que a força a aplicar no objeto, para que ele de desloque para o local pretendido, varia com a distância do ponto de referência à bobina em questão e também com a distância entre o ponto de referência e o objeto. É preciso ter em conta estes dois parâmetros, por isso o *duty-cycle* resulta de uma ponderação entre os dois. Calculou-se a distância entre o ponto de referência e a bobina ($dist_{ref}$) e a distância entre as coordenadas do objeto e a bobina ($dist$).

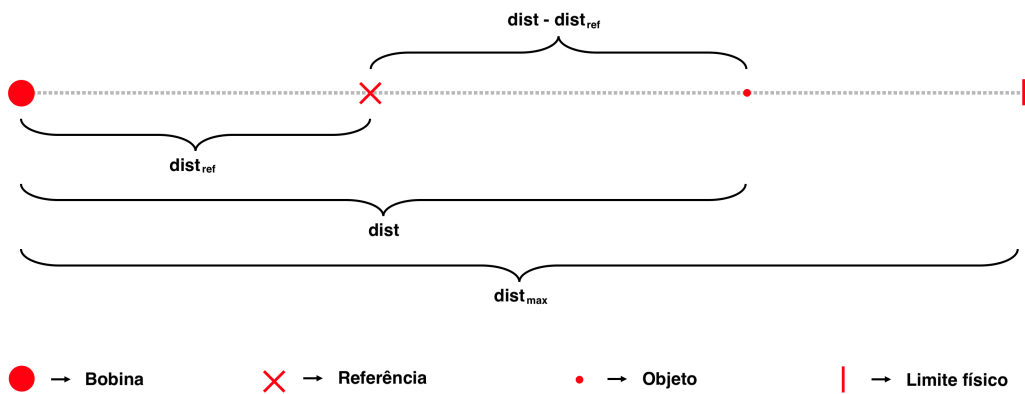


Figura 4.21: Relação entre as distâncias envolvidas no sistema.

Seria de esperar que quanto maior a distância do objeto ao ponto de referência, maior o valor do *duty-cycle* aplicado, até ao limite de 1, quando a distância é máxima, ou seja, $dist - dist_{ref} = dist$. Por outro lado, quanto maior a distância à bobina, maior teria que ser o *duty-cycle* aplicado, até ao limite de 1 quando $dist = dist_{max}$. Tendo isto em consideração o que se fez foi dar um peso a cada

uma das componentes no valor do *duty-cycle* final criado. Assim sendo, para cada bobina resulta:

$$D = c \frac{dist - dist_{ref}}{dist} + (1 - c) \frac{dist}{dist_{max}} \quad (4.2)$$

onde $dist_{max}$ é a distância máxima a que o objeto se pode encontrar da bobina e c é o peso que se atribui à parcela que considera a distância entre o ponto de referência e o objeto. Após alguns testes experimentais chegou-se à conclusão que o valor 0.4 para a constante de ponderação, era o que tornava o sistema mais estável e com uma melhor resposta às experiências realizadas.

4.7.4 Geração do Sinal

Por fim, o valor obtido pelo processo anterior para o *duty-cycle* das três bobinas é enviado em paralelo para o módulo da *National Instruments*. Aí são gerados os três sinais e são enviados para a placa de sinal do andar de potência como se pode observar na fig. 4.22.

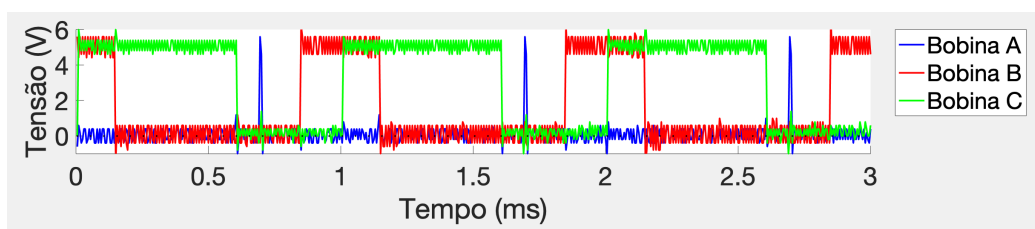


Figura 4.22: Exemplo de 3 sinais enviados em paralelo para a placa de sinal do andar inversor.

4.8 Testes Iniciais de Funcionamento

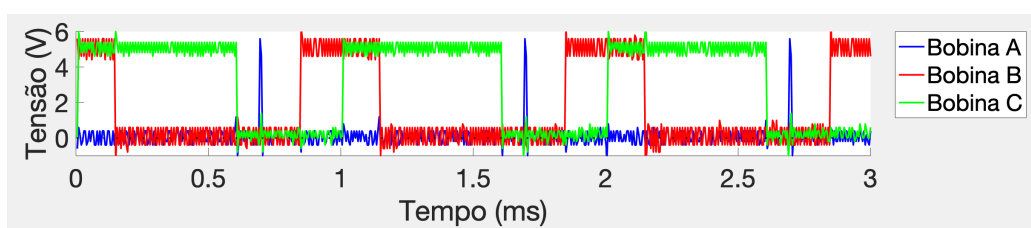
Uma vez que o sistema foi todo criado de raiz, tomou-se especial atenção ao funcionamento de todos os equipamentos envolvidos. Qualquer um dos dispositivos foi testado individualmente, para que se pudesse ter a certeza que estavam a funcionar de acordo com o pretendido.

Testaram-se todos os elementos do andar inversor, desde a placa de potência à placa de sinal, bem como o módulo de comunicação da *National Instruments*, seja com o *Software Matlab* seja com a placa de sinal. Por fim ligaram-se as bobinas para verificar se a tensão DC aplicada na entrada exercia efeito sobre o objeto a controlar, ou seja, se o atraía ou repelia. Verificado todo o sistema, conforme apresentado na fig. 4.1, deram-se por concluídos os testes iniciais de funcionamento.

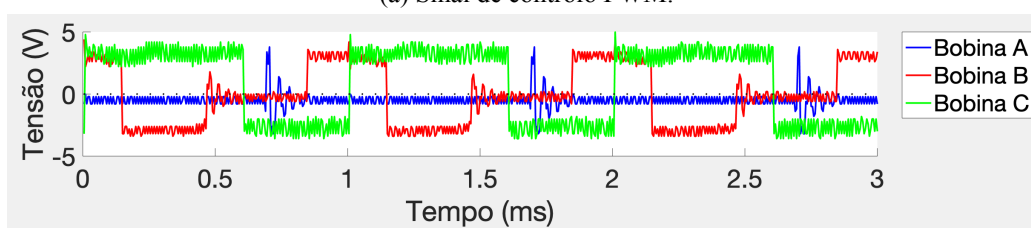
Capítulo 5. Experiências e Resultados

Depois do projeto, desenho e construção do sistema, procedeu-se ao seu teste experimental. Usando o protótipo construído, foram testados os dois algoritmos descritos na secção 4.7.3, no entanto, apenas serão apresentados os resultados para o último algoritmo pois foi aquele que apresentou os melhores resultados relativamente aos tempos obtidos para as distâncias propostas.

