

# **Estudo e desenvolvimento de um dispositivo háptico de dois graus de liberdade baseado em atuadores de corrente contínua**

Jorge Miguel Ferreira da Silva

**Dissertação**

Orientadores:

Manuel Rodrigues Quintas

Maria Teresa Restivo



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**  
**Ramo de Automação**

Setembro 2014



*Avó, espero que sintas orgulho em mim.*

*Todo este esforço é em tua memória.*



## Resumo

O presente trabalho vem no seguimento de atividades I&D&I realizadas no Laboratório de Instrumentação para Medição (LIM), do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Num contexto do projeto *Experiment@Portugal* 2012 e visando o uso de tecnologias emergentes foi considerado de interesse o projeto e a produção de um protótipo de um dispositivo háptico de um grau de liberdade (1 GL) que permitisse a sua utilização em aplicações em que a atuação apenas se exercesse numa direção.

O objetivo deste trabalho compreende o estudo e desenvolvimento de um dispositivo háptico de dois graus de liberdade num movimento planar sendo a sua atuação baseada em atuadores de corrente contínua.

Inicialmente realizou-se um estudo de soluções existentes no mercado assim como desenvolvidas dando uma maior ênfase a soluções próximas do dispositivo háptico pretendido.

A “prova de conceito” do dispositivo háptico desenvolvido contém um mecanismo paralelo de nove barras ligadas e um movimento planar com dois graus de liberdade. Possui dois eixos sendo o movimento de cada um controlado por um motor de corrente contínua.

Todo o sistema é controlado recorrendo a um circuito eletrónico baseado na utilização de microcontroladores. Dois microcontroladores são responsáveis por controlar cada um dos motores. Um terceiro microcontrolador é responsável por receber a informação dos outros dois e dispõe de capacidade para comunicar com outros tipos de dispositivos (por ex. computador pessoal) através de uma comunicação USB.



## Abstract

The present work is within R&D&I activities carried out in the Instrumentation for Measurement Laboratory (LIM), in the Mechanical Engineering Department of the Faculty of Engineering of University of Porto (FEUP). Following activities developed during the project Experiment@Portugal 2012 concerning the use of the emerging technologies in engineering training, it has been considered of interest to design and assembly one degree of freedom (1 DOF) haptic device prototype to be used in applications with actuations in only one direction.

The objective of the present work is the study and development of a haptic device of 2 DOF in a planar motion actuated by DC motors.

Available solutions in the market were studied and special emphasis was given to those close to the haptic device type of 2 DOF with planar motion.

The developed “proof of concept” haptic device contains a seven bar linkage parallel mechanism, and a planar motion with 2 DOF. It has two axes being the motion of each one of them controlled by a DC motor.

The entire system is controlled using an electronic circuit based on the use of microcontrollers. Two microcontrollers are responsible for controlling each one of the motors. A third microcontroller is responsible for receiving the information from the other two and has the ability to communicate with other types of devices (eg. personal computer) via a USB communication.



## Agradecimentos

Aos meus orientadores, o Prof. Manuel Quintas e a Prof.<sup>a</sup> Teresa Restivo por todo o apoio, toda a dedicação e todo o conhecimento transmitido ao longo deste semestre.

Ao Prof. José Reina pela sua disponibilidade e conhecimento transmitido.

A todos os investigadores do Laboratório de Instrumentação para Medição em especial ao Bruno Santos por toda a sua ajuda ao longo do semestre.

Aos meus colegas Fernando Carneiro, Francisco Rua, Pedro Sousa e Rafael Tavares por todo o companheirismo e ajuda nos momentos mais importantes.

Ao João Pedro “BIG”, por todo o seu companheirismo e disponibilidade em ajudar-me em tudo o que precisasse.

Ao meu padrinho por toda a força transmitida e por ter sempre a palavra certa que me ajudou bastante. Um orgulho de qualquer afilhado.

À minha namorada por todo o seu apoio e paciência nestes tempos em que não estive tão presente como gostaria. Acima de tudo a forte amizade e confiança transmitida deram-me força para continuar a lutar. Tenho muita sorte por te ter ao meu lado.

Aos meus pais, pois sem eles não teria chegado aqui. Todo o esforço, todo o sacrifício e toda a paciência não serão nunca esquecidos. Apesar de todas as dificuldades passadas, houve sempre um apoio incondicional e uma palavra de motivação. São um exemplo a seguir e espero um dia poder recompensá-los por tudo o que fizeram por mim.

A todos aqueles que não foram mencionados mas que sempre me apoiaram ao longo desta caminhada, o meu muito obrigado.



# Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Considerações Iniciais .....	1
1.2	Motivação .....	2
1.3	Objetivos .....	3
1.4	Estrutura da Dissertação .....	3
2	Estado da Arte .....	5
2.1	Contextualização.....	5
2.2	Dispositivos Hápticos.....	10
2.2.1	Definição .....	10
2.2.2	Dispositivos Hápticos na Reabilitação.....	12
2.2.3	Tipos de Dispositivos Hápticos .....	13
2.2.4	<i>Geomagic Touch</i> .....	17
2.2.5	<i>1 DOF Haptic Device Built with Parts of Recycled Material</i> .....	19
2.2.6	<i>Hapkit</i> .....	21
2.2.7	<i>The Pantograph</i> .....	27
2.3	Conclusão.....	31
3	Modelação da Cinemática do Mecanismo .....	33
3.1	Mecanismos com Dois Graus de Liberdade.....	33
3.1.1	Mecanismo Paralelo de Cinco Barras Ligadas.....	34
3.1.2	<i>Sensation</i> .....	35
3.2	Caraterização do Mecanismo Desenvolvido.....	40
3.2.1	Graus de Liberdade.....	40
3.2.2	Cinemática Inversa .....	42
3.2.3	Espaço de Trabalho .....	49
3.2.4	Análise da Transmissão de Binário .....	54
3.2.5	Cinemática Direta .....	61
3.2.6	Singularidades.....	68
3.3	Conclusão.....	68
4	Projeto e Desenvolvimento da Solução Mecânica .....	69
4.1	Introdução .....	69
4.2	Materialização do Mecanismo de Nove Barras Ligadas.....	69

4.3 Sistema de Transmissão do Movimento .....	76
4.3.1 Acionamento por Correia .....	77
4.3.2 Acionamento por Engrenagem.....	78
4.3.3 Acionamento por Correia e Engrenagem .....	79
4.4 Conclusão .....	92
5 Projeto e Desenvolvimento do Sistema Elétrico/Eletrónico .....	95
5.1 Introdução.....	95
5.2 Microcontrolador .....	95
5.3 Arquitetura .....	96
5.4 Circuito Eletrónico .....	98
5.5 Componentes Eletrónicos .....	99
5.5.1 Microcontroladores .....	99
5.5.2 Regulador de Tensão .....	102
5.5.3 <i>Drive</i> L298N .....	103
5.5.4 Filtros.....	106
5.5.5 <i>Display</i> .....	107
5.5.6 Motores CC .....	108
5.6 Programação .....	109
5.6.1 Comunicação SPI .....	110
5.6.2 Frequência do PWM .....	114
5.6.3 Leitura de Posição .....	116
5.6.4 Controlo .....	118
5.7 Conclusão .....	121
6 Conclusão e Trabalhos Futuros .....	123
6.1 Conclusão.....	123
6.2 Trabalhos Futuros.....	124
Referências .....	125
ANEXO A: Circuito eletrónico desenhado no <i>software</i> EAGLE .....	131

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Simulador Sensorama [6].....	6
Figura 2.2 - Head-Mounted Display [7] .....	6
Figura 2.3 – Exemplo de um simulador de voo utilizado atualmente na Força Aérea dos Estados Unidos [9].....	7
Figura 2.4 - Representação das principais diferenças entre a RV não imersiva, semi-imersiva e totalmente imersiva: a) RV não imersiva [12]; b)RV semi-imersiva [13]; c)RV totalmente imersiva [14].....	8
Figura 2.5 - Interação entre utilizador, dispositivo háptico e computador [21].....	11
Figura 2.6 – Curictus: Sistema de reabilitação virtual [26] .....	13
Figura 2.7 – CyberGlove, dispositivo móvel [22].....	14
Figura 2.8 – CyberGrasp, dispositivo háptico móvel [27] .....	14
Figura 2.9 - Dispositivo háptico fixo: Joystick com feedback de força [28].....	15
Figura 2.10 - Geomagic Touch, dispositivo háptico com feedback de força disponível no LIM .....	17
Figura 2.11 - Áreas de aplicação do Geomagic Touch [36, 47-49].....	18
Figura 2.12 - Representação dos graus de liberdade do Geomagic Touch [50].....	18
Figura 2.13 - Dispositivo háptico com um grau de liberdade construído com partes de material reciclado disponível no LIM .....	20
Figura 2.14 - Versão inicial do Haptic Paddle desenvolvido na Universidade de Stanford [57].....	22
Figura 2.15 - Dispositivo háptico com um grau de liberdade: Hapkit [66] .....	24
Figura 2.16 - Transmissão por fricção no Hapkit [67].....	25
Figura 2.17 - Leitura de posição através de um sensor magnetoresistivo [67] .....	25
Figura 2.18 – Sensor de força resistivo (FSR) utilizado no manípulo do Hapkit [67]	26
Figura 2.19 - PCB utilizado no Hapkit [67] .....	26
Figura 2.20 - Primeiro protótipo do Pantógrafo, dispositivo háptico desenvolvido por Vincent Hayward e Christophe Ramstein [71].....	27
Figura 2.21 - Versão mais pequena do Pantógrafo com ligeiras alterações [72].....	29
Figura 2.22 - Versão do Pantógrafo no qual era necessário segurá-lo com a mão [72]	29
Figura 2.23 - Pantograph Mk-II [72].....	30
Figura 2.24 - Vista lateral do Pantograph [73] .....	30

Figura 3.1 - Mecanismo de cinco barras ligadas com dois graus de liberdade .....	35
Figura 3.2 - Sensation: mecanismo paralelo com 2 GL [77] .....	35
Figura 3.3 – Exemplo de uma configuração do Sensation que possui uma singularidade de cinemática direta [77] .....	36
Figura 3.4 – Exemplo de uma configuração do Sensation que possui uma singularidade de cinemática inversa [77] .....	37
Figura 3.5 - Representação do espaço de trabalho e das singularidades do mecanismo de cinco barras ligadas [77] .....	37
Figura 3.6 - Representação do espaço de trabalho e das singularidades do Sensation [77] .....	38
Figura 3.7 - Elipses de manipulabilidade do mecanismo de cinco barras ligadas [77].	39
Figura 3.8 - Elipses de manipulabilidade do Sensation [77].....	39
Figura 3.9 - Mecanismo paralelo de nove barras ligadas .....	40
Figura 3.10 - Divisão do pentágono, que forma o mecanismo de cinco barras ligadas, em três triângulos [73].....	43
Figura 3.11 - Modelo cinemático do mecanismo paralelo de nove barras ligadas utilizado para resolver o problema de cinemática inversa.....	43
Figura 3.12 - Triângulo formado pelas barras $L_1$ , $L_2$ e distância $d_{13}$ .....	44
Figura 3.13 - Modelo cinemático com os ângulos utilizados para determinar a posição das barras interiores.....	46
Figura 3.14 - Diagrama ilustrativo do código da cinemática inversa implementado em MATLAB.....	48
Figura 3.15 - Figura gerada em MATLAB com a configuração do mecanismo em função da cinemática inversa.....	49
Figura 3.16 - Diagrama ilustrativo do código implementado, em MATLAB, que realiza o varrimento dos limites do espaço de trabalho do mecanismo desenvolvido.....	50
Figura 3.17 - Figura gerada em MATLAB para o varrimento dos limites do espaço de trabalho .....	51
Figura 3.18 - Diagrama ilustrativo do código implementado, em MATLAB, que realiza o varrimento da área de trabalho do mecanismo desenvolvido .....	52
Figura 3.19 - Varrimento da área de trabalho definida.....	53
Figura 3.20 - Diagrama ilustrativo do código implementado, em MATLAB, que realiza o varrimento da área de trabalho disponível do mecanismo desenvolvido .....	53
Figura 3.21 - Área de trabalho disponível.....	54

Figura 3.22 - Modelo cinemático do mecanismo paralelo de nove barras ligadas utilizado no método dos deslocamentos.....	57
Figura 3.23 - Diagrama ilustrativo do código implementado, em MATLAB, que realiza a análise de momentos do mecanismo desenvolvido .....	58
Figura 3.24 - Estrutura gerada em: a) MATLAB; b) Multiframe.....	59
Figura 3.25 - Tabela da análise da transmissão de binário, obtida em MATLAB e Multiframe 4D.....	59
Figura 3.26 - Diagrama ilustrativo do código implementado, em MATLAB, que realiza um varrimento da análise de momentos do mecanismo desenvolvido...	60
Figura 3.27 - Modelo cinemático do mecanismo paralelo de nove barras ligadas utilizado para resolver o problema de cinemática direta.....	62
Figura 3.28 - Duas soluções possíveis mantendo o mesmo valor dos ângulos $\theta$ e $\beta$ ....	65
Figura 3.29 - Diagrama ilustrativo do código da cinemática direta implementado em MATLAB .....	66
Figura 3.30 - Figura gerada em MATLAB com a configuração do mecanismo em função da cinemática direta .....	67
Figura 3.31 - Figura gerada em MATLAB com a outra configuração do mecanismo possível utilizando os mesmos valores dos ângulos $\theta$ e $\beta$ .....	67
Figura 4.1 - Mecanismo paralelo em 2D .....	70
Figura 4.2 - Representação do encaixe das barras .....	71
Figura 4.3 - Mecanismo paralelo desenvolvido em 3D .....	72
Figura 4.4 - Vista explodida da zona de fixação do mecanismo.....	72
Figura 4.5 - Mecanismo paralelo com as partes de fixação nas extremidades conforme solução estudada.....	73
Figura 4.6 - Mecanismo paralelo alterado com caixa .....	74
Figura 4.7 - Modo de fixação da tampa.....	74
Figura 4.8 - Caixa para impressão.....	75
Figura 4.9 - Solução inicial impressa .....	75
Figura 4.10 - Representação das barras de acionamento escolhidas.....	76
Figura 4.11 - Representação em 2D do acionamento por correia .....	77
Figura 4.12 - Representação em 2D do acionamento por rodas dentadas .....	78
Figura 4.13 - Representação da solução de acionamento por correia e engrenagem concebido.....	80
Figura 4.14 - Transmissão de movimento através de correia .....	81

Figura 4.15 - Motor.....	81
Figura 4.16 - Correia.....	82
Figura 4.17 - Polia .....	82
Figura 4.18 - Representação do guiamento da polia e do pinhão desenvolvido em SolidWorks.....	83
Figura 4.19 - Encaixe do pinhão na polia.....	83
Figura 4.20 - Vista em corte do encaixe do pinhão na polia .....	84
Figura 4.21 - Representação da barra de acionamento de maior altura rigidamente ligada à roda dentada .....	85
Figura 4.22 - Vista explodida da barra de acionamento de menor altura rigidamente ligada à roda dentada .....	85
Figura 4.23 - Barra de acionamento de maior altura com setor dentado .....	86
Figura 4.24 – Representação da barra de acionamento de maior altura rigidamente ligada à roda dentada .....	86
Figura 4.25 - Setor dentado impresso com encaixe.....	87
Figura 4.26 - Representação das peças utilizadas como suporte do motor .....	87
Figura 4.27 - Suporte do motor impresso.....	88
Figura 4.28 - Representação da base da caixa com modificações para o acionamento e fixação.....	89
Figura 4.29 - Representação da solução que garante o esticamento necessário da correia .....	89
Figura 4.30 - Fixação do suporte do motor à base da caixa.....	90
Figura 4.31 - Base da caixa impressa .....	90
Figura 4.32 - Tampa da caixa impressa .....	91
Figura 4.33 - Representação da elevação da estrutura através de casquilhos .....	92
Figura 4.34 - Mecanismo final.....	92
Figura 5.1 - Esquema da estrutura de um microcontrolador [89] .....	96
Figura 5.2 - Diagrama ilustrativo da arquitetura implementada.....	97
Figura 5.3 - Circuito eletrônico implementado.....	98
Figura 5.4 - Circuito esquemático da placa de circuito desenvolvida (ANEXO A) ....	99
Figura 5.5 - Diagrama de pinos do microcontrolador PIC18F4553 [90].....	100
Figura 5.6 - Diagrama de pinos do microcontrolador PIC18F2431 [91].....	101
Figura 5.7 – Diagrama de pinos e de montagem do regulador de tensão MAX667 [92] .....	102

Figura 5.8 - Drive L298N com dissipador de calor.....	103
Figura 5.9 - Diagrama de pinos do drive L298N da STMicroelectronics [93] .....	103
Figura 5.10 - Sinais de PWM em modo complementar gerados com duty cycle de 50% e 75%.....	105
Figura 5.11 - Circuito lógico implementado no drive L298N [93].....	105
Figura 5.12 - Diagrama de pinos e de montagem do regulador de tensão MAX7410 [95] .....	106
Figura 5.13 - Filtragem do sinal utilizando o filtro MAX7410.....	107
Figura 5.14 - Display LCD utilizado no circuito eletrónico .....	107
Figura 5.15 - Motor CC RS-385PH .....	108
Figura 5.16 - Encoder digital incorporado no motor RS-385PH .....	109
Figura 5.17 - Programador PICkit 3 da Microchip.....	109
Figura 5.18 - Ligações entre dois microcontroladores no modo SPI [98] .....	110
Figura 5.19 - Diagrama temporal ilustrativo do funcionamento da comunicação SPI .....	111
Figura 5.20 - Diagrama de blocos representativo da comunicação SPI entre os microcontroladores PIC18F2431 .....	112
Figura 5.21 - Sinal do SCK (Channel 1) e do SDO (Channel 2) do Master .....	113
Figura 5.22 - Sinal do SCK (Channel 1) e do SDO (Channel 2) do Master, referentes a troca de dados relevantes .....	113
Figura 5.23 - Sinal do SDO (Channel 1) do Master e do SDO (Channel 2) do Slave .....	114
Figura 5.24 - Sinais utilizados no encoder de quadratura [100].....	117
Figura 5.25 - Leitura de posição utilizando o modo QEI x2 [100].....	118
Figura 5.26 - Leitura de posição utilizando o modo QEI x4 [100].....	118
Figura 5.27 - Sinal (QEA e QEB) enviado pelo encoder de quadratura .....	118
Figura 5.28 - Sistema a controlar em malha aberta.....	119
Figura 5.29 - Sistema com compensação dos atritos dos motores.....	119
Figura 5.30 - Sistema com controlo proporcional.....	120



## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Características dos diferentes sistemas de RV [11] .....	9
Tabela 2.2 - Dispositivos hápticos fixos e algumas características .....	16
Tabela 2.3 - Características do Geomagic Touch [55] .....	19
Tabela 2.4 - Diferentes versões disponíveis do Haptic Paddle e algumas características [63] .....	23
Tabela 4.1 - Características da correia e das polias adquiridas .....	82
Tabela 4.2 - Valores obtidos para as engrenagens .....	84
Tabela 5.1 - Lista de pinos utilizados do microcontrolador PIC18F4553 .....	100
Tabela 5.2 - Lista de pinos do microcontrolador PIC18F2431 .....	102
Tabela 5.3 - Lista de pinos do drive L298N .....	104
Tabela 5.4 - Características do motor RS-385PH da Mabuchi Motor [97] .....	108



## Lista de Acrónimos

CAD	Computer-Aided Design
CC (DC)	Corrente Contínua (Direct Current)
DKS	Direct Kinematic Singularities
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GL (DOF)	Graus de Liberdade (Degrees of Freedom)
GUI	Graphical User Interface
HMD	Head-Mounted Display
IKS	Inverse Kinematic Singularities
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light-Emitting Diode
LIM	Laboratório de Instrumentação para Medição
MFM	Motion Feedback Module
PCB	Printed Circuit Board
PWM	Pulse-Width Modulation
QEI	Quadrature Encoder Interface
RV	Realidade Virtual
SPI	Serial Peripheral Interface
SSP	Synchronous Serial Port
USB	Universal Serial Bus



# 1 Introdução

O presente capítulo começa por situar o tópico no âmbito das atividades do grupo em que o trabalho decorreu. Segue-se uma breve introdução, a título informativo, sobre trabalhos preliminares, são seguidamente descritos os objetivos propostos para o mesmo e, por último, é apresentada a estrutura desta dissertação.

## 1.1 Considerações Iniciais

O presente trabalho vem no seguimento de atividades de I&D&I realizadas no Laboratório de Instrumentação para Medição (LIM), do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP. Este laboratório iniciou a sua atividade no ano letivo de 1999/2000 tendo então como principal intuito o de fornecer apoio ao ensino e a atividades de I&D, centrando-se essencialmente nas medições de grandezas físicas, grandezas dimensionais, deteção de proximidade e de nível, sensorização e controlo de microposicionamento, instrumentação virtual para aquisição e controlo de dados e ainda a transmissão remota [1]. Com o decorrer dos últimos anos tem dedicado especial atenção ao apoio a trabalhos de I&D&I no âmbito do desenvolvimento de soluções de sensorização de baixo custo com comunicação *wireless*, desenvolvimento de dispositivos na área da saúde e o desenvolvimento de aplicações de realidade virtual e aumentada e respetiva interação com dispositivos hápticos. Neste contexto apoiou, por exemplo, os projetos *Experiment@Portugal* (2010-2011) e *Experiment@Portugal* 2012 (2012-13). O primeiro projeto permitiu criar o Consórcio Nacional de experimentação *online*. No segundo foi dado principal relevo ao uso de tecnologias emergentes no contexto deste Consórcio, visando o ensino secundário, superior, o ensino ao longo da vida, a indústria e ainda a disseminação numa perspetiva de criar uma diversidade de potencialidades da experimentação *online* [2].

No contexto deste segundo projeto os desenvolvimentos planeados visando o uso de tecnologias emergentes consideraram de interesse o projeto e a produção de um

protótipo de um dispositivo háptico, de apenas 1 grau de liberdade (1 GL), [3], permitindo desse modo a sua utilização em aplicações em que a atuação apenas se exerce numa direção.

O dispositivo desenvolvido apresenta uma gama de força similar a dispositivos comerciais de elevado custo e foi todo ele concebido com base em partes de material reciclado [3].

O interesse entretanto demonstrado pelo mesmo dispositivo em diferentes contextos alargaram os objetivos então existentes no grupo, inicialmente centrados na mera utilização e divulgação dos conceitos associados, cada vez mais frequentes na indústria e na medicina.

Assim e considerando que no mundo dos dispositivos hápticos, as soluções existentes no mercado apresentam um nível de complexidade bastante elevado e um custo pouco apelativo e acessível a qualquer um, importava inovar em termos de soluções económicas aumentando também o número de graus de liberdade.

Foi neste contexto que surge a necessidade de uma nova iteração do dispositivo anteriormente desenvolvido, de modo a conceber e a desenvolver um dispositivo háptico com 2 graus de liberdade (2 GL). Tal dispositivo terá aplicação em diferentes áreas para além de aplicações didáticas e de treino, tendo-se presente o interesse que pode assumir em contextos de reabilitação, na ajuda ao aperfeiçoamento da coordenação motora em todas as faixas etárias e no entretenimento.

## 1.2 Motivação

O fascínio e a necessidade pessoal em enriquecer o conhecimento a nível de sistemas elétricos e eletrónicos, nomeadamente na área de microcontroladores, foi um dos fatores decisivos para a escolha do presente trabalho que era oferecido num amplo leque de tópicos apresentados na Secção de Automação, Instrumentação e Controlo. Com efeito, a conceção e o desenvolvimento de um sistema háptico com 2 GL, em que o baixo custo associado era um dos pontos básicos, apresentava um desafio integrador de conhecimentos tocando preferências pessoais e conjugava, ainda, a oportunidade de iniciar um desenvolvimento visando uma possível utilidade para a sociedade em geral, aspeto que é muitas vezes esquecido em questões académicas.

Assim, o trabalho cumpria um conjunto de requisitos pessoais e adicionava-lhes ainda a necessidade de enfrentar desafios e a vontade de realizar um trabalho bastante completo, conjugando desde a conceção da estrutura mecânica ao projeto de mecatrónica e adicionando ainda a hipótese de futura utilidade para a sociedade.

### 1.3 Objetivos

De acordo com a motivação apresentada anteriormente e, ainda tendo em conta a solução do protótipo do dispositivo háptico de 1 GL já existente, pretende-se conceber e realizar um pré-protótipo de um novo dispositivo com 2 GL tendo em conta uma solução mecânica que otimize um funcionamento de baixa complexidade tendo em vista a condição imposta para vir a constituir um sistema de baixo custo, cobrindo a lacuna existente no mercado – disponibilização de sistemas dispendiosos de maior complexidade.

O problema colocado deve respeitar as seguintes condições:

- O dispositivo deve apresentar dois graus de liberdade com um movimento planar;
- O acionamento de cada um dos GL do dispositivo deve ser realizado através de um motor de corrente contínua (CC);
- A arquitetura de comando e controlo do dispositivo háptico deve ser baseada na utilização de microcontroladores;
- O sistema deve estar preparado para comunicar com outros tipos de dispositivos (por ex. o computador pessoal) através de uma comunicação USB;
- A estrutura cinemática do dispositivo deve permitir uma área útil de trabalho total de  $70 \times 70 \text{ mm} = 4900 \text{ mm}^2$ ;
- O *feedback* de força introduzido pela atuação dos motores deve ser capaz compensar uma força de solicitação de 20 a 25 N (valores correntes nos dispositivos comercializados);
- A realização final de um dispositivo que deverá funcionar como “prova de conceito”.

### 1.4 Estrutura da Dissertação

Após as considerações iniciais, a motivação do autor, a exposição dos principais objetivos delineados para a realização do trabalho e a apresentação da estrutura desta dissertação, segue-se uma descrição das temáticas abordadas durante o desenvolvimento do dispositivo proposto.

Assim, o capítulo 2, denominado de “Estado da Arte”, procura apresentar uma breve contextualização do tema e o levantamento realizado de soluções atualmente existentes no mercado, suas características, princípios de funcionamento e aplicações.

O capítulo 3, designado “Modelação da Cinemática do Mecanismo”, apresenta os mecanismos utilizados em estruturas que possuem dois graus de liberdade, incluindo o que vai ser adotado para a solução do problema proposto. Incide também sobre o estudo e a modelação numérica da estrutura utilizada recorrendo à implementação de modelos

de cinemática direta e cinemática inversa que levaram à estimativa da área de trabalho, análise dinâmica e determinação de singularidades, recorrendo ao *software* MATLAB.

O capítulo 4, intitulado “Projeto e Desenvolvimento da Solução Mecânica”, relata o processo de desenvolvimento e conceção da estrutura cinemática do dispositivo e, as estratégias de acionamento do mesmo.

No capítulo 5, “Projeto e Desenvolvimento do Sistema Elétrico/Eletrónico”, descreve o projeto da solução eletrónica, incluindo a escolha de componentes, a realização de circuitos eletrónicos, a implementação dos mesmos de modo a permitir uma solução de controlo dos meios de acionamento. Posteriormente, são descritos os procedimentos de programação desenvolvidos para o sistema eletrónico descrito.

Por último são evidenciadas as principais conclusões retiradas do trabalho realizado, sendo sugeridos também trabalhos futuros para a conclusão do dispositivo protótipo, impossíveis de realizar no presente em face da exiguidade temporal.

A dissertação inclui ainda as referências utilizadas, os anexos, índices de figuras e tabelas, e lista de acrónimos.

## 2 Estado da Arte

A realidade virtual oferece ambientes 3D sendo a imersão do utilizador nestes potenciada pelo recurso a dispositivos sensoriais que estimulam os sentidos. A visão, a audição e o tato são os mais habituais. Surge aqui o interesse pelos dispositivos hápticos.

Neste capítulo procura-se fazer uma descrição, ainda que breve, abrangendo essas diferentes áreas, bem como as soluções comerciais disponíveis incluindo ainda dois recursos com princípio estrutural (estrutura paralela) baseado numa filosofia próxima da solução que será proposta no contexto deste trabalho.

### 2.1 Contextualização

O estudo dos dispositivos hápticos evoluiu com os progressos da realidade virtual. A realidade virtual é uma forma de interação computador-utilizador que proporciona a simulação, em tempo real, num ambiente virtual e que pode ser explorado através de uma interação direta envolvendo múltiplos canais sensoriais. Desta forma, o utilizador para além de visualizar e manipular o objeto virtual tem ainda a possibilidade de o “tocar” e “sentir”. Sentidos tais como o olfato e o paladar têm estado também sob desenvolvimento embora a níveis muito menos adiantados [4].

O uso da tecnologia para simular fenômenos físicos provavelmente encontrou o seu primeiro uso sério na “Caixa Azul”, desenvolvida pela, agora um marco conhecido internacionalmente, ASME. O simulador de voo inventado por Edwin Link “Link Trainer” em 1928 e patenteado em 1931, foi usado para treinar milhares de aviadores antes e durante a II Guerra Mundial, o que permitiu a economia de milhões de dólares e vidas [5].

Cerca de 30 anos mais tarde, a realidade virtual teve como principal pioneiro o filósofo, inventor e cinematografa Morton L. Heilig. Apelidado de “Pai da realidade

virtual”, em 1962 apresentou o simulador Sensorama (Figura 2.1), consistindo numa máquina que possui vídeo 3D com *feedback* de som estéreo e aromas, disponibilizando um banco vibratório e efeitos de vento (obtidos com pequenos ventiladores perto da cabeça do utilizador), sendo assim capaz de fornecer a ilusão de realidade [6].



*Figura 2.1 - Simulador Sensorama [6]*

Heilig projetou ainda um dispositivo de montagem na cabeça, para estimular os sentidos de um indivíduo, de modo a criar a sua imersão numa experiência de um modo tão real quanto possível. Este incluía a visualização de slides 3D com elevados efeitos periféricos, som estereofónico e capacidade de incluir cheiro. Em 1966, Ivan Sutherland, continuou este projeto e desenvolveu o *head-mounted display* (HMD) que consiste então num dispositivo de vídeo com auriculares colocado na cabeça e que serve como interface entre o utilizador e o ambiente de realidade virtual. O HMD sofreu algumas alterações ao longo dos anos. A Figura 2.2 apresenta, a título de exemplo, uma versão de 2008.



*Figura 2.2 - Head-Mounted Display [7]*

A implementação deste tipo de dispositivos bem como dispositivos que permitissem ao utilizador sentir os objetos virtuais que visualizavam, despertou rapidamente a atenção de vários setores nomeadamente, o militar.

Os simuladores de voo que existiam para treino militar eram extremamente dispendiosos e o seu *hardware* estava configurado para um determinado modelo de avião. Deste modo, quando um novo modelo de avião surgia o simulador ficava desatualizado, o que implicava obviamente uma constante mudança de *hardware* e portanto custos associados.

A possibilidade de utilizar uma plataforma comum a todos os modelos sendo apenas necessário a atualização de aplicações informáticas veio permitir vantagens inquestionáveis. A NASA (National Aeronautics and Space Agency) esteve desde sempre muito envolvida neste tipo de simuladores por ser essencial recriar as condições existentes em outros espaços e em planetas distantes para treino dos seus astronautas. Seria assim possível substituir um ambiente real por um ambiente virtual evitando a replicação na vida real de ambientes extremamente dispendiosos e de elevada manutenção. Tendo sido o treino de voo o embrião de todos os desenvolvimentos anteriores, a evolução destes sistemas veio permitir abranger uma vasta gama de aplicações designadamente na tripulação de veículos (aeronaves, navios,...), na indústria (ações de manutenção em petrolíferas, montagem, soldadura e pintura em spray,...), no treino de procedimentos médicos (em cirurgia, no diagnóstico, em simples atos médicos,...), etc. [4, 8]. Na Figura 2.3 está representado um simulador de voo bastante utilizado atualmente, na Força Aérea dos Estados Unidos.

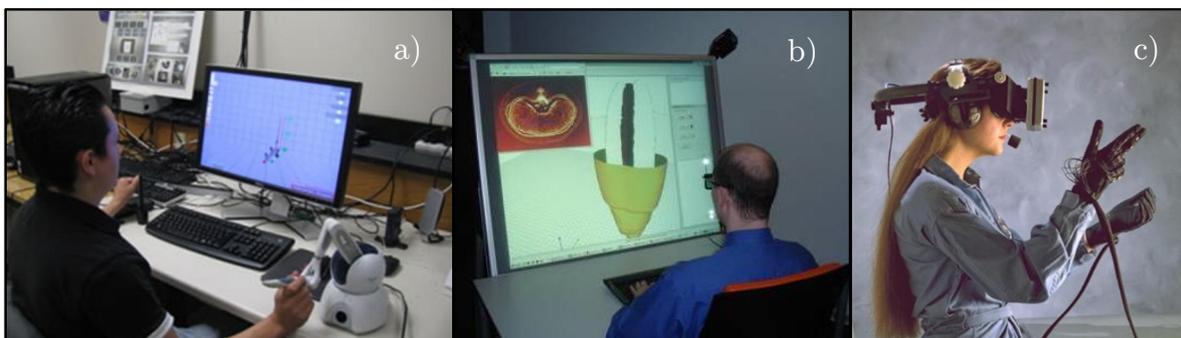


*Figura 2.3 – Exemplo de um simulador de voo utilizado atualmente na Força Aérea dos Estados Unidos [9]*

A realidade virtual pode ser classificada em função da participação do utilizador como totalmente imersiva, semi-imersiva ou não imersiva. A imersão ou “grau de presença” é normalmente influenciada por diversos parâmetros tais como o nível de interatividade, a complexidade da imagem, a vista estereoscópica, o campo de observação e o nível de atualização do ecrã. Classifica-se como não imersiva quando o

utilizador é transportado parcialmente para o mundo virtual, através de uma janela (monitor ou projeção, por exemplo) e a interação ocorre através de meios convencionais como o teclado, o rato, e que pode ser melhorada através de dispositivos de interação 3D, embora o utilizador continue a sentir-se predominantemente no mundo real. Os sistemas de projeção semi-imersivos provocam uma maior sensação de presença comparativamente com os sistemas não-imersivos sendo que abordam tecnologias desenvolvidas nos simuladores de voo e caracterizam-se por a inclusão de um sistema computacional com capacidades de boa qualidade gráfica utilizando um monitor ou projeção em tela, ou sistemas de projeção múltiplos. Nestes sistemas são utilizados óculos LCS (Liquid Crystal Shutter) incorporando um auricular e lentes de cristal líquido para cada olho de modo a criar no utilizador a sensação de profundidade. A realidade virtual imersiva consiste na inclusão de uma sensação de presença dentro do mundo virtual, ou seja, levar o utilizador a sentir-se dentro de um ambiente virtual e poder interagir com os seus elementos através de dispositivos multissensoriais (simuladores de voo, capacetes, luvas de dados, HMD, etc.), que capturam os movimentos e comportamentos e reagem a estes [10, 11].

Na Figura 2.4 é possível perceber as principais diferenças entre os dois tipos de realidade virtual.



*Figura 2.4 - Representação das principais diferenças entre a RV não imersiva, semi-imersiva e totalmente imersiva: a) RV não imersiva [12]; b)RV semi-imersiva [13]; c)RV totalmente imersiva [14]*

Embora a realidade virtual imersiva apresente aplicações mais realistas e mais precisas, principalmente na indústria, a realidade virtual dita não imersiva é mais utilizada devido à não exigência de requisitos gráficos complexos, de *hardware* especial e de tecnologia de elevado nível, sendo portanto caracterizada por uma maior simplicidade e menor custo. Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas características permitindo a comparação das características mais relevantes para os diferentes sistemas.

Tabela 2.1 - Características dos diferentes sistemas de RV [11]

	Não imersiva	Semi-Imersiva	Totalmente Imersiva
<b>Resolução</b>	Alta	Alta	Baixa - Média
<b>Escala (percepção)</b>	Baixa	Média - Alta	Alta
<b>Consciência da situação</b>	Baixa	Média	Alta
<b>Campo de observação</b>	Baixo	Médio	Alto
<b>Atraso</b>	Baixo	Baixo	Médio - Alto
<b>Sensação de imersão</b>	Nenhuma - Baixa	Média - Alta	Média - Alta

É imenso o potencial de aplicações da RV, estando hoje presentes em qualquer área como por exemplo, na indústria, na medicina, na investigação, em arte, no ensino e treino e, no entretenimento.

Nas aplicações industriais, as aplicações de RV vão muito para além da visualização 3D de um objeto usando um simples programa de CAD. Elas permitem inspecionar em tempo real e com um elevado grau de interação, o objeto em análise. São exemplos relevantes e complexos os desenvolvidos para a indústria petrolífera como já referido, a análise de reatores de avião (e muitas outras aplicações usando CAVE – Computer Assisted Virtual Environment) ou salas de treino de voo de grandes companhias aéreas, de que é exemplo a *Lufthansa Flying Training Center* [15].