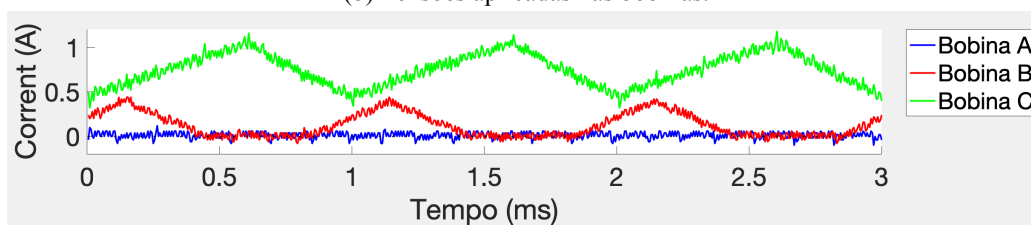
A fig. 5.1 representa um exemplo de todos os sinais envolvidos em todas as experiências. Pode-se ver na fig. 5.1a os três sinais gerados para controlar as três bobinas em simultâneo. Estes sinais dão depois origem às três tensões, que são aplicadas às bobinas e estão representadas na fig. 5.1b. O facto de se estar perante um circuito resistivo-indutivo, as correntes apresentam um certo *ripple*, que resultam nas três correntes representadas na fig. 5.1c, o que vai ao encontro do que foi explicado na secção 3.4.1.



(a) Sinal de controlo PWM.



(b) Tensões aplicadas nas bobinas.



(c) Correntes que percorrem as bobinas.

Figura 5.1: Sinais PWM aplicados ao conversor (a), tensões aplicadas às bobinas (b) e correntes que circulam nas bobinas (c).

5.1 Comparação entre os Dois Algoritmos de Controle

Como referido anteriormente, apenas serão expostos os resultados para o método que teve melhor resposta ao problema apresentado. O modelo da ponderação explicado na secção 4.2 foi o que apresentou melhores resultados quando comparado com o modelo exponencial demonstrado na secção 4.7.3.1. Entenda-se por melhores resultados não só um melhor tempo de resposta e de chegada às posições estabelecidas para cada caso, como também uma maior estabilidade e suavidade nos movimentos da cápsula utilizada.

O facto do método exponencial ser mais instável, e com movimentos mais agressivos, faz com que se torne mais difícil exercer um bom controlo sobre o objeto. A esta situação, junta-se o facto de não se ter em conta da melhor forma todas as distâncias envolvidas no sistema, para que origine um bom cálculo do valor dos *duty-cycles* necessários a aplicar para cada bobina.

Tendo todas estas situações em conta, apenas se apresentam os resultados do segundo método, onde se verificam movimentos mais suaves e um controlo muito mais estável, permitindo chegar ao objetivo com maior velocidade e suavidade nos deslocamentos. Isto deve-se ao facto deste algoritmo considerar, de forma mais eficaz, as distâncias presentes no sistema e cobrir toda a área útil.

5.2 Estabilização no Ponto Central

A primeira experiência consiste em fazer o objeto atingir o ponto central, independentemente do ponto inicial onde se localize. Na fig. 5.2 pode-se observar uma circunferência a vermelho que delimita a área útil onde a cápsula se pode deslocar, assim como três quadrados pretos que representam as posições das três bobinas existentes. A posição inicial do objeto corresponde ao ponto assinalado com um X de cor ciano na imagem e o ponto central (objetivo) encontra-se assinalado com um círculo já com a margem prevista de 10 píxeis. Já a linha verde corresponde ao percurso efetuado pelo corpo ao longo da experiência.

Nas fig. 5.3a, fig. 5.3c e fig. 5.3e pode-se observar o valor dos *duty-cycles* aplicados a cada uma das bobinas em função do tempo decorrido na experiência. Já na fig. 5.3b e na fig. 5.3d observa-se a distância existente entre o objeto e o ponto de referência distribuída pelos dois eixos cartesianos que origina os valores obtidos na fig. 5.3f, que é a distância absoluta, em píxeis.

O sistema atinge o ponto pretendido ao fim de 3.28 segundos com uma distância inicial ao ponto de referência de 130.61 píxeis. Pela análise da fig. 5.2 observa-se que o sistema se comportou como esperado, de forma suave e estável.

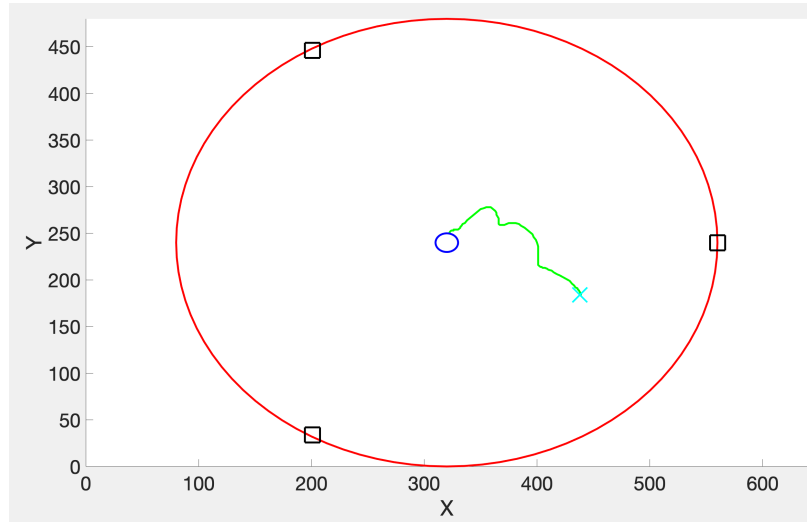


Figura 5.2: Deslocamento do corpo ao longo do espaço (X,Y).

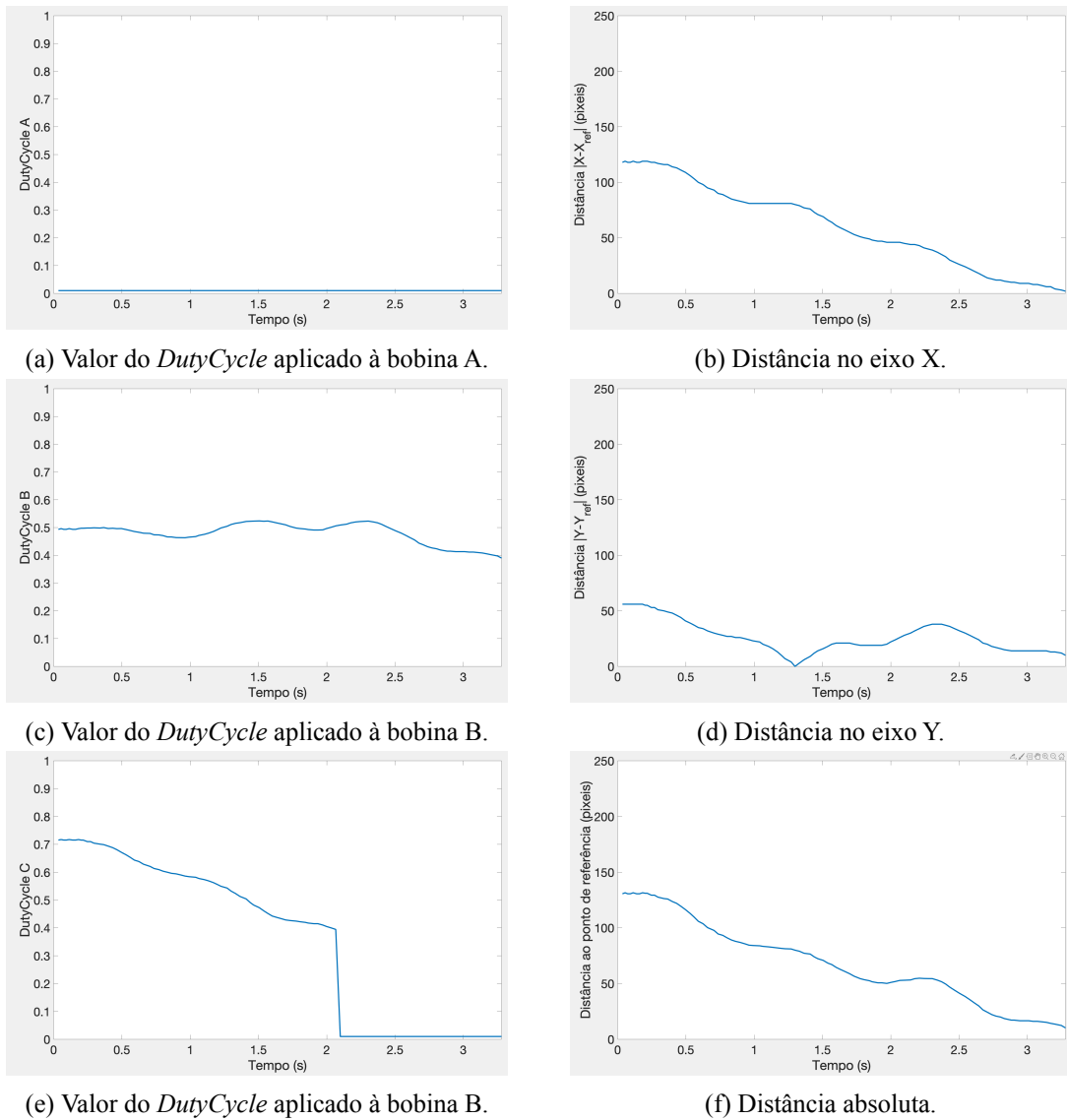


Figura 5.3: Valores obtidos para a experiência de estabilização no ponto central.

5.3 Estabilização num Ponto Aleatório

Esta experiência é semelhante à anterior, sendo no entanto escolhido um ponto aleatório ao longo de toda a área útil, que não o ponto central, para ponto de referência. Nesta segunda experiência pôs-se à prova a capacidade do sistema estabilizar o objeto em posições menos estáveis, pois fora da zona central os campos aplicados têm que ter muito mais em consideração a distância às bobinas, uma vez que o campo criado pelas bobinas não varia linearmente com a distância.

Seguidamente apresentam-se dois ensaios para pontos completamente diferentes para se comprovar que o conceito funciona para qualquer zona do espaço útil. À semelhança da experiência anterior, na fig. 5.4 e fig. 5.6 observar-se uma circunferência a vermelho que delimita a área útil, três quadrados pretos que representam as três bobinas, as posições iniciais que o objeto tinha nas duas experiências, representadas com o X de cor ciano e ainda os dois pontos escolhidos aleatoriamente assinalados com uma pequena circunferência azul. Pela linha verde consegue-se saber o percurso da cápsula ao longo das duas experiências.

Nas fig. 5.5a, fig. 5.5c, fig. 5.5e, fig. 5.7a, fig. 5.7c e fig. 5.7e observa-se o valor dos *duty-cycles* aplicados a cada uma das bobinas, nas duas diferentes experiências, em função do tempo decorrido na experiência. Já nas fig. 5.5b, fig. 5.5d, fig. 5.7b e fig. 5.7d observa-se as distâncias existentes entre o objeto e os pontos de referência escolhidos nas duas experiências, ao longo dos dois eixos cartesianos que depois originam os valores obtidos na fig. 5.5f e na fig. 5.7f.

O sistema atinge o ponto correspondente ao primeiro ensaio (400,300) passados 4.36 segundos com uma distância inicial ao ponto de referência de 193.40 pixels. Já no que respeita ao segundo ensaio, ponto (200,150), foi atingido após 6.42 segundos em que a distância inicial ao ponto de referência era de 261.54 pixels. Pela análise da fig. 5.4 e da fig. 5.6 verifica-se que o sistema consegue o objetivo seguindo uma trajetória suave e continua ao longo do seu percurso.

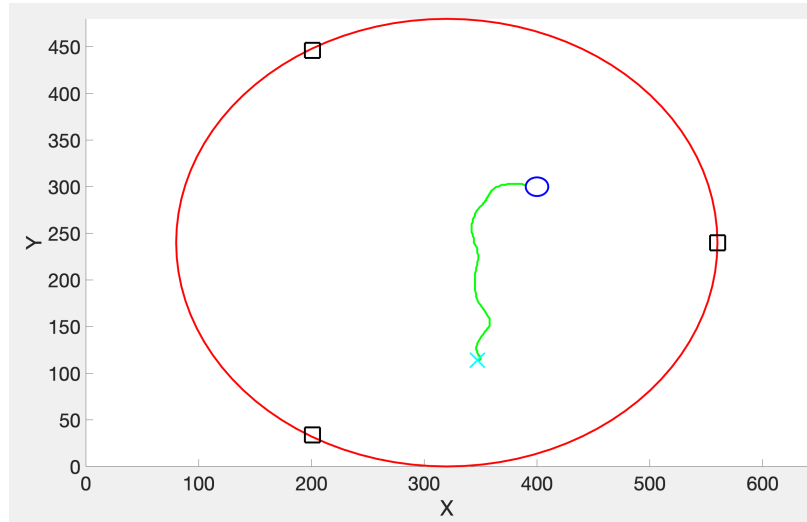


Figura 5.4: Deslocamento do corpo ao longo do espaço (X,Y).