A monitorização de pacientes assim como o processamento de imagens tomográficas tridimensionais foi possível devido à enorme evolução tecnológica no desenvolvimento de equipamentos e sua interface com computadores. Porém, a RV elevou a fasquia, possibilitando, por exemplo, a simulação de uma cirurgia em corpos virtuais, tratamento de pessoas com deficiência, fisioterapia virtual, etc.

A área científica tem a possibilidade de utilizar a RV para mostrar conceitos abstratos, visualizar superfícies planetárias, analisar o comportamento de estruturas atômicas e moleculares, etc.

Pinturas em relevo, museus virtuais com detalhes nas paredes e tetos, música com instrumentos virtuais, são algumas das aplicações possíveis no mundo das artes.

O ensino pode explorar, por exemplo, o uso de laboratórios e bibliotecas virtuais [16], e encontros remotos de alunos e professores para terem uma aula ou realizarem atividades coletivas.

Um campo que ilustra a grande diversidade e desenvolvimento de aplicações da RV é o entretenimento, nomeadamente, videojogos 3D com interação em tempo real, simuladores, turismo e cinema 3D [10].

## 2.2 Dispositivos Hápticos

O indiscutível recurso à realidade virtual pode ser potenciado pela integração de dispositivos sensoriais que podem oferecer uma interação entre o utilizador e o computador tirando o máximo proveito das capacidades que este possui e conferir ao utilizador uma importante sensação adicional de imersão. Naturalmente a noção “eu sinto” é um componente que pode originar conhecimento memorável [17, 18].

Um dos tipos de interação é realizado através de um canal de comunicação bidirecional que permite ao utilizador ter a perceção de forças, vibrações e toque, e diga-se dispositivo háptico.

### 2.2.1 Definição

O termo háptico tem origem na palavra grega *haptikos*, e refere-se ao sentido do tato ou tátil. A experiência háptica é baseada nos sentidos táteis, e proporciona uma sensibilização aos estímulos na superfície do corpo dos sentidos cinestésicos que fornecem informação sobre a postura do corpo e o seu movimento [19]. Numa interface háptica é necessário existir *feedback*, isto é, o utilizador deve sentir uma resposta ao interagir com um objeto virtual e este *feedback* pode ser tátil, por exemplo força. O *feedback* tátil é um termo referente às sensações sentidas pela pele que permitem aos utilizadores sentir a textura de superfícies, temperatura e vibrações. Os estímulos sentidos pela pele podem ser provocados por diversas maneiras, variando desde jatos de ar a atuadores elétricos que produzem vibração. O *feedback* de força representa uma oposição em força a um movimento realizado. Forças direcionais podem resultar da delimitação de sólidos, do peso do objeto virtual, da inércia, do atrito, da gravidade ou da força de reação [20].

Os dispositivos hápticos, ou dispositivos de reação tátil, podem ser considerados sistemas eletromecânicos que apresentam *feedback tátil* e/ou de força e permitem realizar ações de manipulação em ambiente de realidade virtual. Na Figura 2.5 é apresentado um esquema do funcionamento destes tipos de dispositivos.

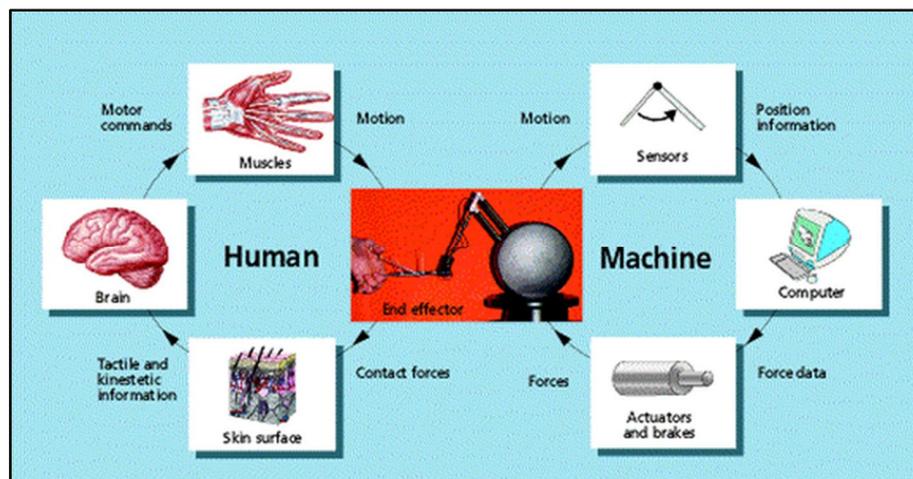


Figura 2.5 - Interação entre utilizador, dispositivo háptico e computador [21]

Quando um utilizador movimenta o ponto terminal, punho ou manípulo num dispositivo, o sinal de saída do transdutor de posição integrado – por exemplo um *encoder* – é transmitido para um controlador de interface a taxas muito elevadas. A informação é processada para determinar a posição do ponto terminal. A posição é então enviada para o computador em que corre uma aplicação informática de suporte incluindo o modelo do sistema virtual. Se a aplicação determina que uma força de reação é necessária, o computador envia a informação do *feedback* de força a realizar para o controlador do dispositivo. Os motores inseridos no dispositivo aplicam assim estas forças como resultado dos modelos matemáticos que simulam as sensações desejadas. Por exemplo, quando se simula o embate numa parede rígida, usando um *joystick* com *feedback* de força, os motores que o integram aplicam forças que simulam este embate. Enquanto o utilizador move o *joystick* para penetrar a parede, os motores aplicam forças que resistem à penetração. Quanto maior a penetração na parede mais os motores forçam o *joystick* de forma a “voltar” à superfície da mesma. O resultado final é assim a sensação de embater num obstáculo com uma determinada rigidez regulável.

Por outro lado, tendo em consideração a parte humana, sucede que quando o utilizador impõe um movimento no dispositivo háptico a sua mão sente uma resposta em força induzida pelo dispositivo e envia essa informação ao cérebro, que por sua vez responde com uma reação em forma de movimento.

Dispositivos bastante conhecidos tais como o teclado, o rato, e a *trackball* representam interfaces hápticas passivas que detetam o movimento da mão do utilizador. As interfaces hápticas ativas, como os robôs de mesa e luvas exosqueletos com *feedback* de força, são dispositivos mais sofisticados que contêm sensores e atuadores e que para além de possuírem a deteção de movimento, apresentam forças controladas, permitindo ao utilizador sentir e controlar os objetos virtuais [22].

## 2.2.2 Dispositivos Hápticos na Reabilitação

A maioria das interfaces hápticas são desenvolvidas para pessoas fisicamente capazes, porém o uso desta tecnologia começa a ter cada vez mais preponderância na área da reabilitação física. Existem milhões de pessoas com incapacidade física: sobreviventes a um Acidente Vascular Cerebral (AVC), pessoas com traumatismos crânio-encefálico, paralisia cerebral, lesões na espinal medula, entre outros. Como tal, todos os anos os sistemas sociais gastam elevados recursos na reabilitação física, algo que se agravará com o envelhecimento da população mundial, tão crítico já na Europa e nos Estados Unidos [23].

Foi diagnosticado que a aprendizagem implícita apresenta melhores resultados do que a explícita. A aprendizagem implícita refere-se à aquisição de habilidades sem um nível de consciência objetivo, podendo ser implementada num dispositivo de reabilitação. O treino do movimento do braço numa trajetória específica exigindo ao paciente um movimento ao longo de um labirinto virtual através de um *joystick* é um exemplo de uma aprendizagem implícita. Também tem sido sugerido que, uma amplificação propositada dos erros de movimento cometidos pelos pacientes, durante o treino, conduzem a um maior ganho na reabilitação do que a estratégia de assistir o paciente na direção certa [24].

A ciência da reabilitação comprovou recentemente que uma terapia física mais intensa e de longa duração beneficia mais os pacientes, até pacientes crónicos, através do fenómeno da “plasticidade cerebral”. É assim perceptível as principais vantagens da utilização de robôs complementarmente à ação dos terapeutas humanos, na medida em que os sistemas robotizados podem assistir os pacientes sem restrições de tempo e de cansaço numa perspetiva de maior eficácia a custos mais reduzidos. Para além disso, os sistemas robóticos ligados a uma simulação em RV apresentam melhorias em relação aos métodos de terapia física convencional. Os dados sobre o tempo total de exercício, a velocidade e suavidade do pico de movimento, a velocidade média, o trabalho mecânico e a resistência, estão entre as variáveis que permitem medir objetivamente o progresso do paciente e até podem ser usadas para incentivar o próprio paciente [23].

Outra vantagem da utilização de interfaces hápticas passa pela possível implementação da telereabilitação, que consiste na reabilitação supervisionada remotamente por um terapeuta não exigindo ao paciente sair de casa e mais uma vez reduzindo todos os custos adicionais [25]. Através de um sistema, (Figura 2.6) disponibilizado *online* e utilizando um dispositivo háptico comercial, o *Curictus Virtual Rehabilitation System*, o paciente pode exercitar livremente, no seu ambiente familiar, monitorizado por um especialista.



*Figura 2.6 – Curictus: Sistema de reabilitação virtual [26]*

Para além de ser um enorme progresso na reabilitação de pessoas com incapacidade física, os dispositivos hápticos podem também ser usados por pessoas que necessitem melhorar a coordenação motora, por deficiências específicas, como um incentivo de capacidades motoras em processos de demência, etc. Podem ainda ser utilizados por pessoas fisicamente capazes que pretendam melhorar a sua capacidade, nomeadamente coordenação, e o seu desempenho de tarefas em RV ou aplicações telerobóticas. A capacidade de desempenho de funções como teleoperação pode ainda usufruir das vantagens oferecidas pelos dispositivos hápticos.

### **2.2.3 Tipos de Dispositivos Hápticos**

As interfaces hápticas podem ser divididas em dois grupos distintos:

- Móveis (*body-based*);
- Fixas (*ground-based*).

Os dispositivos móveis ajustam-se e movem-se em concordância com os membros ou dedos do utilizador. São cinematicamente semelhantes aos braços e mãos que eles monitorizam e estimulam e, portanto, têm a vantagem de possuir uma maior amplitude para um movimento sem restrições por parte do utilizador. Se forem utilizados como sistemas de medição de posição (luvas, fatos, etc.), estes dispositivos são relativamente baratos e confortáveis. A *CyberGlove*, presente na Figura 2.7, é um exemplo destes tipos de dispositivos.



Figura 2.7 – *CyberGlove*, dispositivo móvel [22]

A *CyberGlove* consiste numa luva sensorizada capaz de monitorizar o movimento de flexão/extensão de cada uma das articulações de cada dedo, bem como os movimentos de adução/abdução. Para isso, esta luva apresenta um conjunto de 22 sensores piezoresistivos e uma comunicação sem fios com um recetor.

Dispositivos móveis com exosqueletos rígidos (juntas articuladas fixas ao utilizador) possuem *feedback* de força, uma sensorização um pouco mais precisa e naturalmente um preço mais elevado [22]. A *CyberGrasp*, Figura 2.8, representa um dispositivo háptico móvel.



Figura 2.8 – *CyberGrasp*, dispositivo háptico móvel [27]

A *CyberGrasp* é um sistema com *feedback* de força que encaixa na luva de dados, a *CyberGlove*, introduzindo uma resposta em força através de cinco atuadores, um em cada dedo. Com este sistema o utilizador pode sentir a forma e tamanho de objetos 3D num ambiente virtual.

Os dispositivos hápticos considerados fixos são os mais comuns no mercado e evidenciam-se por uma ligação física a uma base estável, estando presentes nesta base os componentes responsáveis pelo envio de resposta em força ao utilizador. Os *joysticks* com *feedback* de força (Figura 2.9), ratos com *feedback* de força, volantes com *feedback*

de força e em geral os dispositivos hápticos que estejam articulados a uma base são exemplos de dispositivos fixos.



*Figura 2.9 - Dispositivo háptico fixo: Joystick com feedback de força [28]*

Tendo em consideração o facto de o dispositivo a desenvolver se inserir no grupo dos de tipo háptico fixos, será dada uma maior ênfase a este tipo de dispositivos.

Na Tabela 2.2, apresenta-se uma lista com alguns exemplos de dispositivos hápticos fixos desenvolvidos e existentes no mercado, fazendo referência aos graus de liberdade, gama de força e custo sempre que exista essa informação.

*Tabela 2.2 - Dispositivos hápticos fixos e algumas características*

Nome do Dispositivo	Graus de Liberdade	Gama de Força	Custo
<b>1 DOF haptic device built with parts of recycled material [3]</b>	1	25 N	–
<i>Hapkit [29]</i>	1	5 N	\$50 (36,78€) <sup>1</sup>
<i>The Pantograph [30]</i>	2	10 N	–
<i>Novint Falcon [31]</i>	3	Aprox. 9 N	\$249,95 (183,86€)
<i>Omega 3 [32]</i>	3	12 N	CHF 21.700 (17975€)
<i>Delta 3 [33]</i>	3	20 N	CHF 33.000 (27.336€)
<i>The HapticMaster [34]</i>	3	250 N	–
<i>Quanser 5 DOF Haptic Wand [35]</i>	5	7 - 9 N	–
<i>Geomagic Touch [36]</i>	6	3.3 N	2.000€
<i>Phantom Premium [37, 38]</i>	6	8.5 - 37.5 N	30.000€
<i>Haption Virtuose 3D Desktop [39]</i>	6	10 N	18.500€
<i>Haption Virtuose 6D [40]</i>	6	35 N	85.000€
<i>Omega 6 [41]</i>	6	12 N	CHF 27.800 (23.028€)
<i>Delta 6 [42]</i>	6	20 N	CHF 59.900 (49.619€)
<i>The Freedom 6S [43]</i>	6	2.5 N	\$54.400 (41.451€)
<i>Omega 7 [44]</i>	7	12 N	CHF 34.900 (28.910€)
<i>Sigma 7 [45]</i>	7	20 N	CHF 79.300 (65.689€)

<sup>1</sup> O preço não é realista pois tem em consideração motores que custaram \$8 (5.89€) à equipa de desenvolvimento sendo que comprados diretamente na loja custam \$150 (110.35€).

Os dispositivos hápticos apresentam diversas tecnologias e configurações, sendo agora eleitos alguns dispositivos desenvolvidos assim como alguns existentes no mercado por forma a estudá-los e realizar uma descrição mais detalhada dos mesmos.

#### 2.2.4 *Geomagic Touch*

O *Geomagic Touch*, conhecido também por *Phantom OMNI* e comercializado pela Sensable, foi adquirido em 2012 pela empresa Geomagic. É um dos dispositivos hápticos profissionais, de gama baixa, com maior implantação na indústria e com melhor relação custo-qualidade. Este dispositivo háptico existe também no LIM e é apresentado na Figura 2.10 [36].



*Figura 2.10 - Geomagic Touch, dispositivo háptico com feedback de força disponível no LIM*

A sua conceção inicial tinha como objetivo permitir a manipulação 3D de objetos virtuais mas como apresenta vários graus de liberdade pode ser implementado em inúmeras áreas de aplicação entre as quais se destaca o entretenimento, a teleoperação, a investigação e desenvolvimento, o treino e ensino e ainda aplicações médicas a nível do diagnóstico e reabilitação [36, 46]. Na Figura 2.11 é possível visualizar algumas das aplicações mencionadas.

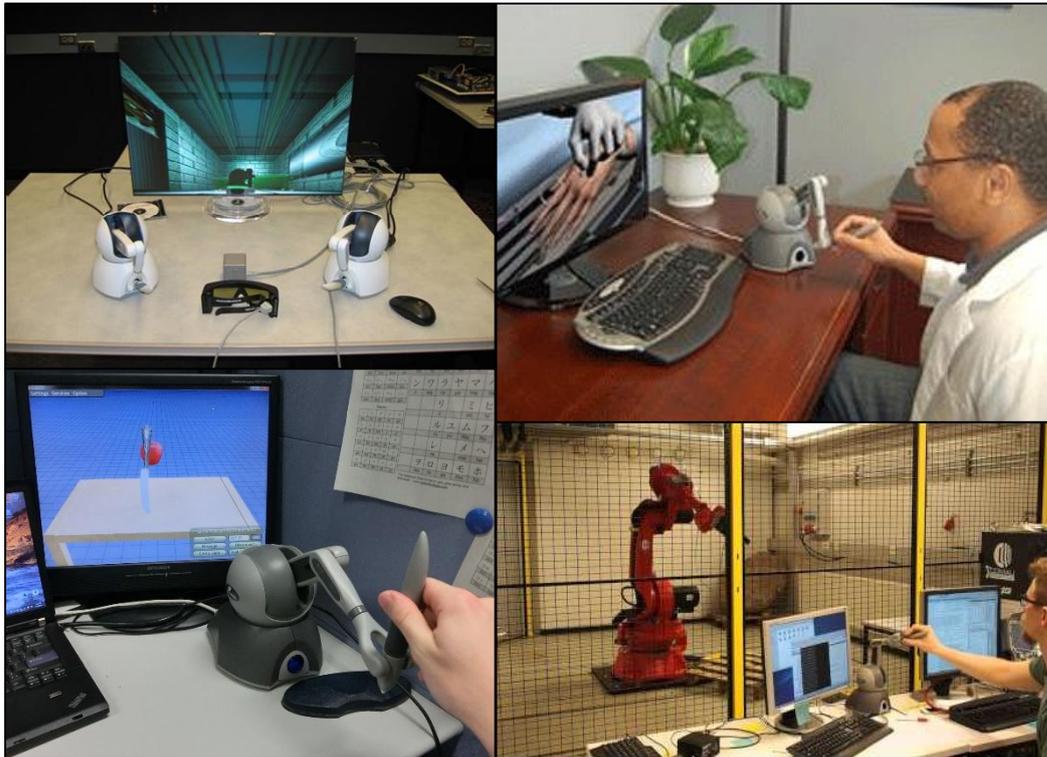


Figura 2.11 - Áreas de aplicação do Geomagic Touch [36, 47-49]

Este dispositivo háptico apresenta seis graus de liberdade, sendo que apenas três possuem *feedback* de força. A Figura 2.12 representa os graus de liberdade existentes no dispositivo.

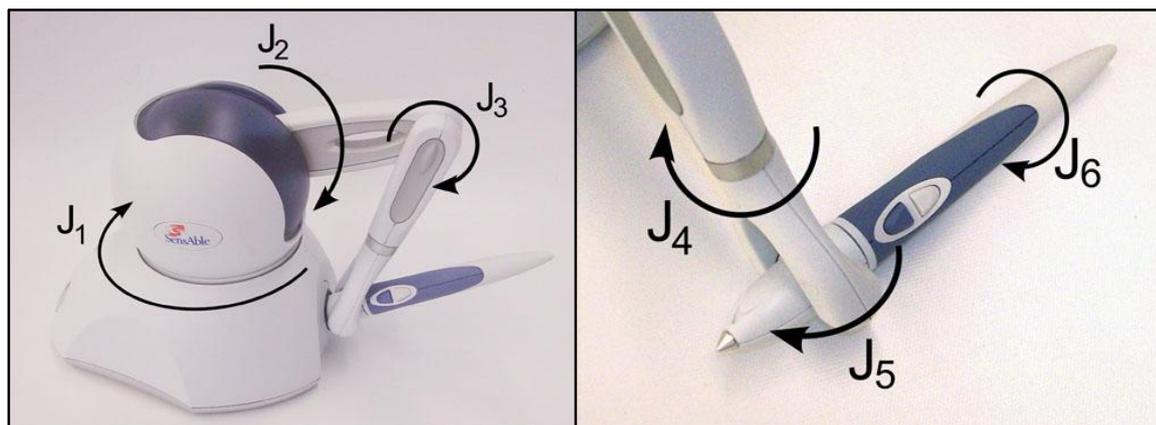


Figura 2.12 - Representação dos graus de liberdade do Geomagic Touch [50]

As três primeiras juntas mais próximas da base do dispositivo háptico ( $J_1$ ,  $J_2$  e  $J_3$ ) são controladas cada uma por um motor permitindo assim um controlo da força e da posição do ponto terminal num espaço cartesiano [51]. Os *encoders* digitais existentes nos motores permitem medir a posição das três juntas mencionadas. A transmissão dos binários dos motores é efetuada por intermédio de cabos metálicos pré-tensionados para uma articulação em alumínio que lhe confere a leveza e a dureza

adequada à função. O binário fornecido pelo motor é amplificado devido ao enrolamento do cabo ao longo de um segmento de disco [52]. Em relação às restantes juntas a medição da sua posição é realizada através de potenciómetros e serve para conhecer a orientação do ponto terminal, neste caso correspondente a um ponto na junta  $J_5$  [50]. Como os três eixos de rotação passivos do cardan coincidem num ponto, não existe binário sobre esse ponto, apenas força. Como tal, permite que a mão do utilizador assuma qualquer posição confortável. Como o utilizador pode ser representado por um único ponto, as forças de interação resultantes e colisões que ocorrem no ambiente virtual podem ser facilmente calculadas [53].

O sistema eletrónico que controla os motores recebe comandos do computador através de uma porta paralela. Este sistema eletrónico é constituído por uma carta de conversão Digital/Analógico e Analógico/Digital, amplificadores de potência para os motores, condicionamento de sinal para os sensores de posição e um LED indicador de estado [54].

Na Tabela 2.3 apresentam-se algumas características do *Geomagic Touch*.

*Tabela 2.3 - Características do Geomagic Touch [55]*

Graus de Liberdade	6
Espaço de Trabalho Disponível	160 × 120 × 70 mm
Amplitude de Movimento	Movimento da mão rodando o pulso
Resolução	Aprox. 0.055 mm
Força Máxima Disponível	3.3 N
<i>Feedback</i> de Força	x, y, z
Sensorização da Posição	x, y, z ( <i>encoders</i> digitais)
[ <i>cardan</i> ]	[ <i>Pitch, roll, yaw</i> (potenciómetros com uma linearidade de ±5%)]
Interface	IEEE-1394 <i>Fire Wire</i> port: 6-pin to 6-pin

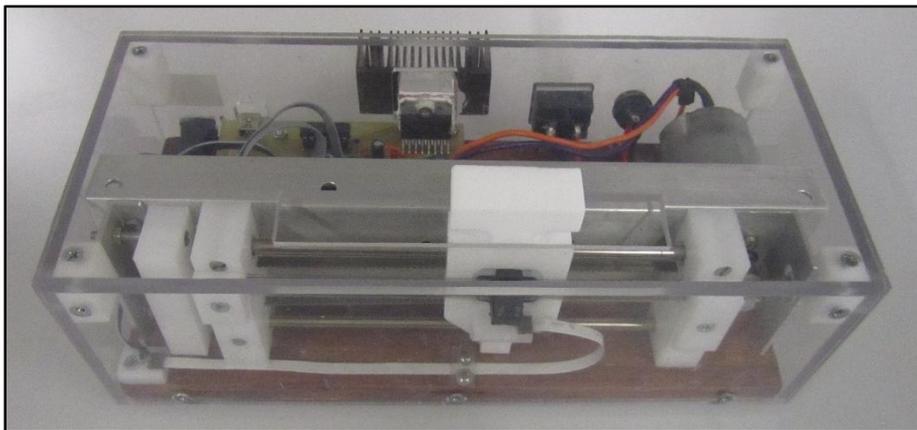
### 2.2.5 1 DOF Haptic Device Built with Parts of Recycled Material

Transitando da esfera dos dispositivos comerciais para dispositivos dedicados, um dos referidos com pormenor no que se refere à solução recebeu a designação de “1 DOF Haptic” [18], e foi desenvolvido no LIM. De facto, não só o presente trabalho é uma

natural evolução deste dispositivo, mas também este foi base de estudo para compreensão das funcionalidades básicas que caracterizam estes dispositivos.

Neste caso era um requisito fundamental a reutilização de material obsoleto e procurar uma solução que permitisse oferecer um kit para ser disponibilizado via *web*, numa ótica de “do-it-yourself”. Esta evolução foi seguida de imediato pelo desenvolvimento de diferentes aplicações que se encontram também já disponibilizadas na *web* em [http://onlinelab.fe.up.pt/vr\\_exp.html](http://onlinelab.fe.up.pt/vr_exp.html). Este contexto de reutilização de material obsoleto está claramente associado, também, com a solução de baixo custo. Cumpriria este dispositivo a função de ser utilizado para ambientes de educação, quer no ensino superior quer a nível das quatro áreas disciplinares que constitui as STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics), mas também para divulgação do conceito.

Este dispositivo começou por ter uma primeira aplicação designada por “Spring Constant” que simula a reação de uma mola helicoidal virtual quando submetida a uma ação de compressão. A aplicação de um deslocamento no manípulo do dispositivo háptico corresponderá a uma compressão da mola. A aplicação informática desenvolvida oferece também a possibilidade de alterar as propriedades da mola e observar simultaneamente, no ecrã do computador, o resultado das alterações introduzidas complementando por “senti-la” através da resposta no dispositivo. Outras aplicações que necessitam de apenas 1 GL foram desenvolvidas e, muitas outras o podem ser tendo em conta que podem fazer uso de uma variação linear de uma força de 25 N, num curso de 50 mm. Na Figura 2.13, é apresentado o dispositivo háptico com 1 GL.



*Figura 2.13 - Dispositivo háptico com um grau de liberdade construído com partes de material reciclado disponível no LIM*

O manípulo movimenta-se numa única direção – 1 grau de liberdade linear – e encontra-se fixo a uma correia que é tracionada por um motor CC de íman permanente. A correia é acionada por uma polia fixa ao veio do motor, sendo tensionada por uma outra polia que se encontra montada numa estrutura em chapa deslizante. Essa

estrutura é ajustada manualmente através de dois parafusos. O *encoder* linear, existente ao longo do curso disponível, permite obter a leitura da posição absoluta do manípulo e ainda a resposta em força do dispositivo, perante as diferentes configurações paramétricas dos modelos previamente selecionadas na aplicação informática.

A eletrónica de comando e potência encontra-se alojada no próprio dispositivo háptico. O dispositivo háptico é controlado por um microcontrolador PIC18F4431, que comunica via SPI (*serial peripheral interface*), em *fullduplex*, com um microcontrolador PIC18F2550. Este último microcontrolador é responsável pela comunicação entre o dispositivo háptico e o computador através de uma conexão USB 2.0.

Foram implementadas, na programação do microcontrolador que controla o dispositivo háptico, três zonas distintas no movimento do manípulo:

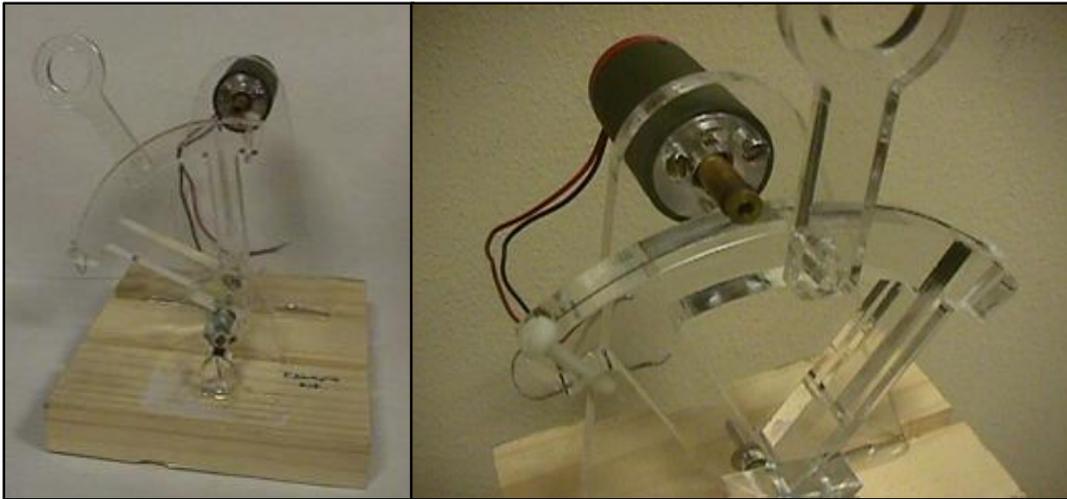
- Zona Livre – o manípulo é estimulado de forma a contrariar a força de atrito associada aos diferentes componentes que constituem a cadeia cinemática do dispositivo;
- Zona de resposta háptica – o dispositivo é ativado dando resposta à informação veiculada pela aplicação informática;
- Zona Parede – o manípulo é “impedido” de se deslocar no restante percurso disponível até ao batente físico: por aplicação da força máxima do sistema.

A aplicação existente no computador pessoal e que permite configurar os vários parâmetros da mola foi desenvolvida em *VisualStudio* da *Microchip*.

Como já foi mencionado este dispositivo será brevemente disponibilizado via *web* oferecendo todos os detalhes de construção mecânica e projeto eletrónico.

### **2.2.6 Hapkit**

Nos meados dos anos 90, o professor Mark Cutkosky desenvolveu um dispositivo háptico com feedback de força denominado *Haptic Paddle* (Figura 2.14). Esta interface háptica foi concebida para ser utilizada no ensino concedendo, aos alunos, a oportunidade de procederem à sua montagem, modelação, ligação a um computador, e utilização, para interagir e aprender noções no âmbito de sistemas dinâmicos e, nomeadamente, adquirir a noção de sistema háptico. O utilizador tem a possibilidade de presenciar e “sentir” fenómenos como a inércia, a fricção e os efeitos de alterações que podem ser introduzidas nos parâmetros do sistema de controlo [56].



*Figura 2.14 - Versão inicial do Haptic Paddle desenvolvido na Universidade de Stanford [57]*

O mecanismo do *Haptic Paddle* possui um grau de liberdade. Este GL é materializado pela rotação efetuada pelo setor em relação a um ponto pivô central comportando-se como um pêndulo. A transmissão do movimento é efetuada pelo *Capstan Drive*, isto é uma transmissão realizada recorrendo a um conjunto de polias interligadas por cabo proporcionando desta forma uma razão de transmissão bem definida. Em particular e no caso deste háptico, o cabo encontra-se enrolado numa polia solidária ao veio do motor e as suas extremidades são fixas por intermédio de dois parafusos de *nylon*, alojadas nos extremos do setor. O facto de o cabo ser enrolado várias vezes à volta da polia permite um contacto de elevado atrito e sem escorregamento. Este tipo de transmissão minimiza as forças de fricção sentidas pelo utilizador porque evita forças de translação no motor e nos eixos das juntas. De salientar que o setor possui um rasgo para compensar a tensão no cabo [56, 58].

Devido ao seu bom funcionamento sendo bastante requisitado ao nível do ensino e da investigação, foram desenvolvidos inúmeras versões deste dispositivo háptico. Na Tabela 2.4, são apresentadas algumas dessas versões realizadas por diferentes universidades o que mostra o interesse deste tópico numa perspetiva que também o LIM tem procurado seguir, abandonando a ideia de utilização de dispositivos hápticos de elevado custo tal como nas diferentes iniciativas desde os primeiros trabalhos em 2007, [59-62].

Tabela 2.4 - Diferentes versões disponíveis do *Haptic Paddle* e algumas características [63]

Universidade	Ano	Tipo de atuador	Tipo de transmissão	Preço
<b>Stanford</b>	1997	Motor CC	<i>Capstan</i>	\$30 (22.05€)
<b>Univ. of Michigan iTouch</b>	2003	Motor CC sem núcleo <sup>2</sup>	Direta (não utiliza transmissão amplificadora de binário)	\$20 (14.70€)
<b>Univ. of Michigan The Box</b>	2003	Motor CC	Engrenagem/cabo	\$600 (440.91€)
<b>Rice Univ. Capstan Drive</b>	2006	Motor CC	<i>Capstan</i>	\$50 (36.78€)
<b>Johns Hopkins</b>	2007	Motor CC	<i>Capstan</i>	\$30 (22.05€)
<b>Vanderbilt</b>	2009	Motor CC	Fricção	\$200 (146.97€)
<b>Univ. of Utah</b>	2009	Motor CC	<i>Capstan</i>	\$650 (477.66€)
<b>ETHZ</b>	2012	Motor CC	<i>Capstan</i>	\$350 (257.20€)
<b>Rice Univ. Friction Drive</b>	2012	Motor CC	Fricção	\$50 (36.78€)
<b>Stanford</b>	2013	Motor CC	<i>Fricção</i>	\$50 (36.78€)

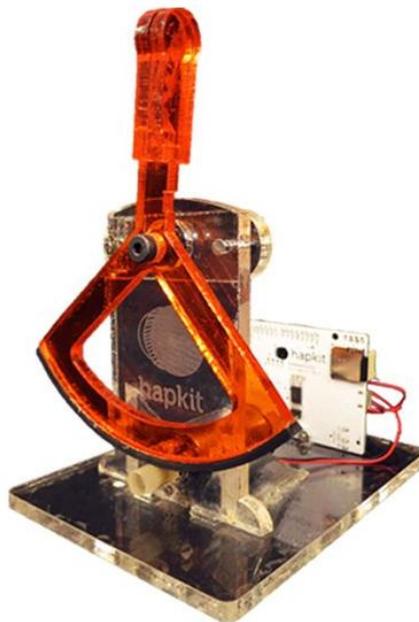
De salientar que dentro dos dispositivos mencionados aqueles que apresentam menor custo, como o *iTouch* e o *Hapkit*, possuem uma gama de força que vai desde os 2.5 N aos 10 N. Dispositivos hápticos como o desenvolvido na universidade de Utah, produzem forças de 47 N e já apresentam um preço bastante superior [56, 64, 65].

Apesar de algumas modificações realizadas em cada versão, os *Haptic Paddles* possuem determinadas características em comum:

<sup>2</sup> O motor utilizado foi montado pela equipa de desenvolvimento, utilizando uma bobina feita por eles, de maneira a reduzir o custo do motor pois trata-se de um motor sem núcleo.

- 1 GL, que permite manter um custo reduzido comparativamente com os hápticos comerciais com, pelo menos, 3 GL;
- *Feedback* de força, considerando que os utilizadores aplicam um determinado movimento e sentem uma oposição em força;
- Motores CC para gerar binário;
- Um manípulo do tipo *joystick*;
- Utilização de um amplificador eletrónico de potência dedicado e um computador onde corre uma aplicação informática que realiza o seu controlo. Os primeiros *Haptic Paddles* utilizavam uma carta de aquisição de dados ou uma porta paralela, para comunicar com o computador, mas os mais recentes já têm optado por utilizar sistemas *Arduino*.

A versão mais recente do *Haptic Paddle* é o *Hapkit* (Figura 2.15), e é disponibilizada pela Universidade de *Stanford*.



*Figura 2.15 - Dispositivo háptico com um grau de liberdade: Hapkit [66]*

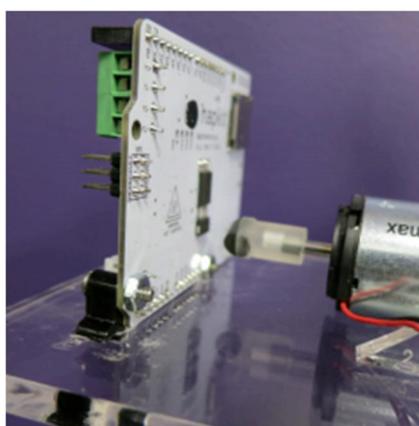
O *Hapkit* é um dispositivo háptico muito económico, comparativamente com outros dispositivos existentes e com um funcionamento de fácil compreensão. Existe disponível *online* um guia de montagem que permite construí-lo em casa, desde que obtidas as peças necessárias. Os componentes mecânicos do *Hapkit* são de acrílico e a sua forma foi obtida através de uma máquina de corte por laser. Comparativamente com a versão anterior - o *Haptic Paddle* -, este dispositivo baseia-se no pêndulo invertido. A transmissão é realizada por fricção (Figura 2.16), isto é, existe uma fita de neopreno colada ao setor e que entra em contato com uma roda motriz alojada no veio do motor, exigindo que o setor rode apenas quando o veio do motor também roda.



*Figura 2.16 - Transmissão por fricção no Hapkit [67]*

Tendo em conta que na transmissão por *Capstan* o cabo pode desenrolar e desacoplar aquando usado em sistemas dinâmicos instáveis, a transmissão por fricção torna-se mais robusta evitando perdas de tempo a reparar o dispositivo. Porém, é de salientar que perante configurações instáveis, na transmissão por fricção existe a possibilidade de o setor rodar para fora da sua zona de trabalho, desacoplando o eixo do motor da fita de neopreno [63].