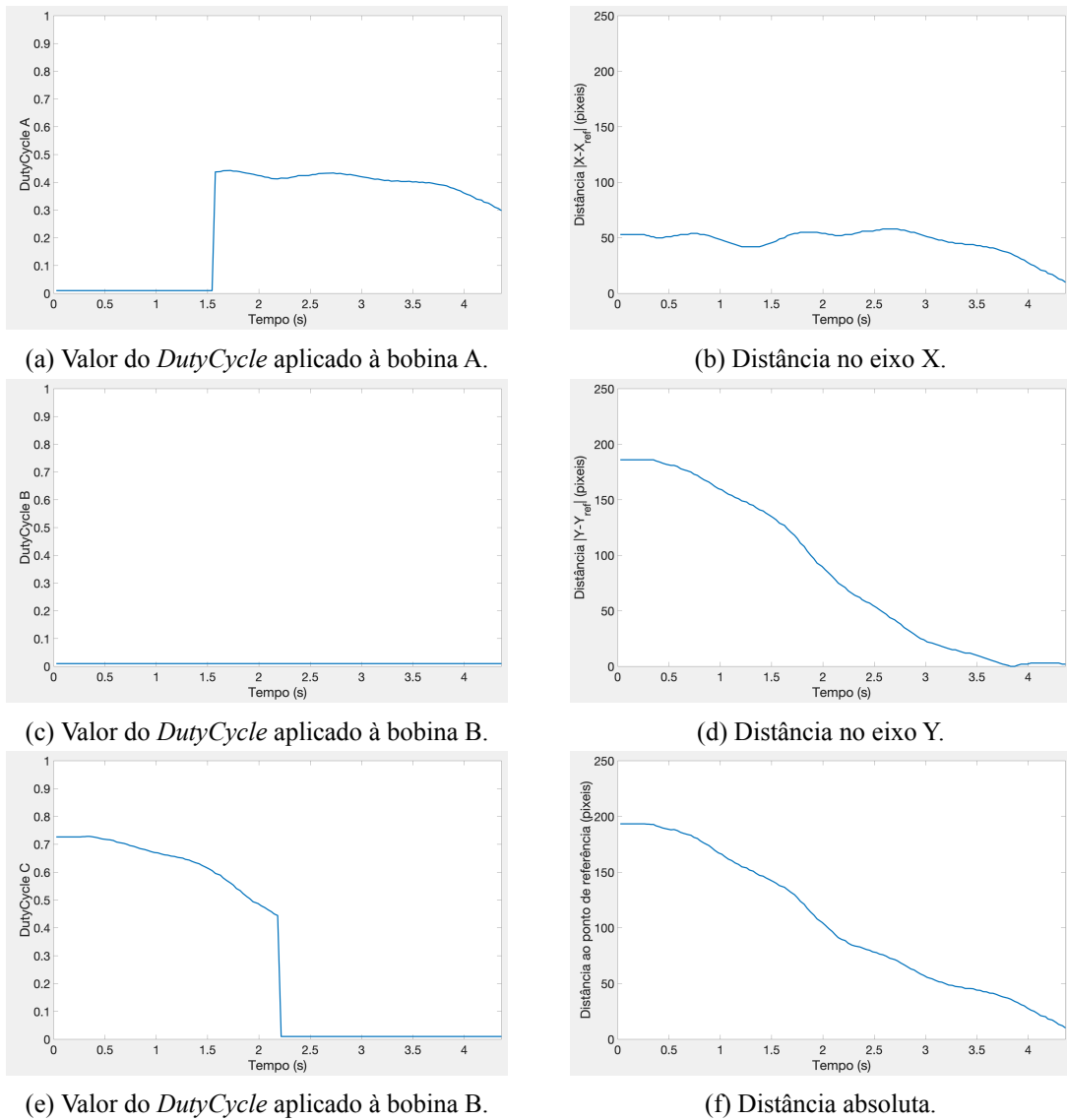


Figura 5.5: Valores obtidos para a experiência de estabilização num ponto aleatório P=(400, 300).

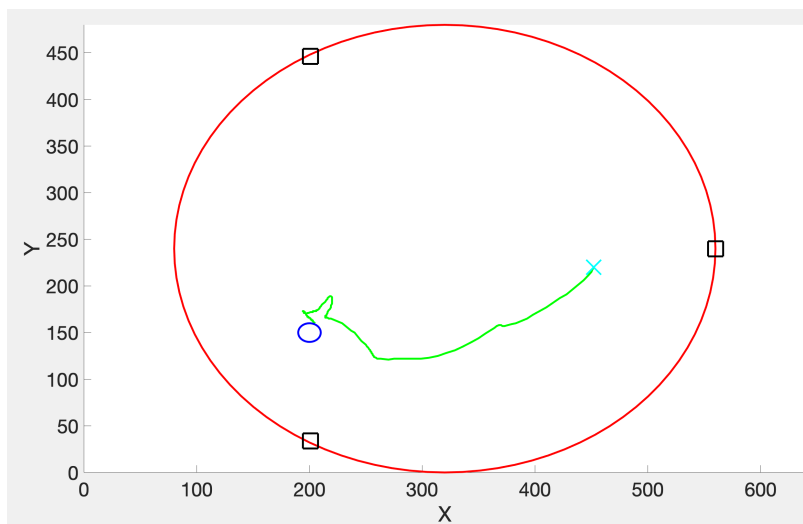


Figura 5.6: Deslocamento do corpo ao longo do espaço (X,Y).

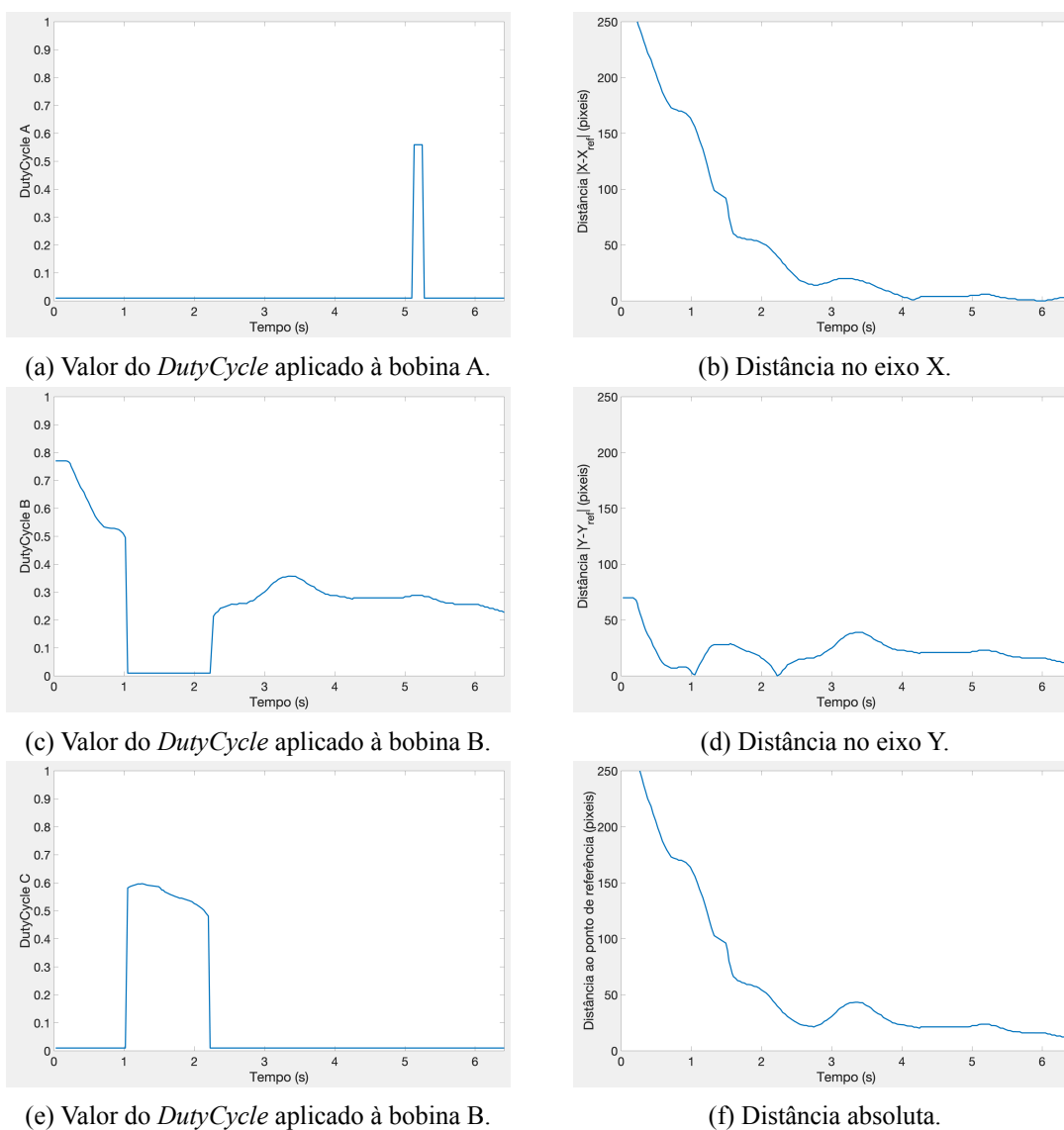


Figura 5.7: Valores obtidos para a experiência de estabilização num ponto aleatório $P=(200, 150)$.

5.4 Seguimento de Pontos

Esta última experiência consegue representar melhor o objetivo final estabelecido para o sistema, que é o controlo da posição do objeto. Nesta fase, foram escolhidos vários pontos aleatórios era esperado que o objeto passasse com a ordem pretendida. Tendo em conta todos os pontos definidos como apresentados na tabela 5.1, o algoritmo cria vários pontos intermédios, simulando uma linha por onde o objeto passa, para tornar a transição entre os pontos principais definidos o mais suave e contínua possível. Na fig. 5.8 pode-se observar os pontos escolhidos que estão assinalados com um X de cor magenta. Já as linhas pretas a unir esses pontos representam os pontos intermédios criados pelo algoritmo para que o objeto tenha uma referência contínua a seguir.

Tabela 5.1: Pontos de referência escolhidos para seguimento.

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
X_{ref}	320	400	320	220	320	400	320	220	320
Y_{ref}	240	180	240	180	240	300	240	300	240

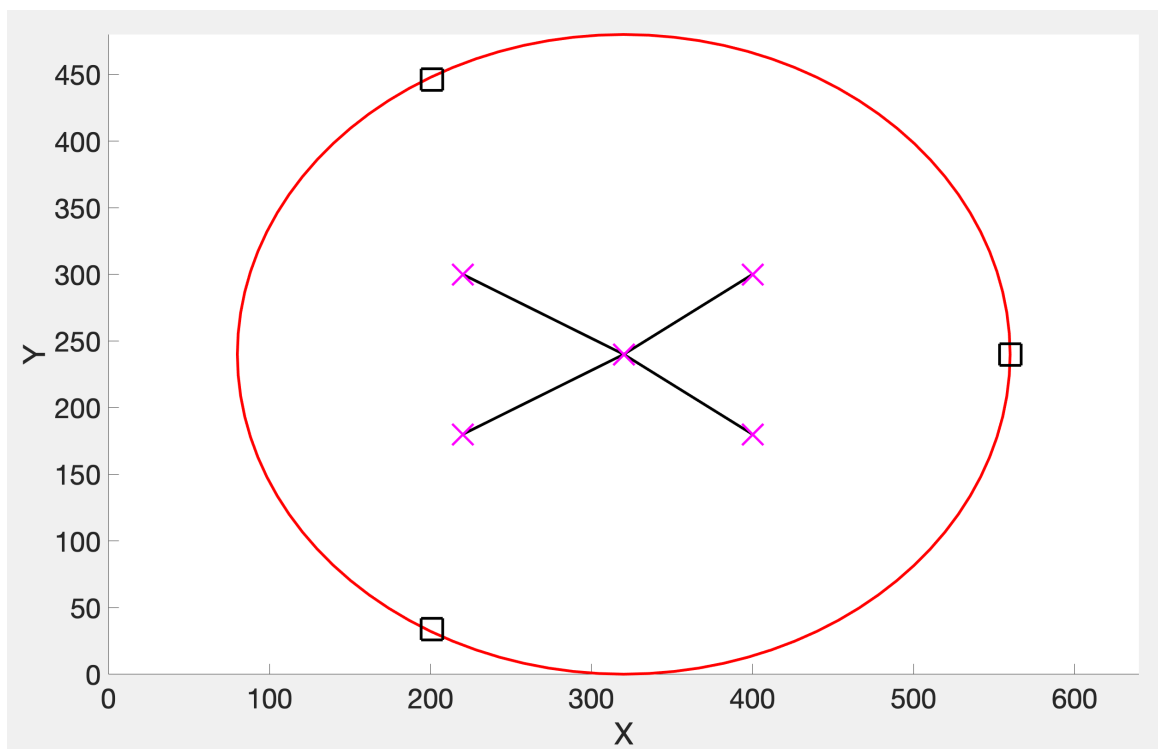


Figura 5.8: Pontos de referência utilizados na experiência.

À semelhança das experiências anteriores apresentadas, pode-se observar na fig. 5.9, para além dos mesmos dados em representação nas figuras equivalentes das experiências anteriores, as linhas a preto, que correspondem a todos os pontos que a cápsula teve que seguir ao longo de toda a experiência.

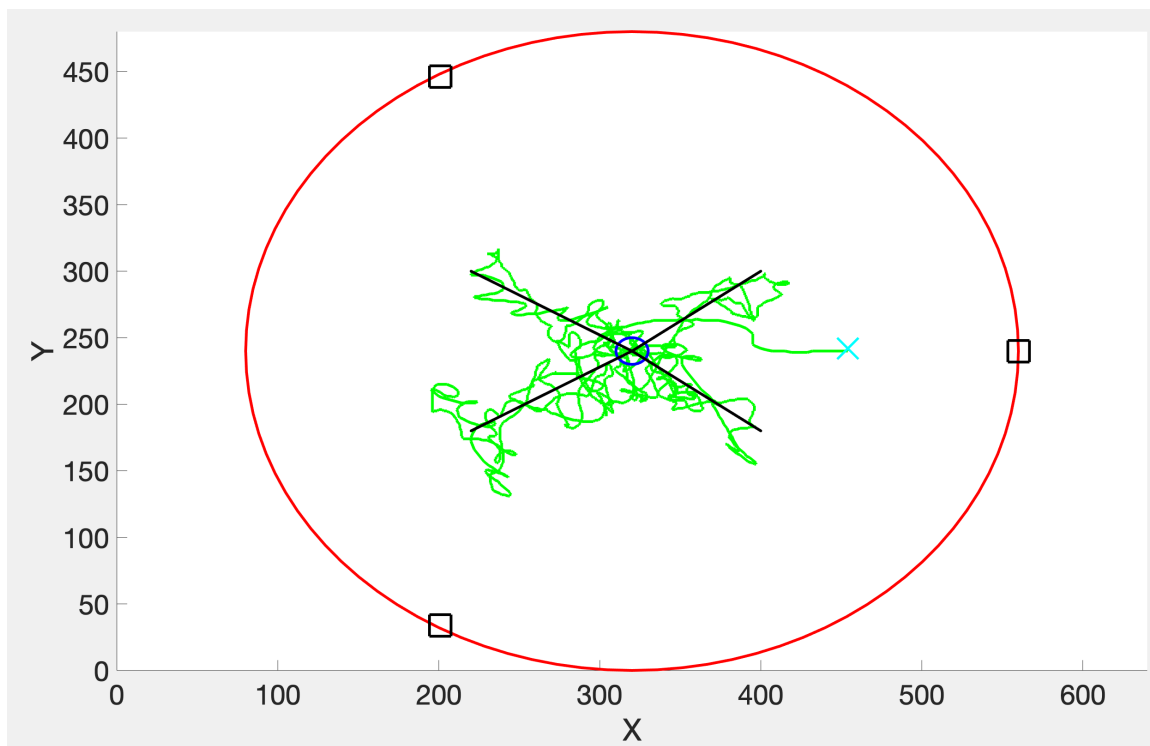


Figura 5.9: Deslocamento do corpo ao longo do espaço (X,Y).