Em relação à leitura de posição, considerando que a maioria das versões do *Haptic Paddle* utiliza sensores de efeito de *Hall*, é de salientar que no *Hapkit* esta é efetuada através de um sensor magnetoresistivo (MR) que se encontra alojado num PCB, na parte traseira do dispositivo. No *Hapkit*, o sensor MR consiste numa resistência ou ponte resistiva que varia com a aplicação de um campo magnético rotativo. Este campo magnético é gerado por um íman alojado no veio do motor, como se pode ver na Figura 2.17.

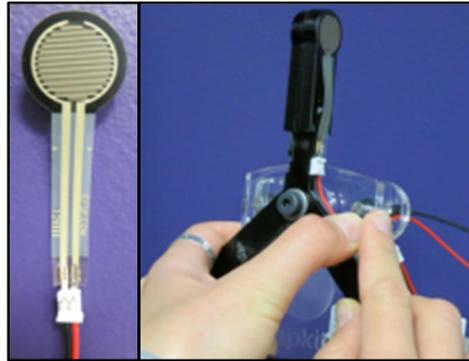


*Figura 2.17 - Leitura de posição através de um sensor magnetoresistivo [67]*

Comparativamente com o sensor de efeito de *Hall*, o sensor MR possui uma sensibilidade muito superior assim como um baixo nível de ruído, podendo funcionar a uma distância superior em relação ao íman. O seu campo magnético varia com a

temperatura representando uma desvantagem em relação ao sensor de efeito de *Hall* [68].

No manípulo existe um sensor de força do tipo resistivo (FSR – force-sensitive resistor), Figura 2.18, que consiste num material (polímero condutivo) cuja resistência varia aquando da aplicação de uma força ou pressão. De salientar que estes sensores não oferecem uma boa repetibilidade e apresentam deriva com a temperatura.



*Figura 2.18 – Sensor de força resistivo (FSR) utilizado no manípulo do Hapkit [67]*

O sinal do sensor de força, FSR, pode ser utilizado como uma entrada complementar para determinar o *feedback* háptico a ser fornecido pelo dispositivo, ou para permitir um registo de dados sobre o nível de força aplicada no dedo do utilizador. Apesar de não ser muito preciso, este sensor é robusto e muito barato [69].

Relativamente à eletrónica, a maioria das versões do *Haptic Paddle* utiliza o sistema *Arduino* enquanto que o *Hapkit* utiliza um PCB customizado (Figura 2.19), que inclui um microcontrolador, um driver/amplificador de motor, uma porta para cartão Micro SD, uma porta Micro USB, as ligações para o sensor específico do háptico e várias linhas digitais e analógicas [29].



*Figura 2.19 - PCB utilizado no Hapkit [67]*

### 2.2.7 *The Pantograph*

O dispositivo háptico com *feedback* de força que vamos agora referir é apelidado de Pantógrafo (“*Pantograph*”), foi desenvolvido na McGill University e apresenta dois graus de liberdade. Como o objetivo deste trabalho visa desenvolver um mecanismo também com 2 GL, torna-se extremamente interessante analisar este dispositivo. O nome escolhido para definir este dispositivo provém do facto de este possuir uma estrutura muito similar à que serviu de base no Polígrafo, sugerindo a ideia de haver uma duplicação/cópia.

As interfaces gráficas com o utilizador (GUI’s – Graphical User Interfaces) melhoraram significativamente a interação computador-homem, porém a comunicação restringia-se à utilização de um rato de computador ou teclado e a um canal de *feedback* visual, normalmente o monitor. Uma interface multimodal tirando partido da cinestesia, da monitorização da força, do som e do grafismo permitiria melhorar exponencialmente a interação computador-homem. Como tal, foi explorado um canal háptico e desenvolvido um dispositivo com o intuito de responder às necessidades de portadores de deficiência visuais quando estes pretendem aceder a aplicações informáticas genéricas e ainda proporcionar a pessoas sem deficiência outras vias de comunicação. Deste modo, procurou-se substituir o rato do computador por um dispositivo planar que não se limitasse apenas a cumprir as funções que o rato possui [30, 70]. A Figura 2.20 apresenta o aspeto do primeiro pantógrafo desenvolvido.



*Figura 2.20 - Primeiro protótipo do Pantógrafo, dispositivo háptico desenvolvido por Vincent Hayward e Christophe Ramstein [71]*

Este dispositivo evidencia [70, 71]:

- Um fator de forma eficiente, sendo possível utilizá-lo em cima de uma mesa;

- Simplicidade, permitindo que seja facilmente duplicado e possua baixo custo;
- Um espaço de trabalho de dimensão considerável (um retângulo de  $100 \times 160$  mm), sendo alcançável pelo movimento da mão e do dedo;
- Elevada fidelidade, tendo em conta que as irregularidades na resposta em frequência só se iniciam aos 400 Hz, possui uma banda passante e resposta dinâmica bastante alargadas;
- Atrito desprezável e muito baixa inércia;
- A utilização de motores CC sem núcleo evitando problemas a nível de flutuação de binário e problemas de trepidação a baixas velocidades (Cogging torque);
- Uma transmissão dos binários dos motores com ataque direto;
- Uma força máxima disponível de 10 N.

O Pantógrafo consegue reconstruir em tempo-real interações com objetos mecânicos que possuam rigidez, amortecimento ou quaisquer outras propriedades construtivas, sempre que aplicado um controlo digital apropriado. A sua resposta qualitativa fornece ao utilizador sensações táteis e cinestésicas de rigidez, de contornos contínuos, de arestas afiadas, etc.

O sistema experimental completo inclui um computador pessoal de baixo custo, uma placa de conversão analógico/digital e digital/analógico convencional de 12 bits, e um par de amplificadores de potência linear. Na interação com interfaces como botoneiras, contornos de janelas e barras de menu, um campo de forças é calculado sendo uma função do valor das variáveis de estado, representadas pela posição e velocidade, sobre as quais o utilizador tem controlo. As forças traduzidas pelo dispositivo são capazes de replicar, com realismo, as interações mecânicas que ocorrem entre um ponteiro e uma superfície. Tendo como exemplo uma botoneira, a força é calculada para ser uma função da distância entre o ponteiro e o centro do retângulo. O perfil da força é dividido em três partes: uma região livre, uma de atração e uma outra de repulsão. Modificando o valor de um coeficiente de rigidez como uma função da posição define-se totalmente este perfil. O perfil de força permite ao utilizador sentir o contorno do retângulo com os olhos fechados e quando o ponteiro ultrapassa a zona de repulsão é atraído para o centro permitindo um posicionamento preciso [30].

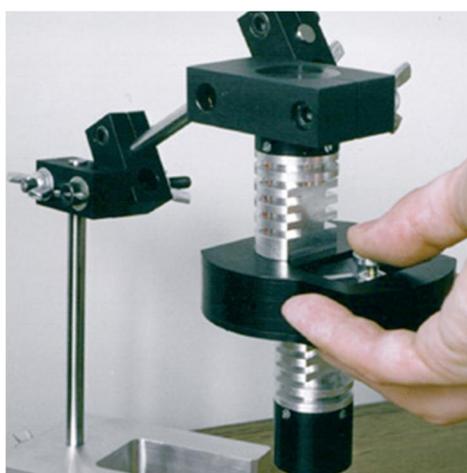
Tendo em conta a sua aplicação, o primeiro protótipo apresentava um tamanho demasiado grande assim como demasiada robustez. Deste modo, foram posteriormente desenvolvidos dispositivos mais pequenos como o representado na Figura 2.21.



*Figura 2.21 - Versão mais pequena do Pantógrafo com ligeiras alterações [72]*

De salientar a redução da área de trabalho para um retângulo de  $100 \times 60$  mm e ainda a implementação de uma interface de interação que permita pressionar uma chapa com o dedo e deslizá-la sobre a superfície eliminando a necessidade de agarrar um manípulo. Esta implementação foi possível devido à elevada espessura das articulações e à compensação de um atrito nominal seja qual for a carga. Porém a dificuldade sentida em combinar uma tarefa de apontar com uma de definir um destino, constitui uma limitação a nível da interação do GUI.

Outra solução, Figura 2.22, passou por um dispositivo de mão e no qual as articulações permaneciam alojadas numa caixa.



*Figura 2.22 - Versão do Pantógrafo no qual era necessário segurá-lo com a mão [72]*

Nesta solução o utilizador para além de cumprir as tarefas habituais de definir um destino necessita também de segurar o dispositivo [70].

Com o intuito de criar um sistema de arquitetura aberta, de fácil replicação, que possua características de desempenho superiores e bem conhecidas podendo ser

utilizado como um instrumento científico, o *Pantograph* foi redesenhado. Denominado de *Pantograph MK-II*, este dispositivo háptico é apresentado na Figura 2.23.



Figura 2.23 - *Pantograph Mk-II* [72]

Para medir as forças normais aplicadas pelo utilizador aquando do deslocamento do manípulo de dedo, o dispositivo háptico possui uma célula de carga alojada sobre o espaço de trabalho. De maneira a eliminar forças devido ao peso do dispositivo, este possui uma dobradiça debaixo do centro de massa, Figura 2.24.

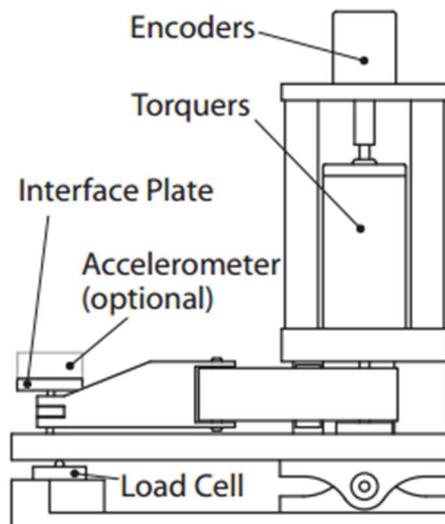


Figura 2.24 - *Vista lateral do Pantograph* [73]

No manípulo de dedo existe também um acelerómetro que permite fornecer informações sobre os movimentos bruscos deste. Possui dois motores sem núcleo com escovas de grafite tendo sido também testado o uso de escovas de metal que embora possuíssem um atrito mais baixo, a velocidades baixas a sua ligação com os

enrolamentos não é tão boa como utilizar escovas de grafite. Relativamente à sensorização da posição o *Pantograph* utiliza potenciômetros com 10 *bits* de resolução, enquanto que este utiliza *encoders* incrementais óticos rotativos. Quanto à eletrónica, esta é constituída por uma placa de aquisição de dados da *Quanser Inc.*, com quatro entradas para *encoder* com sinais em quadratura associados a contadores de 24 *bits*, sem *buffer*, e canais A/D e D/A de baixo atraso na sua resposta.

Este dispositivo (*The Pantograph*) de 2 GL com um movimento planar, baseado num mecanismo paralelo de cinco barras ligadas, é o que mais se aproxima das especificações enunciadas. Contudo, não satisfaz totalmente os requisitos colocados devido ao atravancamento, à relação (espaço de trabalho/atravancamento), à gama de forças disponibilizada, à robustez e ao custo inerente que acarreta tal solução.

## 2.3 Conclusão

Ao longo deste capítulo foram abordados alguns tópicos importantes relacionados com a interação háptica, nomeadamente na interação com aplicações de realidade virtual, as soluções de variados dispositivos hápticos existentes no mercado assim como as desenvolvidas para situações de baixa complexidade, que têm surgido a nível académico. É perceptível que os dispositivos hápticos têm assumido cada vez mais preponderância em diversas áreas, entre as quais foi dado um maior ênfase à reabilitação. Representam soluções fiáveis, robustas e de enorme potencial embora sejam um pouco complexas e bastante caras no caso das soluções comerciais.

Destaca-se o facto de o modo de acionamento destes dispositivos ser normalmente efetuado através motores de corrente contínua pois permitem um melhor controlo, e para além disso são motores simples e de baixo preço.



### 3 Modelação da Cinemática do Mecanismo

Neste capítulo pretende-se descrever o desenvolvimento de um dispositivo háptico que apresente um mecanismo planar com dois graus de liberdade. Deste modo serão apresentados mecanismos com estas características específicas bem como a solução daquele que se procura desenvolver no decurso deste estudo. O mecanismo desenvolvido e implementado baseia-se no mecanismo *Sensation*. O facto de este apresentar maior rigidez e robustez comparativamente com o mecanismo de cinco barras ligadas foi o fator determinante para a escolha feita.

Ao longo deste capítulo será ainda apresentada toda a análise cinemática do mecanismo utilizado assim como a análise de transmissão do binário dos motores para as barras de acionamento.

#### 3.1 Mecanismos com Dois Graus de Liberdade

Os mecanismos podem ser caracterizados como mecanismos planares ou mecanismos espaciais tendo em conta o movimento relativo dos corpos rígidos que os constituem. Num mecanismo planar os corpos rígidos possuem todos os movimentos relativos num plano ou em planos paralelos sendo, por isso, considerado mecanismo bidimensional. Sempre que exista movimentos relativos que não sejam no mesmo plano ou em planos paralelos o mecanismo é considerado como mecanismo espacial e tridimensional [74].

De maneira a gerar um movimento planar com dois graus de liberdade é possível utilizar uma configuração em série ou uma configuração paralela.

Os mecanismos com uma configuração em série são basicamente cadeias de malha aberta onde todas as ligações são atuadas. Normalmente, em cada junta ativa encontra-se alojado um motor e, como tal, o peso e binário de reação deste influencia o motor que o antecede. Por sua vez, os mecanismos paralelos são cadeias cinemáticas que

contêm pelo menos uma malha fechada e só um certo número de ligações do mecanismo são atuadas existindo, portanto, juntas ativas e juntas passivas. Os motores encontram-se alojados na base do mecanismo sendo que o peso e binário de reação de um motor não tem influencia direta no outro. Cada junta ativa ou atuador contribui para um grau de liberdade do movimento do ponto terminal [75]. Em comparação com os manipuladores em série, os mecanismos paralelos têm inúmeras vantagens, das quais se destacam algumas [76]:

- Estrutura mecânica mais rígida;
- Menor sensibilidade à variação da carga externa na precisão de posicionamento;
- Melhor precisão do ponto terminal;
- Cinemática inversa mais simples.

Já como desvantagens estes apresentam:

- Um espaço de trabalho restrito;
- Cinemática direta mais complicada.

Face a estas considerações e tendo em conta também a rigidez elevada que apresenta, decidiu-se desenvolver uma solução baseada numa configuração paralela. O facto de ser um mecanismo mais difícil de modelar representa um desafio ainda mais aliciante.

### **3.1.1 Mecanismo Paralelo de Cinco Barras Ligadas**

Um dos mecanismos existentes mais conhecido e que possui dois graus de liberdade tem como base a configuração representada na Figura 3.1. Este representa o tipo de mecanismo utilizado no pantógrafo - mecanismo paralelo de cinco barras ligadas - anteriormente descrito na secção 2.2.7.

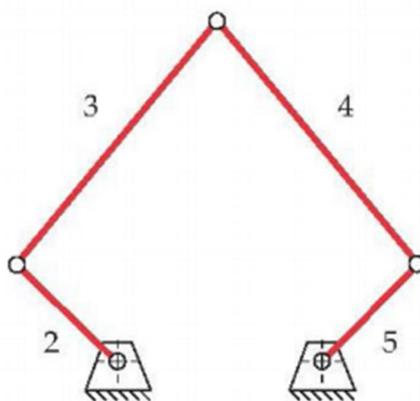


Figura 3.1 - Mecanismo de cinco barras ligadas com dois graus de liberdade

Como se pode observar, trata-se de um mecanismo paralelo de cinco barras ligadas, que se move num plano, e onde as barras 2 e 5 são acionadas por motores, sendo portanto as responsáveis por permitir o movimento do sistema. Estas barras ligam à barra 3 e 4 respetivamente, provocando um movimento de rotação entre estas. O ponto de ligação da barra 3 à 4 é o ponto terminal, sujeitando também a rotação de uma barra em relação à outra. A barra 1 é representada pela ligação entre os dois pontos de fixação do mecanismo

### 3.1.2 Sensation

O *Sensation* é também um mecanismo paralelo mas apresenta uma configuração que permite melhorar o desempenho cinemático e alcançar o equilíbrio estático. Possui dois mecanismos pantográficos sendo que cada um é constituído por quatro barras que se mantêm paralelas duas a duas. Deste modo é possível mudar as juntas de atuação, o que leva a contornar certos problemas existentes nos mecanismos paralelos típicos como o de cinco barras ligadas, nomeadamente singularidades dentro do espaço de trabalho. Na Figura 3.2 é apresentado o mecanismo referido [77].

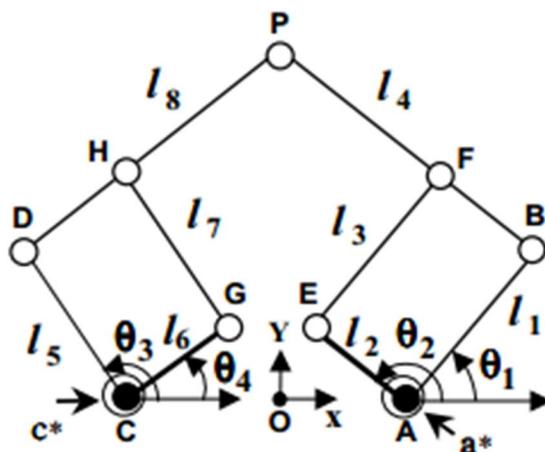
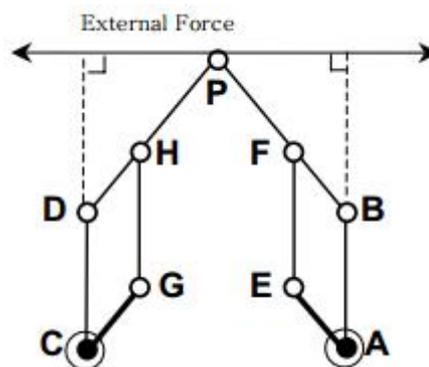


Figura 3.2 - Sensation: mecanismo paralelo com 2 GL [77]

As juntas revolutas A, C, a\* e c\* encontram-se ligadas à base da estrutura, sendo que as juntas A e C estão ligadas, respetivamente, às ligações AE e CG, e as juntas a\* e c\* estão ligadas às ligações AB e CD, respetivamente. Em cada junta A e C encontra-se um motor que deste modo atua as ligações AE e CG. Quando estas duas ligações rodam em relação às juntas A e C respetivamente, as ligações BP e DP efetuam o mesmo ângulo de rotação que as ligações AE e CG assim como as ligações AB e CD possuem o mesmo ângulo de rotação que as ligações EF e GH, respetivamente. As juntas B e D são também juntas ativas o que permite transformar uma configuração singular de cinemática direta numa não singular. A junta P é o ponto terminal do mecanismo.