De forma semelhante ao que aconteceu nos ensaios anteriores, na fig. 5.10a, fig. 5.10c e fig. 5.10e observa-se o valor dos *duty-cycles* aplicados a cada uma das bobinas em função de todo tempo decorrido. Já na fig. 5.10b e na fig. 5.10d pode-se visualizar a distância existente entre o objeto e os pontos de referência, em cada instante, distribuídos pelos dois eixos cartesianos que posteriormente originam os valores obtidos na fig. 5.10f, que é a distância absoluta, em pixels, aos pontos de referência em cada iteração do sistema.

O sistema atinge o último ponto da sequência total de pontos após 116.35 segundos. Analisando a fig. 5.9 verifica-se que o objeto manteve uma trajetória minimamente coerente com o que se pretendia, seguindo todos os pontos estabelecidos. Para além do tempo obtido ser bastante interessante e positivo, o percurso foi todo realizado sem nunca ser necessário ativar o mecanismo de retorno de pontos de referência. No algoritmo existe um método para evitar que a cápsula fique estabilizada num dado sítio sem que este seja o desejado, ou seja, se ao fim de um certo número de iterações ele não conseguir atingir o ponto de referência atribuído àquela iteração, ele recua um ponto e assim sucessivamente, até que consiga de novo a entrar no percurso e seguir todos os pontos direitos.

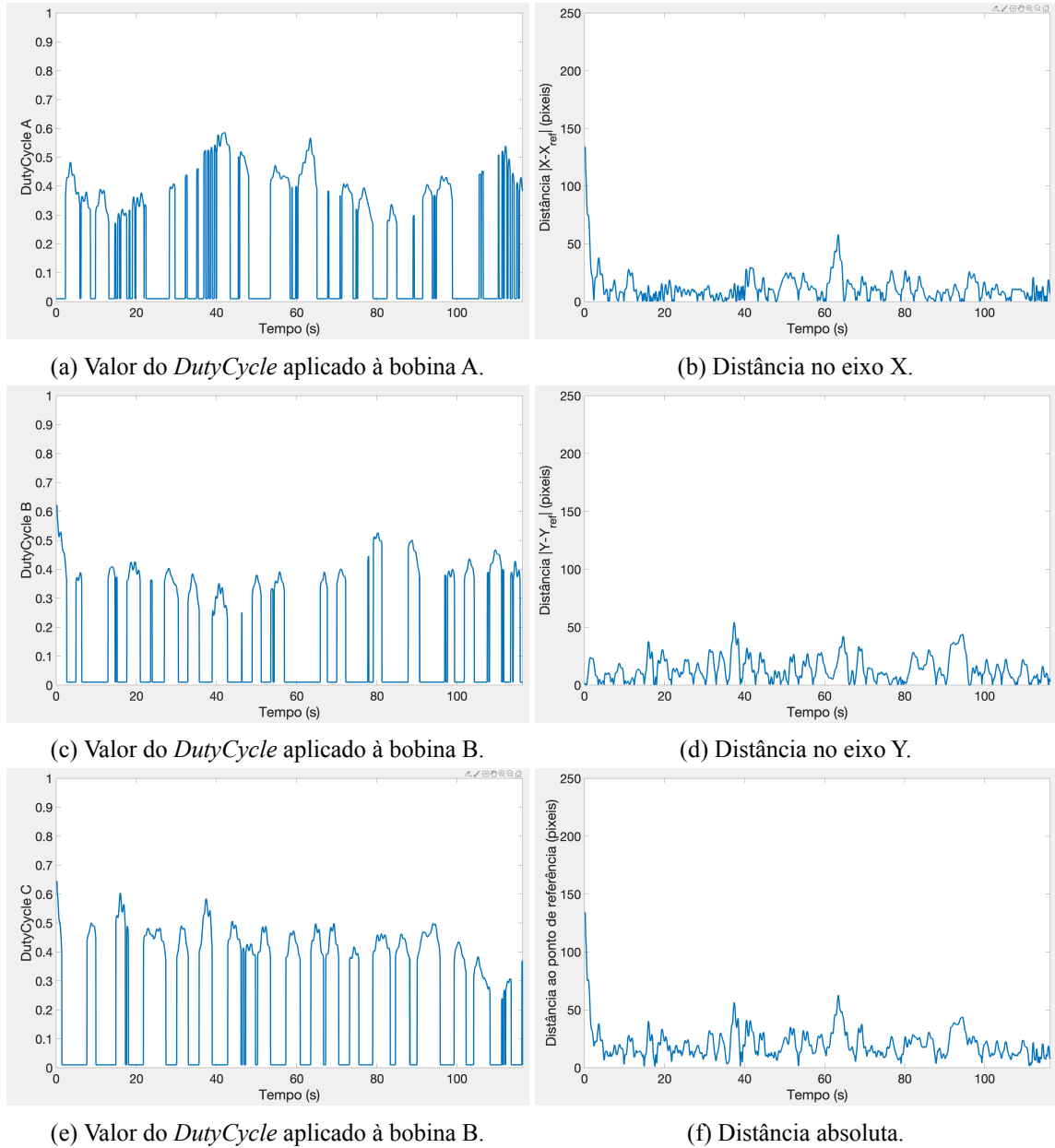


Figura 5.10: Valores obtidos para a experiência de seguimento de trajetória.

Capítulo 6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Ao longo desta dissertação descreve-se um projeto desenvolvido de raiz que possibilita o controle da posição de uma cápsula magnetizada. Este tipo de sistemas é cada vez mais relevante no que toca ao controlo magnético de objetos. Começando pela importância que podem ter para a locomoção de pequenos robôs até à notável participação que poderão ter em diversos exames invasivos realizados na área da medicina. No limite, um desenvolvimento considerável neste tipo de projetos poderá até facilitar a intrusão de componentes e o controlo de objetos durante uma simples cirurgia.

Através da análise dos resultados obtidos nas diversas experiências realizadas verificamos que o objetivo de controlar a posição de um objeto utilizando unicamente campos magnéticos foi atingido com sucesso. Todas as experiências produziram resultados positivos e suficientemente fortes para que este trabalho possa continuar a evoluir e a ser explorado cada vez mais ao pormenor. É nesse sentido que são deixadas aqui algumas sugestões que poderão servir para trabalhos futuros e para ser exploradas:

- Alterar do algoritmo de controlo, tendo em consideração os pontos de referência seguintes e não só o atual;
- Utilizar um estator composto por ferro, para tentar diminuir a relutância existente no sistema magnético e, conseqüentemente, diminuir a intensidade das correntes aplicadas;
- Alterar o modo de *feedback* da posição do objeto, utilizando, por exemplo, sensores de Efeito de *Hall*;
- Testar novas posições dos ímanes colocados na cápsula ou até testar com materiais ferromagnéticos.
- Verificar as diferenças do controlo de posição em meios mais ou menos viscosos;
- Utilizar um objeto que não necessite de estar colocado dentro de uma cápsula para flutuar e que consiga ser controlado sem esse acessório;
- Pegar numa carcaça de um motor trifásico e experimentar algumas configurações para verificar a exequibilidade do projeto nesta situação;
- Evoluir o controlo, dotando-o de capacidades de controlo da orientação da cápsula.