Uma nota de destaque vai para o facto de uma mudança das juntas de atuação transformar singularidades de cinemática direta (DKS – Direct Kinematic Singularities) em não singularidades. Nas singularidades de cinemática direta o mecanismo ganha um grau de liberdade extra mesmo que todos os atuadores estejam bloqueados, isto é, não se consegue impedir o movimento do ponto terminal, representado por P na Figura 3.3., numa determinada direção.



*Figura 3.3 – Exemplo de uma configuração do Sensation que possui uma singularidade de cinemática direta [77]*

No caso da configuração apresentada na Figura 3.3, o mecanismo não consegue impedir o movimento do ponto terminal quando são aplicadas forças externas ao longo de direções perpendiculares à barra AB ou à barra CD. Normalmente nos mecanismos paralelos este tipo de singularidade ocorre dentro do espaço de trabalho e representa um problema importante nestes mecanismos.

Outro tipo de singularidade é o de cinemática inversa (IKS – Inverse Kinematic Singularities) e que, ao contrário do problema anterior, representa a perda de um grau de liberdade do mecanismo, Figura 3.4.

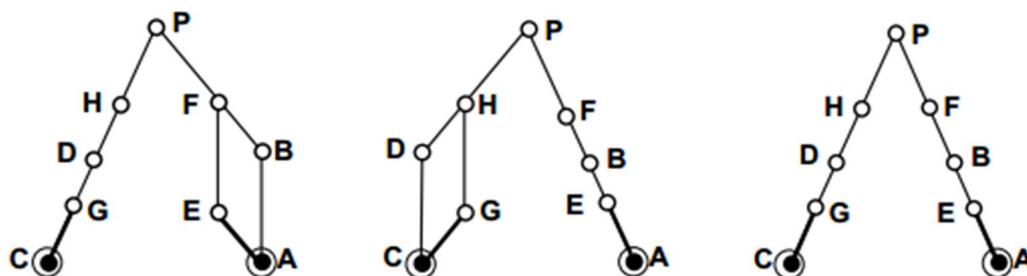


Figura 3.4 – Exemplo de uma configuração do *Sensation* que possui uma singularidade de cinemática inversa [77]

Quando a barra AB ou a barra CD possui uma relação de paralelismo com a barra BP ou DP, respetivamente, existe uma resistência a forças externas nas direções ao longo de PA ou PC mesmo que as juntas A ou C não sejam atuadas. Este tipo de problema ocorre normalmente no limite do espaço de trabalho dos mecanismos paralelos.

A Figura 3.5 representa as singularidades e o espaço de trabalho num mecanismo de cinco barras ligadas.

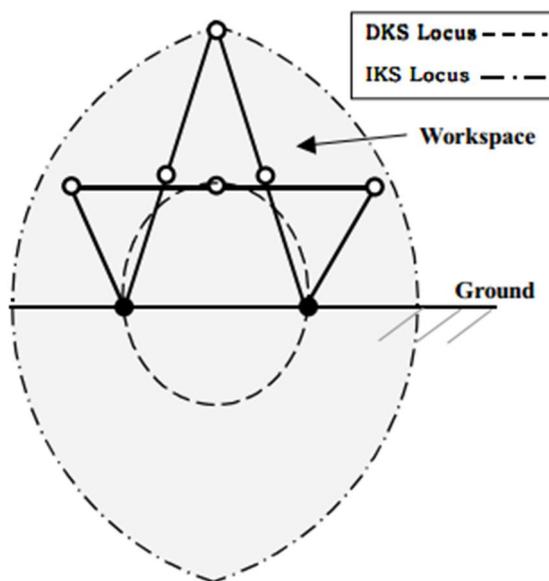


Figura 3.5 - Representação do espaço de trabalho e das singularidades do mecanismo de cinco barras ligadas [77]

O espaço de trabalho deste tipo de mecanismo é pequeno comparativamente com o tamanho das barras, uma vez que o mecanismo só deve movimentar-se fora da zona das singularidades de cinemática direta e obviamente dentro da zona delimitada pelas singularidades de cinemática inversa.

Uma vez que no *Sensation* as singularidades de cinemática direta ocorrem perto do limite do espaço de trabalho, este já não é afetado por estes problemas dentro do espaço de trabalho como se pode confirmar na Figura 3.6.

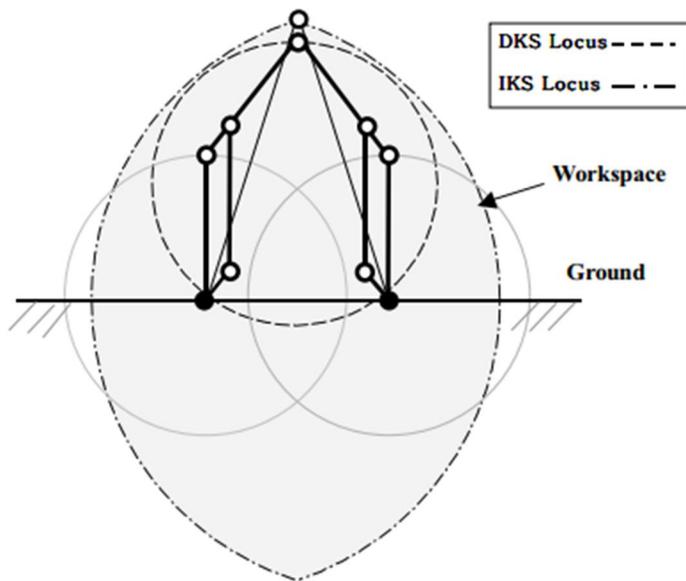


Figura 3.6 - Representação do espaço de trabalho e das singularidades do Sensation [77]

A nível do desempenho cinemático, o facto de o mecanismo de cinco barras ligadas possuir singularidades de cinemática direta dentro do espaço de trabalho confere-lhe uma pior manipulabilidade comparativamente com o *Sensation*. A manipulabilidade é originalmente definida como uma medida do desempenho de uma estrutura robótica, normalmente dada no domínio da força através de elipsoides de manipulabilidade. O volume da elipsoide é representativo da proximidade dos pontos de singularidade sendo que quanto maior o volume da elipsoide mais perto o manipulador se encontra de uma singularidade. É necessário assegurar características de manipulabilidade constantes dentro do espaço de trabalho para que seja facilmente gerada a força e momento ao longo de uma dada direção de modo a ser fornecido ao utilizador uma força precisa [78].

Na Figura 3.7 é possível observar as elipses de manipulabilidade do mecanismo de cinco barras ligadas. De referir que neste caso são elipses e não elipsoides visto tratar-se de um mecanismo planar.

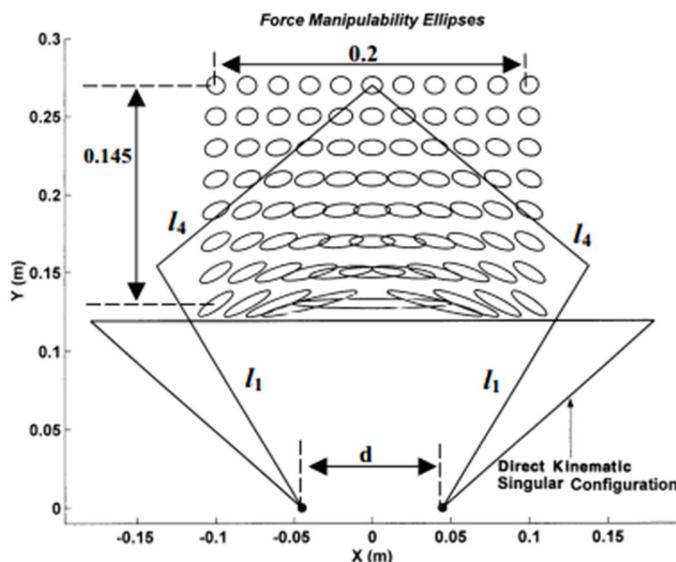


Figura 3.7 - Elipses de manipulabilidade do mecanismo de cinco barras ligadas [77]

Por sua vez, o *Sensation* apresenta melhores elipses de manipulabilidade assim como um espaço de trabalho mais amplo, sendo isso perceptível através da Figura 3.8.

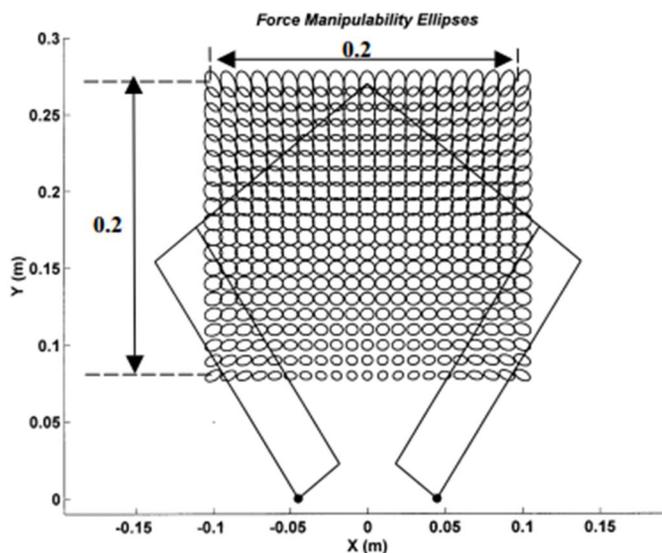


Figura 3.8 - Elipses de manipulabilidade do *Sensation* [77]

É também notória a boa isotropia cinemática ao longo de todo o espaço de trabalho do mecanismo denominado *Sensation*, sem existir a necessidade de acrescentar atuadores e/ou melhorar os parâmetros das ligações.

### 3.2 Caracterização do Mecanismo Desenvolvido

O mecanismo desenvolvido e implementado no dispositivo háptico baseia-se então no mecanismo *Sensation* devido à sua maior rigidez e robustez comparativamente com o mecanismo de cinco barras ligadas. De salientar algumas alterações efetuadas nomeadamente a mudança de um dos pontos de fixação assim como uma das barras atuadas, Figura 3.9. Trata-se assim de um mecanismo paralelo de nove barras ligadas com dois graus de liberdade e dois eixos de movimento controlados.

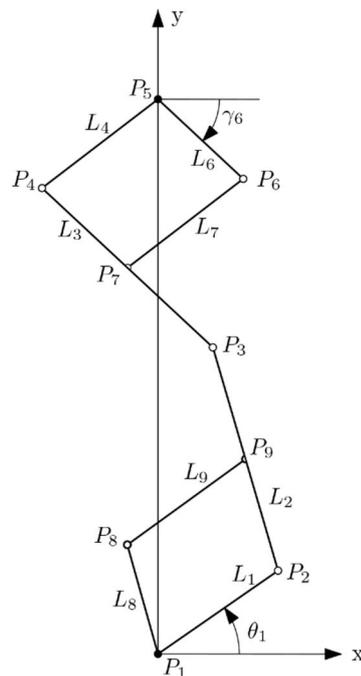


Figura 3.9 - Mecanismo paralelo de nove barras ligadas

Este mecanismo evidencia-se por uma maior rigidez devido a um posicionamento, dos seus pontos de fixação, em lados opostos. Desta forma, o espaço de trabalho encontra-se centrado relativamente ao mecanismo e ao dispositivo. A abordagem a este tipo de mecanismo permitiu contornar alguns dos problemas presentes nos vários tipos de singularidades.

#### 3.2.1 Graus de Liberdade

O estudo e análise de toda a cinemática do mecanismo assim como a análise da transmissão de binário tornou-se possível com o recurso ao *software* MATLAB. A sua escolha prende-se com o facto de este ser um *software* robusto e que permite a execução de cálculos de uma forma rápida [79].

De maneira a iniciar esta análise cinemática é importante verificar os graus de liberdade (GL) que o mecanismo possui. Os GL de um mecanismo representam o número de movimentos relativos independentes entre os corpos rígidos. Em geral, um corpo rígido possui 3 GL em relação a um plano. Os pares cinemáticos representam o conjunto de duas superfícies que estabelecem contato entre dois componentes e são, portanto, restrições nos corpos que reduzem os graus de liberdade do mecanismo [80].

Na presença de  $n$  corpos sem qualquer restrição, qualquer um deles pode ser escolhido como referência e o número total de graus de liberdade relativos é  $6(n - 1)$ . Impondo restrições independentes entre os corpos, nomeadamente articulações, o número de graus de restrições da  $i$ -ésima articulação é representado por  $u_i$ , sendo que pode indicar qualquer valor entre 1 e 5, desde que sejam descartadas as articulações sem contato com zero restrições ( $u_i = 0$ ) e as totalmente rígidas ( $u_i = 6$ ). Com  $g$  juntas de trabalho entre  $n$  corpos, o número de graus de liberdade pode ser identificado pela equação denominada pelo critério de *Gruebler* [81]:

$$GL = 6(n - 1) - \sum_{i=1}^g u_i \quad (3.1)$$

Substituindo na equação (3.1)  $u_i$  por  $6 - f_i$ , a equação pode ser expressada em termos de liberdade  $f$ , em vez de graus de restrição:

$$GL = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (3.2)$$

Num sistema de corpos articulados limitado ao movimento planar (ou esférico) relativo, a soma de constantes e graus de liberdade não é 6 mas sim 3 e portanto a equação que define mecanismos planares ou esféricos é a seguinte:

$$GL = 3(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (3.3)$$

Tendo em conta:

- $GL$  = graus de liberdade do mecanismo;
- $n$  = número de corpos no mecanismo;
- $g$  = número de articulações;
- $f_i$  = número de graus de liberdade da  $i$ -ésima articulação.

Da análise da Figura 3.9 é fácil perceber que:

- $n = 9$ ;
- $g = 11$ ;
- $\sum f_i = 11$ .

Introduzindo estes valores na expressão (3.3) resulta:

$$GL = 3(9 - 11 - 1) + 11 = 2 \quad (3.4)$$

Deste modo, verifica-se que o mecanismo possui os 2 graus de liberdade pretendidos.

### 3.2.2 Cinemática Inversa

A cinemática representa o estudo do movimento de um corpo ou de um sistema de corpos sem ter em conta as forças ou binários que possam estar na sua origem, nem a inércia dos corpos (massas, momentos de inércia). Para estudar a geometria do movimento são estabelecidas relações entre a posição, a velocidade, a aceleração e o tempo sem ter em conta as causas que originam ou alteram o movimento [82]. Nos dispositivos hápticos, a cinemática serve como base para a análise do sistema e permite conhecer o desempenho do utilizador e a sua representação no mundo virtual [83]. Recorrendo aos modelos da cinemática direta e inversa torna-se possível representar os dois tipos de problemas de análise cinemática existentes.

A análise da cinemática direta de mecanismos paralelos, isto é, o conhecimento da localização (posição e orientação) do ponto terminal sendo fornecido um conjunto de parâmetros de entrada (deslocamentos dos atuadores), é um problema analítico de elevada dificuldade. Este facto deve-se em grande parte à necessidade de utilizar equações não lineares assim como à existência de inúmeras soluções. Pelo contrário, a análise da cinemática inversa, que procura determinar os valores dos parâmetros de entrada resultante da localização do ponto terminal fornecida, é um problema geralmente mais fácil de resolver. O oposto ocorre quando se trata de manipuladores em série [76].

Como já referido, o estudo da cinemática inversa permite obter os valores dos parâmetros de entrada resultante da localização do ponto terminal fornecida, ou seja, permite que sejam encontrados os ângulos das juntas ativas, referentes a uma determinada localização do ponto terminal. Deste modo é necessário definir as equações que parametrizam totalmente o mecanismo. Nos mecanismos paralelos o problema da cinemática inversa pode ser resolvido através da análise vetorial. Este tipo de

cinemática apresenta uma grande importância em situações na qual uma mudança na força de entrada seja gerada pela mudança de posição do ponto terminal em relação à mão do utilizador [75].

Para resolução da cinemática inversa recorreu-se a um método que consiste em dividir o mecanismo em três triângulos, Figura 3.10, bastante utilizado nos mecanismos paralelos constituídos por cinco barras ligadas [73].

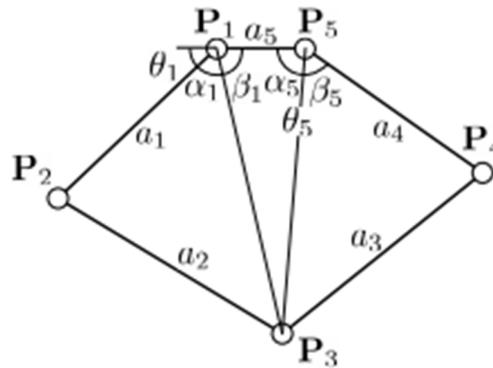


Figura 3.10 - Divisão do pentágono, que forma o mecanismo de cinco barras ligadas, em três triângulos [73]

Este método foi assim adaptado às necessidades do novo mecanismo. Tendo então em consideração a Figura 3.11, o problema consiste essencialmente em encontrar os ângulos  $\theta_1$  e  $\gamma_6$  sendo estipulada a posição  $P_3$ .

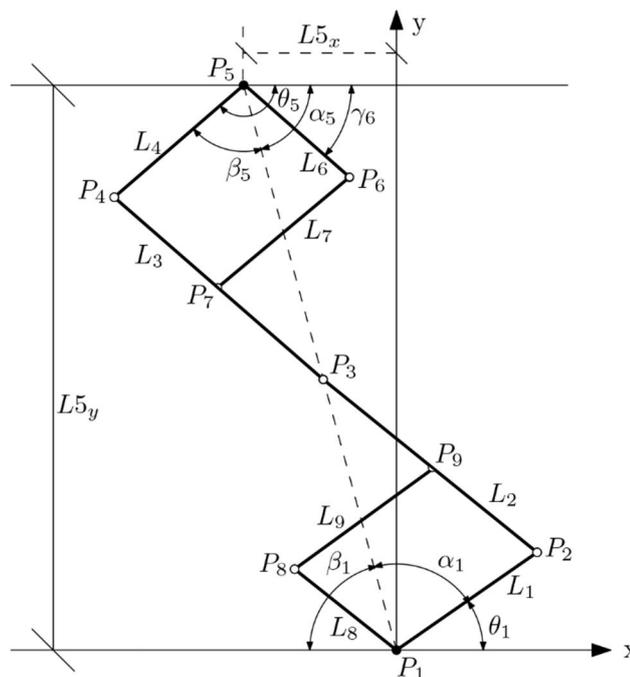


Figura 3.11 - Modelo cinemático do mecanismo paralelo de nove barras ligadas utilizado para resolver o problema de cinemática inversa

Desprezando inicialmente as quatro barras interiores ( $L_6, L_7, L_8$  e  $L_9$ ), é possível considerar que o mecanismo estudado representa também um pentágono, como no caso do mecanismo de cinco barras ligadas, pese embora o facto de um dos seus pontos de fixação, nomeadamente  $P_5$ , possuir uma localização relativa diferente e o mecanismo ter mais barras. Deste modo, tendo em conta que um pentágono pode ser dividido em três triângulos, torna-se assim intuitiva a parametrização dos ângulos representados.

Devido a uma maior facilidade de cálculo começou-se primeiramente por definir como parâmetros de saída os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_5$ , como no mecanismo de cinco barras ligadas.

Tendo em consideração a origem do referencial se encontrar em  $P_1$ :

$$\theta_1 = \pi - \alpha_1 - \beta_1 \quad (3.5)$$

$$\theta_5 = \alpha_5 + \beta_5 \quad (3.6)$$

É então necessário definir os ângulos que resolvem as equações (3.5) e (3.6). No caso do ângulo  $\alpha_1$ , este representa um ângulo do triângulo composto pelas barras  $L_1$  e  $L_2$  e ainda a distância de  $P_1$  a  $P_3$ . Para definir este ângulo divide-se o triângulo em duas partes de maneira a construir dois triângulos do tipo retângulo, Figura 3.12, e resolvê-lo recorrendo ao teorema de Pitágoras.

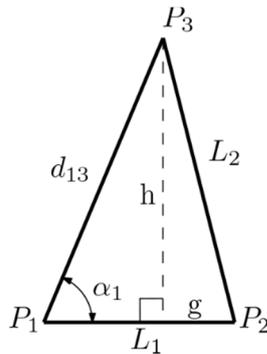


Figura 3.12 - Triângulo formado pelas barras  $L_1, L_2$  e distância  $d_{13}$

Através das relações trigonométricas para os dois triângulos retângulos presentes obtém-se:

$$\begin{cases} L_2^2 = h^2 + g^2 \\ d_{13}^2 = (L_1 - g)^2 + h^2 \end{cases} \Rightarrow \left\{ g = \frac{-d_{13}^2 + L_1^2 + L_2^2}{2L_1} \right. \quad (3.7)$$

Definindo uma equação para o triângulo retângulo em função do ângulo  $\alpha_1$  e relacionando com a equação (3.7) obtém-se a equação que o define:

$$\cos \alpha_1 = \frac{L_1 - g}{d_{13}} \Rightarrow \alpha_1 = \arccos\left(\frac{L_1^2 + d_{13}^2 - L_2^2}{2L_1 \cdot d_{13}}\right) \quad (3.8)$$

Como a distância entre  $P_1$  e  $P_3$  varia consoante a posição do ponto terminal é necessário ainda defini-la e é possível através de um triângulo retângulo composto pelas coordenadas em  $x$  e em  $y$  dos pontos  $P_1$  e  $P_3$  e ainda da distância entre eles, isto é:

$$d_{13} = \sqrt{x_3^2 + y_3^2} \quad (3.9)$$

O ângulo  $\beta_1$  é definido através da função atan2:

$$\beta_1 = \text{atan2}(y_3, -x_3) \quad (3.10)$$

A função atan2 representa a função arco tangente entre duas variáveis em vez de uma. Utilizando os sinais dos dois argumentos de entrada consegue-se determinar o quadrante em que se encontra o ângulo. Para quaisquer argumentos reais  $x$  e  $y$  diferentes de zero,  $\text{atan2}(y, x)$  corresponde ao ângulo, em radianos, entre o eixo positivo de  $x$  e o ponto representado pelas coordenadas  $(x, y)$ . Quando o ponto se encontra no primeiro ou segundo quadrante o ângulo é positivo e no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio sendo que quando o ponto se encontra no terceiro ou quarto quadrante o ângulo é negativo e no sentido dos ponteiros do relógio [84].

Os ângulos  $\alpha_5$  e  $\beta_5$  assim como a distância entre  $P_5$  e  $P_3$  são deduzidos considerando os critérios anteriores e são os seguintes:

$$\beta_5 = -\arccos\left(\frac{L_4^2 + d_{53}^2 - L_3^2}{2L_4 \cdot d_{53}}\right) \quad (3.11)$$

$$d_{53} = \sqrt{(x_3 + L_{5x})^2 + (L_{5y} - y_3)^2} \quad (3.12)$$

$$\alpha_5 = \text{atan2}(y_3 - L_{5y}, x_3 + L_{5x}) \quad (3.13)$$

Caso o objetivo fosse conhecer os ângulos das barras L1 e L4 em função da localização de P3, todo o processo desenvolvido até aqui seria suficiente. Porém, como as barras de acionamento consideradas são as L1 e L6 e como também se pretende criar um gráfico em MATLAB que represente toda a estrutura, tornou-se necessário definir as coordenadas de todos os pontos do mecanismo.

As coordenadas dos pontos P2 e P4 são obtidas de forma direta tendo em conta que dependem dos ângulos já deduzidos e são as seguintes:

$$x_2 = L_1 \cdot \cos(\theta_1) \tag{3.14}$$

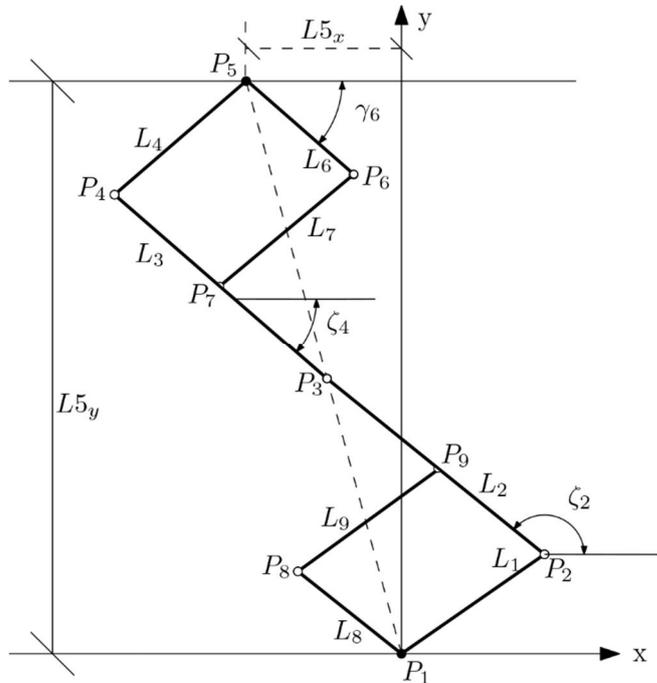
$$y_2 = L_1 \cdot \sin(\theta_1) \tag{3.15}$$

e

$$x_4 = L_4 \cdot \cos(\theta_5) - L_{5x} \tag{3.16}$$

$$y_4 = L_4 \cdot \sin(\theta_5) + L_{5y} \tag{3.17}$$

A barra L8 possui uma relação de paralelismo com a barra L2 e, portanto, conhecendo o ângulo de uma delas, conhece-se o da outra, podendo seguir-se o mesmo critério para as barras L3 e L6. Na Figura 3.13 estão representados os ângulos em questão.



**Figura 3.13 - Modelo cinemático com os ângulos utilizados para determinar a posição das barras interiores**

Deste modo, os ângulos são definidos pelas seguintes equações:

$$\zeta_2 = \text{atan2}(y_3 - y_2, x_3 - x_2) \quad (3.18)$$

$$\zeta_4 = \text{atan2}(y_3 - y_4, x_3 - x_4) \quad (3.19)$$

E é assim possível determinar os restantes pontos:

$$x_8 = L_8 \cdot \cos(\zeta_2) \quad (3.20)$$

$$y_8 = L_8 \cdot \sin(\zeta_2) \quad (3.21)$$

$$x_9 = x_2 + L_8 \cdot \cos(\zeta_2) \quad (3.22)$$

$$y_9 = y_2 + L_8 \cdot \sin(\zeta_2) \quad (3.23)$$

$$x_6 = -L_{5x} + L_6 \cdot \cos(\zeta_4) \quad (3.24)$$

$$y_6 = L_{5y} + L_6 \cdot \sin(\zeta_4) \quad (3.25)$$

$$x_7 = x_4 + L_6 \cdot \cos(\zeta_4) \quad (3.26)$$

$$y_7 = y_4 + L_6 \cdot \sin(\zeta_4) \quad (3.27)$$

O ângulo da barra de acionamento  $L_6$  é representado pela equação:

$$\gamma_6 = \text{atan2}(y_6 - L_{5y}, L_{5x} + x_6) \quad (3.28)$$

Criando uma função em MATLAB em que primeiramente se atribui valores às dimensões das barras e depois se insere todas as equações deduzidas para os ângulos, distâncias e posições, obtém-se um algoritmo que analisa a cinemática inversa da estrutura desenvolvida inicialmente. Na Figura 3.14 é apresentado um diagrama que ilustra o código implementado em MATLAB e que resolve o problema da cinemática inversa.

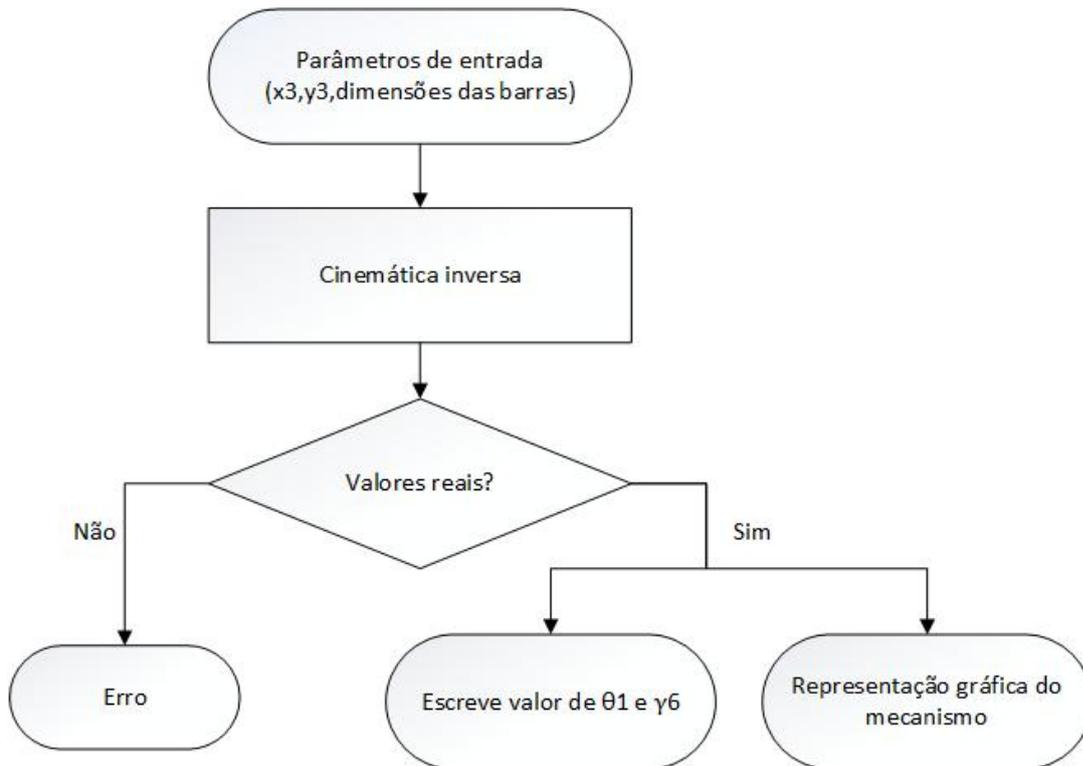
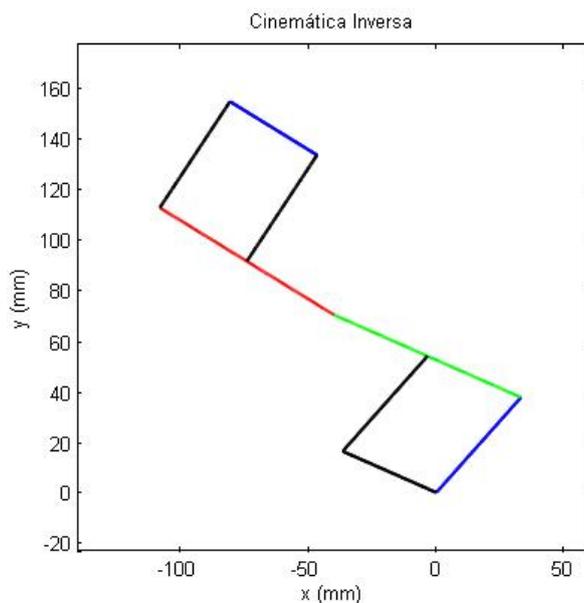


Figura 3.14 - Diagrama ilustrativo do código da cinemática inversa implementado em MATLAB

Assim, inserindo na janela de comando do MATLAB o nome da respetiva *function* e os valores dos parâmetros de entrada (posição  $P_3$ ), o programa é iniciado sendo de referir que os valores das dimensões das barras, que definem o mecanismo, são alteráveis dentro da função. Caso nas equações de cinemática inversa resultem valores imaginários é apresentada, na janela de comando, uma mensagem de erro e significa que o ponto terminal do mecanismo definido não consegue alcançar a posição pretendida. Quando resultam das equações valores reais são apresentados na janela de comando os valores dos ângulos das barras de acionamento ( $\theta_1$  e  $\gamma_6$ ) correspondentes a uma posição definida do ponto terminal. Acrescentando ao mesmo programa a função *linspace*, que tem como principal objetivo a criação de vetores linearmente espaçados, é possível tirar partido desta função para gerar a figura que representa o mecanismo na configuração indicada pelo valor de  $P_3$  inserido na função.

Na Figura 3.15, está representada a figura gerada no MATLAB para a configuração do mecanismo definida pelo ponto  $P_3$ .

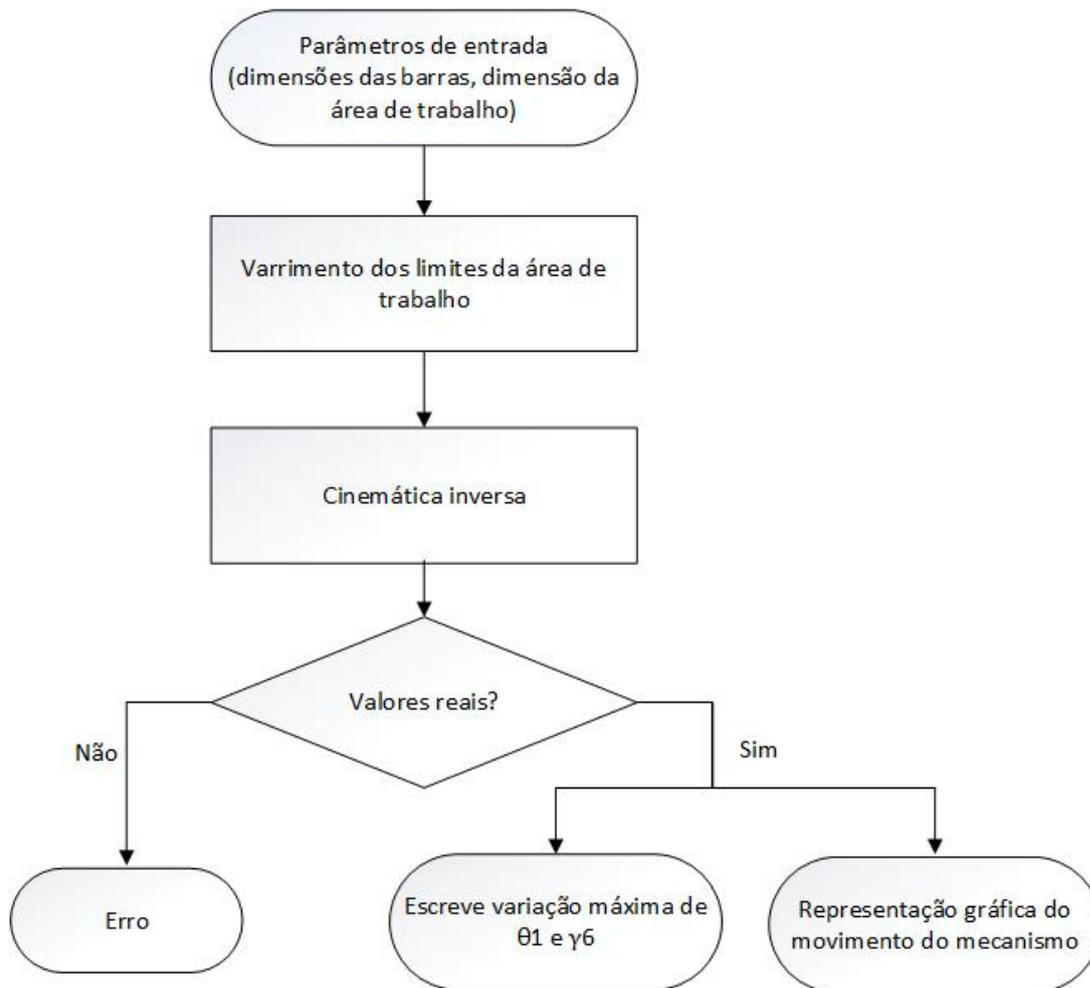


*Figura 3.15 - Figura gerada em MATLAB com a configuração do mecanismo em função da cinemática inversa*

### 3.2.3 Espaço de Trabalho

O estudo e implementação no MATLAB das funções que definem a cinemática direta e inversa, serve como base para o desenvolvimento de novos programas, nomeadamente para o estudo do comportamento do mecanismo face a uma área de trabalho, o qual será agora apresentado e devidamente comentado.

Este programa pretende colocar o ponto terminal a movimentar-se em torno de uma área de trabalho definida para perceber se o mecanismo desenvolvido consegue cumprir os requisitos inicialmente colocados, área de trabalho de  $70 \times 70$  mm, e ainda avaliar o espaço ocupado pelo mecanismo quando este se movimenta. Para tal, recorreu-se ao código desenvolvido para a análise da cinemática inversa e procedeu-se a algumas implementações. Na Figura 3.16 apresenta-se um algoritmo que ilustra o código desenvolvido para o varrimento das arestas de um quadrado representativo do limite do espaço de trabalho.