Bibliografia

- [1] Mir Behrad Khamesee et al. «Design and control of a microrobotic system using magnetic levitation». Em: *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 7.1 (2002), pp. 1–14.
- [2] Xi Jiang et al. «Impact of magnetic steering on gastric transit time of a capsule endoscopy (with video)». Em: *Gastrointestinal endoscopy* 88.4 (2018), pp. 746–754.
- [3] Riccardo Carta et al. «Wireless powering for a self-propelled and steerable endoscopic capsule for stomach inspection». Em: *Biosensors and Bioelectronics* 25.4 (2009), pp. 845–851.
- [4] Naveen Shamsudhin et al. «Magnetically guided capsule endoscopy». Em: *Medical physics* 44.8 (2017), e91–e111.
- [5] Hee Man Kim et al. «Active locomotion of a paddling-based capsule endoscope in an in vitro and in vivo experiment (with videos)». Em: *Gastrointestinal endoscopy* 72.2 (2010), pp. 381–387.
- [6] Byungkyu Kim, Sukho Park e Jong-Oh Park. «Microrobots for a capsule endoscope». Em: *2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE. 2009, pp. 729–734.
- [7] Sang Hyo Woo et al. «Small intestinal model for electrically propelled capsule endoscopy». Em: *Biomedical engineering online* 10.1 (2011), p. 108.
- [8] Gi-Shih Lien et al. «Magnetic control system targeted for capsule endoscopic operations in the stomach—design, fabrication, and in vitro and ex vivo evaluations». Em: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 59.7 (2012), pp. 2068–2079.
- [9] Levin J Sliker e Gastone Ciuti. «Flexible and capsule endoscopy for screening, diagnosis and treatment». Em: *Expert review of medical devices* 11.6 (2014), pp. 649–666.
- [10] Gastone Ciuti et al. «Frontiers of robotic endoscopic capsules: a review». Em: *Journal of micro-bio robotics* 11.1-4 (2016), pp. 1–18.
- [11] Fahad N Alsunaydih, Jean-Michel Redoute e Mehmet R Yuce. «A wireless capsule endoscopy steering mechanism using magnetic field platform». Em: *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2017 39th Annual International Conference of the IEEE*. IEEE. 2017, pp. 3036–3039.

- [12] Gastone Ciuti et al. «Robotic magnetic steering and locomotion of capsule endoscope for diagnostic and surgical endoluminal procedures». Em: *Robotica* 28.2 (2010), pp. 199–207.
- [13] G Ciuti et al. «Robotic versus manual control in magnetic steering of an endoscopic capsule». Em: *Endoscopy* 42.2 (2010), p. 148.
- [14] Saman Hosseini e Mir Behrad Khamesee. «Design and control of a magnetically driven capsule-robot for endoscopy and drug delivery». Em: *Science and Technology for Humanity (TIC-STH), 2009 IEEE Toronto International Conference*. IEEE. 2009, pp. 697–702.
- [15] Christian Di Natali, Marco Beccani e Pietro Valdastrì. «Real-time pose detection for magnetic medical devices». Em: *IEEE Transactions on Magnetics* 49.7 (2013), pp. 3524–3527.
- [16] Michael P Kummer et al. «OctoMag: An electromagnetic system for 5-DOF wireless micro-manipulation». Em: *IEEE Transactions on Robotics* 26.6 (2010), pp. 1006–1017.
- [17] Henrik Keller et al. «Method for navigation and control of a magnetically guided capsule endoscope in the human stomach». Em: *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*. IEEE. 2012, pp. 859–865.
- [18] Jo F Rey et al. «Feasibility of stomach exploration with a guided capsule endoscope». Em: *Endoscopy* 42.07 (2010), pp. 541–545.
- [19] Jean-Francois Rey et al. «Blinded nonrandomized comparative study of gastric examination with a magnetically guided capsule endoscope and standard videoendoscope». Em: *Gastrointestinal endoscopy* 75.2 (2012), pp. 373–381.
- [20] Bhag S Guru e Huseyin R Hiziroglu. *Electric machinery and transformers*. Vol. 726. Oxford University Press New York, 2001.
- [21] R.D. Knight. *Física: Uma Abordagem Estratégica - Vol 3*. vol. 3. Bookman, 2009. ISBN: 978-85-7780-553-2.
- [22] Hugh D Young, Roger A Freedman e A Lewis Ford. *Sears and Zemansky's University physics 13th edition*. Addison-Wesley Professional, 2012.
- [23] Katsuhiko Ogata e Yanjuan Yang. *Modern control engineering*. Vol. 17. Pearson Upper Saddle River, NJ, 2010.
- [24] José Alberto, Fernando JTE Ferreira e Aníbal T De Almeida. «Study and Design of a Small-Diameter Tubular Linear Motor for Biomedical Applications». Em: *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE. 2018, pp. 1691–1697.
- [25] Christian Di Natali et al. «Jacobian-based iterative method for magnetic localization in robotic capsule endoscopy». Em: *IEEE Transactions on Robotics* 32.2 (2016), pp. 327–338.

- [26] Jaromír Jezný e Miloslav Čurilla. «Position measurement with hall effect sensors». Em: *American Journal of Mechanical Engineering* 1.7 (2013), pp. 231–235.
- [27] Apoorva Raghunandan, Pakala Raghav, HV Ravish Aradhya et al. «Object Detection Algorithms for video surveillance applications». Em: *2018 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*. IEEE. 2018, pp. 0563–0568.
- [28] Daniel W Hart. *Power electronics*. Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- [29] Jaime B Santos. *Análise de Circuitos Eléctricos*. Publindústria, 2016. ISBN: 978-989-723-186-5.
- [30] 28 IEEE Standards Coordinating Committee et al. «IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3kHz to 300GHz». Em: *IEEE C95.1-2005* (2006), pp. 1–238.
- [31] ICNIRP Guideline. «Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)». Em: *Health phys* 74.4 (1998), pp. 494–522.
- [32] Silvia de Miguel-Bilbao et al. «Assessment of exposure from Wi-Fi devices». Em: *2014 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*. IEEE. 2014, pp. 1–4.

Apêndice A. Criação da Trajetória

```
function [x_ref y_ref] = Trajectory(x_ref_points, y_ref_points)
    x = 1:640;
    x_ref = x_ref_points(1);
    y_ref = y_ref_points(1);

    for i=1:length(x_ref_points)-1
        if(x_ref_points(i) > x_ref_points(i+1))
            a(1) = x_ref_points(i+1);
            a(2) = x_ref_points(i);
            b(1) = y_ref_points(i+1);
            b(2) = y_ref_points(i);
            P = polyfit(a(1:2),b(1:2),1);
            F = polyval(P,x(a(1):a(2)));
            x0 = a(1):a(2);
            for j=1:length(F)
                F1(j) = F(length(F)-j+1);
                x1(j) = x0(length(F)-j+1);
            end
            x_ref = [x_ref x1];
            y_ref = [y_ref F1];

            clear F1;
            clear x0;
            clear x1;
        else
            a(1) = x_ref_points(i);
            a(2) = x_ref_points(i+1);
            b(1) = y_ref_points(i);
            b(2) = y_ref_points(i+1);
            P = polyfit(a(1:2),b(1:2),1);
            F = polyval(P,x(a(1):a(2)));

            x_ref = [x_ref x(a(1):a(2))];
            y_ref = [y_ref F];
        end

        clear P;
        clear F;
    end
end
```

Figura A.1: Função para a criação dos pontos intermédios para a trajetória.

Apêndice B. Inicialização da Webcam

```
function [cam, img] = Initialize_Webcam(x_ref, y_ref, x_coil_a, ...
x_coil_b, x_coil_c, y_coil_a, y_coil_b, y_coil_c)

% Lista as câmaras visíveis ao Matlab
camera = webcamlist();

% Seleciona a camera a utilizar no índice 1
minhacamera = camera(1);

% Cria variável com o nome da camera escolhida anteriormente
cam = webcam(char(minhacamera));

% Visualização do que está a aparecer na webcam
preview(cam);

% Captura de uma frame
img = snapshot(cam);

% Parâmetros
m_a = -(y_ref-y_coil_a)/(x_ref-x_coil_a);
b_a = x_ref-m_a*y_ref;
m_b = -(x_ref-x_coil_b)/(y_ref-y_coil_b);
m__b = -1/m_b;
b_b = y_ref-m_b*x_ref;
b__b = y_ref-m__b*x_ref;
m_c = -(x_ref-x_coil_c)/(y_ref-y_coil_c);
m__c = -1/m_c;
b_c = y_ref-m_c*x_ref;
b__c = y_ref-m__c*x_ref;
x__b_c = 1:640;
y__b = m_b*x__b_c+b_b;
y__c = m_c*x__b_c+b_c;

% Equações
x = 1:640;
y = 1:480;
x_a = m_a*y+b_a;
y_b = m_b*x+b_b;
y_c = m_c*x+b_c;
```

```
% Imagem
hold on;
imagesc(img);
rectangle('Position',[80 0 480 480],'EdgeColor',[1 0 0],...
          'Curvature',[1,1],'LineWidth',5);
rectangle('Position',[140 60 360 360],'EdgeColor',[1 0 1],...
          'Curvature',[1,1],'LineWidth',2);
axis([0 640 0 480]);
plot(x_coil_a, y_coil_a, 'bo', 'MarkerSize', 30);
plot(x_coil_b, [y_coil_b, y_coil_c], 'bo', 'MarkerSize', 30);
if(m_a == 0)
    m_a = -1/((-x_ref-x_coil_a)/(y_ref-y_coil_a));
    b_a = y_ref-m_a*x_ref;
    y_a = m_a*x_b_c+b_a;
    plot(x_b_c, y_a, '.b')
else
    m_a = -1/m_a;
    b_a = x_ref-m_a*y_ref;
    y_a = 1:480;
    x_a = m_a*y_a+b_a;
    plot(x_a, y_a, '.b');
end
plot(x_b_c, y_b, '.b');
plot(x_b_c, y_c, '.b');
plot(x_a, y, '.g');
plot(x, y_b, '.g');
plot(x, y_c, '.g');
plot(x_ref, y_ref, 'xk');
end
```

Figura B.1: Função para a inicialização da comunicação com a webcam.

Apêndice C. Ligação ao Módulo da NI

```
function [daqSession, ch] = Conect_cDAQ(f)
    % cria a sessão
    daqSession = daq.createSession('ni');

    % nº de canais a utilizar
    n = 3;

    % tempo máximo de funcionamento em segundos
    daqSession.DurationInSeconds = 5000;

    for (i=1:n)
        % Inicialização dos canais de comunicação e seus modos
        ch(i) = daqSession.addCounterOutputChannel('cDAQ1Mod1', ...
            strcat('ctr',int2str(i-1)), 'PulseGeneration');

        % atribuição da frequência de saída
        ch(i).Frequency = f;

        % Valor do duty-cycle inicial
        ch(i).DutyCycle = 0.05;
    end
end
```

Figura C.1: Função para a inicialização da comunicação com o Módulo da *National Instruments*.

Apêndice D. Processamento de Imagem

```
% Captura de uma frame
img = snapshot(cam);

% Caso o objeto seja vermelho
imgNew(:,:,1) = img(:,:,1)-img(:,:,3);
imgNew(:,:,1) = imgNew(:,:,1)-img(:,:,2);
imgNew(:,:,2) = 0;
imgNew(:,:,3) = 0;

% Criação de binária tendo em conta o limiar
L = imgNew(:,:,1) > 50;

% Detecção das áreas existentes e dos seus parâmetros
out_a=regionprops(L);

% Seleção da maior área
areas=[out_a.Area];
[area_max pam_max]=max(areas);

% Atribuição do centro correspondente à maior área
centro=round(out_a(pam_max).Centroid);

% Atribuição das coordenadas (X,Y)
X=centro(1);
Y=centro(2);
```

Figura D.1: Implementação do algoritmo utilizado para processamento de imagem e obtenção da posição do objeto.

Apêndice E. Algoritmo de Controlo

```
% Equações
x_a(i) = m_a(i)*Y+b_a(i);
y_b(i) = m_b(i)*X+b_b(i);
y_c(i) = m_c(i)*X+b_c(i);

% Controlo bobina A - saída 19
if (X < x_a(i)) % Atua a bobina A
    dist_ref_a = sqrt((x_ref(i)-x_coil_a)^2+(y_ref(i)-y_coil_a)^2);
    dist_a = sqrt((X-x_coil_a)^2+(Y-y_coil_a)^2);
    dist_max_a = 480;
    d1 = c_ref*(dist_a-dist_ref_a)/dist_a + c_dist*dist_a/dist_max_a;
    d1 = deltaLa*d1; % Compensação atribuída após testes experimentais
else % Não atua a bobina A
    d1 = 0.01;
end
ch(1).DutyCycle = d1;

% Controlo bobina B - saída 25
if (Y > y_b(i)) % Atua a bobina B
    dist_ref_b = sqrt((x_ref(i)-x_coil_b)^2+(y_ref(i)-y_coil_b)^2);
    dist_b = sqrt((X-x_coil_b)^2+(Y-y_coil_b)^2);
    dist_max_b = 480;
    d2 = c_ref*(dist_b-dist_ref_b)/dist_b + c_dist*dist_b/dist_max_b;
    d2 = deltaLb*d2; % Compensação atribuída após testes experimentais
else % Não atua a bobina B
    d2 = 0.01;
end
ch(2).DutyCycle = d2;

% Controlo bobina C - saída 16
if (Y < y_c(i)) % Atua a bobina C
    dist_ref_c = sqrt((x_ref(i)-x_coil_c)^2+(y_ref(i)-y_coil_c)^2);
    dist_c = sqrt((X-x_coil_c)^2+(Y-y_coil_c)^2);
    dist_max_c = 480;
    d3 = c_ref*(dist_c-dist_ref_c)/dist_c + c_dist*dist_c/dist_max_c;
    d3 = deltaLc*d3; % Compensação atribuída após testes experimentais
else % Não atua a bobine C
    d3 = 0.01;
end
ch(3).DutyCycle = d3;
```

Figura E.1: Implementação do algoritmo de controlo utilizado para geração dos valores dos *duty-cycles*.