*Figura 3.16 - Diagrama ilustrativo do código implementado, em MATLAB, que realiza o varrimento dos limites do espaço de trabalho do mecanismo desenvolvido*

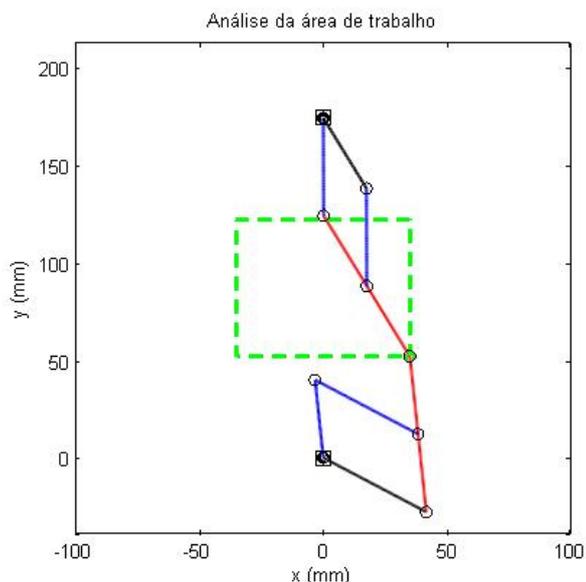
Tal como no algoritmo anterior, este começa por exigir que sejam definidas as dimensões das barras que constituem o mecanismo. De seguida, devem ser determinadas as coordenadas do ponto terminal,  $x_3$  e  $y_3$  e que serão os limites do espaço de trabalho pretendido.

Após a leitura das coordenadas, o programa executa as equações de cinemática inversa determinando a configuração do mecanismo para cada posição do ponto terminal permitindo, assim, verificar se o mecanismo consegue realizar o movimento imposto. Este movimento é possível visualizar graficamente com uma animação atualizada em cada 0,05 segundos.

Se inseridas as coordenadas que representam um quadrado de 70x70mm centrado em relação à estrutura o programa assinala erro por identificar a existência de valores complexos, então a configuração do mecanismo não permite alcançar o ponto terminal definido. Deste modo, foram estudadas sucessivas configurações que permitiram alcançar o espaço de trabalho definido e após um processo de tentativa e erro, a escolha passou por alinhar, em  $y$ , os pontos de fixação. De salientar que esta alteração no mecanismo exige uma alteração no programa da cinemática inversa sendo apenas

necessário alterar as variáveis que representam as distâncias entre os dois pontos de fixação.

O aspeto do varrimento ao longo dos limites do espaço de trabalho para a estrutura na sua versão final está representado na Figura 3.17.



*Figura 3.17 - Figura gerada em MATLAB para o varrimento dos limites do espaço de trabalho*

É possível observar, representado a verde, os limites do espaço de trabalho percorridos pelo ponto terminal do mecanismo.

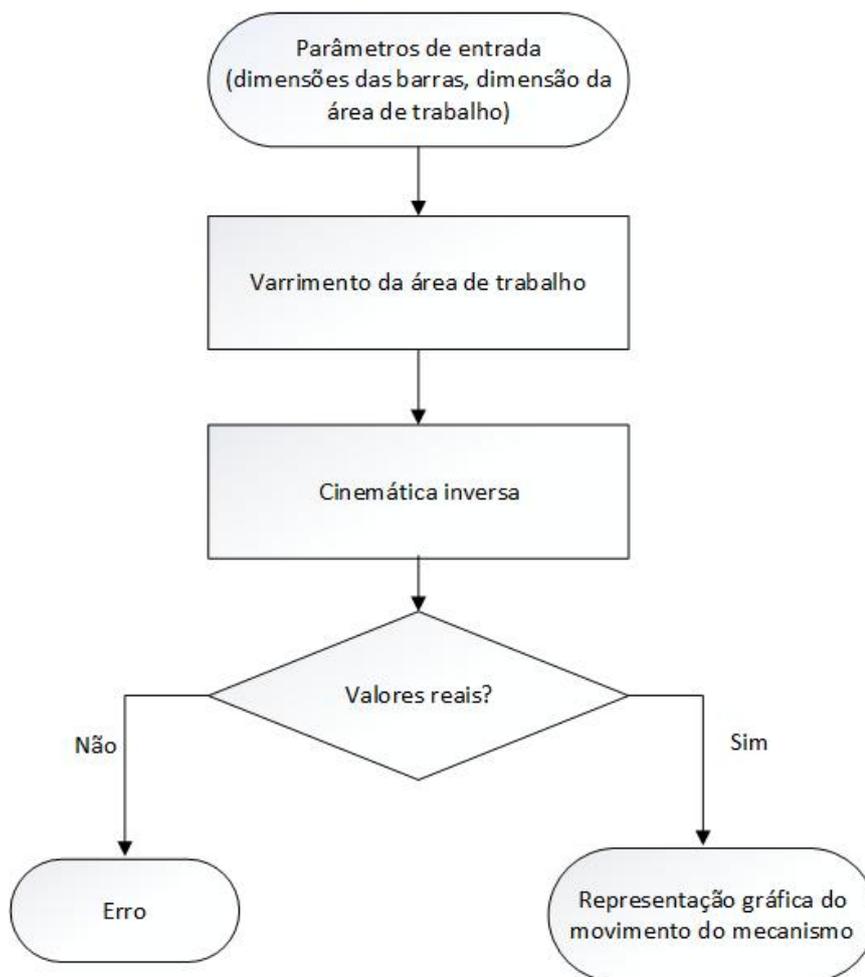
Refira-se também a importância de conhecer o deslocamento angular efetuado por cada barra de acionamento. Assim, relativamente à barra de acionamento inferior, a sua maior variação angular ocorre quando o ponto terminal se desloca do vértice inferior direito do quadrado, que representa a área de trabalho, até ao vértice oposto. No caso da barra de acionamento superior os vértices que definem a variação são os restantes. Portanto o varrimento desenvolvido é suficiente para se conhecer estes deslocamentos máximos. Realizando uma subtração entre o valor angular máximo de uma barra de acionamento e o valor angular mínimo dessa mesma barra obtém-se, para uma área de trabalho de  $70 \times 70$  mm, os seguintes valores:

- $\theta_1 = 123,8265^\circ$ ;
- $\gamma_6 = 78,7984^\circ$ .

Este cálculo serve também como auxílio no estudo do modo de transmissão do movimento dos motores às barras.

Conhecida a capacidade do mecanismo em movimentar-se ao longo dos limites máximos da área de trabalho, é exetável que este alcance qualquer ponto dentro desta

área. Deste modo, foi desenvolvido um programa no qual o mecanismo efetua um varrimento de toda a área de trabalho. Este programa permite assim conhecer as posições de todas as barras do mecanismo para cada posição do ponto terminal dentro do espaço de trabalho sendo, obviamente, pretendido conhecer-se a posição das barras atuadas diretamente pelos motores. Na Figura 3.18 apresenta-se um diagrama que ilustra o código desenvolvido para o varrimento da área de trabalho do mecanismo.



*Figura 3.18 - Diagrama ilustrativo do código implementado, em MATLAB, que realiza o varrimento da área de trabalho do mecanismo desenvolvido*

Este programa tem uma estrutura semelhante ao programa anterior sendo que a principal diferença reside na implementação de dois ciclos entre os vetores que definem a posição do ponto terminal e as equações da cinemática inversa. O primeiro ciclo impõe que este percorra todos os pontos em y para cada posição em x. O segundo ciclo define o tipo de transição efetuado pelo ponto terminal quando este percorre todos os pontos em y e pretende passar para o x seguinte.

Na Figura 3.19 apresenta-se a configuração do mecanismo quando este termina o varrimento.

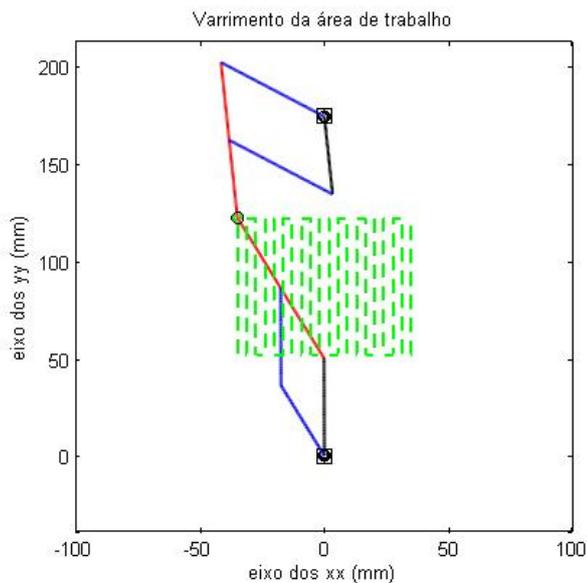


Figura 3.19 - Varrimento da área de trabalho definida

Cumpridos os objetivos a nível do varrimento do espaço de trabalho do mecanismo, desenvolveu-se mais um programa que permite conhecer o espaço total alcançável pelo mecanismo estudado. Na Figura 3.20, é apresentado o diagrama ilustrativo do código utilizado para conhecer o espaço total disponível para este mecanismo.

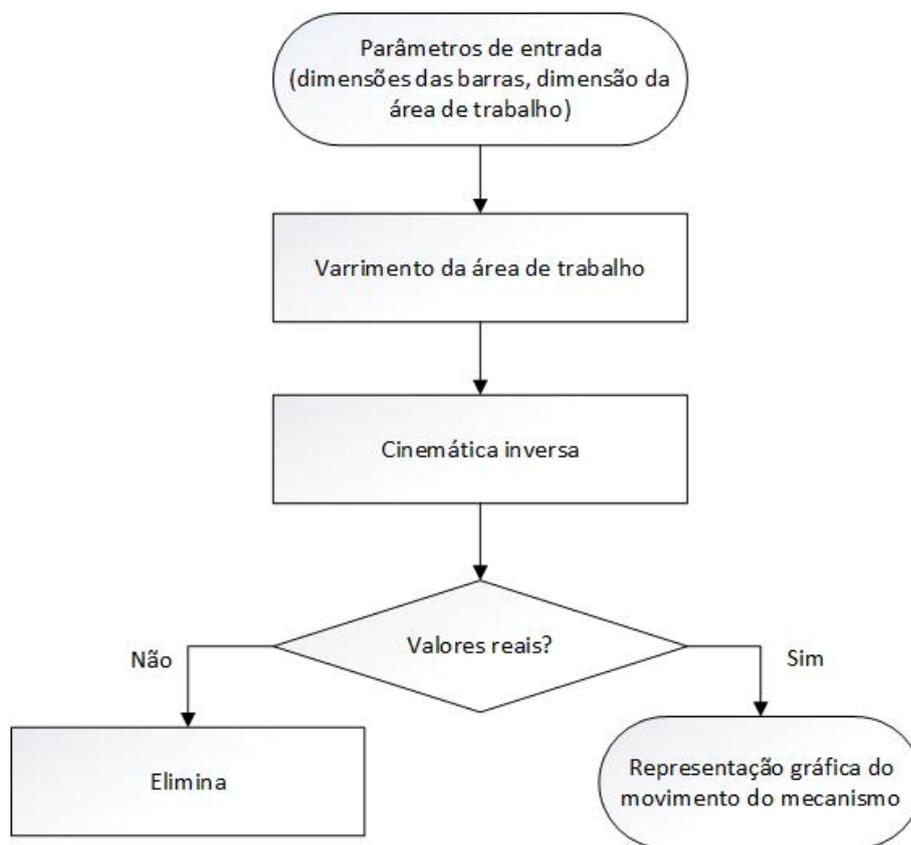
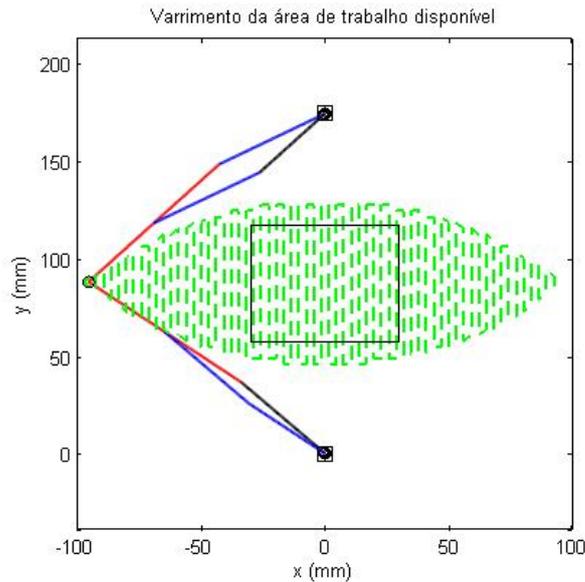


Figura 3.20 - Diagrama ilustrativo do código implementado, em MATLAB, que realiza o varrimento da área de trabalho disponível do mecanismo desenvolvido

Tendo em consideração o programa anterior começou-se por definir um quadrado no qual o mecanismo não conseguisse alcançar todos os pontos. Após as equações de cinemática inversa inseriu-se uma condição para que o programa apenas considerasse os pontos que apresentam uma solução real, isto porque quando o mecanismo não consegue alcançar uma determinada posição, as equações que definem as coordenadas das barras apresentam valor imaginário. Na Figura 3.21 é apresentada a configuração do mecanismo quando este efetua o varrimento de toda a área disponível.



*Figura 3.21 - Área de trabalho disponível*

A área de trabalho disponível encontra-se representada a verde e é possível observar que esta apresenta uma forma particular. Foi ainda representada a área de trabalho pretendida de maneira a realçar as potencialidades da solução encontrada.

### 3.2.4 Análise da Transmissão de Binário

Nesta secção pretende-se estudar o comportamento da estrutura estática quando submetida à ação de forças exteriores. O principal objetivo é conhecer os esforços nos nós das barras atuadas quando é aplicada uma força no ponto terminal para desta forma determinar os binários exigidos nos motores ao contrariar essa mesma força. Como esta determinação de esforços pode implicar um grande volume de cálculos envereda-se pela utilização de meios de cálculo automático e o recurso a uma análise matricial. As estruturas reticuladas podem ser classificadas em função do número de incógnitas que estas contêm ser igual, superior ou inferior ao número de equações de equilíbrio estático disponíveis para resolver o problema, sendo denominadas, respetivamente, como isostáticas, hiperestáticas e hipostáticas.

As estruturas hipostáticas não são estáveis e formam mecanismos cujo estudo só é possível fora do âmbito da estática. Normalmente possuem um número de reações de apoio (incógnitas) inferior ao número de equações de equilíbrio estático. Porém, existem situações em que o número de reações é igual ou superior ao número de equações de equilíbrio mas essas reações estão dispostas de forma ineficaz.

As estruturas isostáticas são diretamente analisáveis pelas equações de equilíbrio e permitem obter as condições de equilíbrio de todos os nós.

A estrutura em questão, como se irá confirmar mais à frente, é hiperestática uma vez que não é possível resolvê-la diretamente através das equações de equilíbrio. Como tal, o método das forças ou o método dos deslocamentos são normalmente utilizados para analisar a estrutura. Optou-se por utilizar o método dos deslocamentos uma vez que este conduz a algoritmos para tratamento automático mais fáceis de implementar.

Na análise de uma estrutura pelo método dos deslocamentos pressupõe-se o estabelecimento de uma equação matricial de equilíbrio representativa de todas as forças aplicadas nessa mesma estrutura. Perante a suposição de que não existem deslocamentos nodais, há um equilíbrio entre as forças diretamente aplicadas do exterior ( $F^*$ ) e as forças de fixação ( $F_{fix}$ ), isto é:

$$\{F^*\} = \{F_{fix}\} \quad (3.29)$$

Porém, na realidade existe uma deformação da estrutura e como tal pode-se adicionar às forças de fixação, novas forças necessárias para a simulação do comportamento real. Considerando que a estrutura apresenta um comportamento linear elástico, existe uma proporcionalidade entre as forças a aplicar e o deslocamento que estas provocam. A equação matricial (3.30) representa a nova situação de equilíbrio para a estrutura deformada:

$$\{F^{**}\} = \{F_{fix}\} + [K]\{D\} \quad (3.30)$$

No primeiro membro da equação (3.30) são representadas as forças nodais aplicadas à estrutura que incluem quer as forças diretamente aplicadas quer as reações nos apoios. As forças de fixação estão presentes na primeira parcela do segundo membro e as forças de origem elástica proporcionais aos deslocamentos são representadas na segunda parcela. Reescrevendo a equação (3.30) de uma forma mais simplificada:

$$[K]\{D\} = \{F\} \quad (3.31)$$

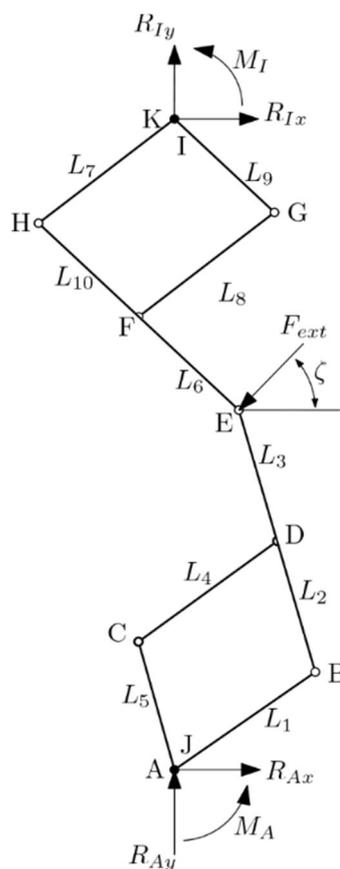
sendo que  $K$  representa a matriz de rigidez da estrutura,  $D$  o vetor de deslocamentos nodais (incógnita neste sistema de equações) e  $F$  o vetor solicitação que inclui todas as forças nodais aplicadas à estrutura.

Considerando uma barra retilínea, de secção transversal constante (sem considerar o efeito do esforço transversal), a matriz de rigidez completa resulta da inversão da matriz de flexibilidade. A matriz de flexibilidade pode-se obter aplicando o teorema da carga unitária, considerando unidades fictícias de carga aplicadas nos extremos da barra. A matriz de rigidez resultante é:

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Numa matriz de rigidez de um elemento retilíneo bi-encastrado, cada coluna da matriz representa o conjunto de forças e/ou momentos necessários aplicar nos extremos desse mesmo elemento para provocar um deslocamento unitário numa “direção” e nulo em todas as outras [85].

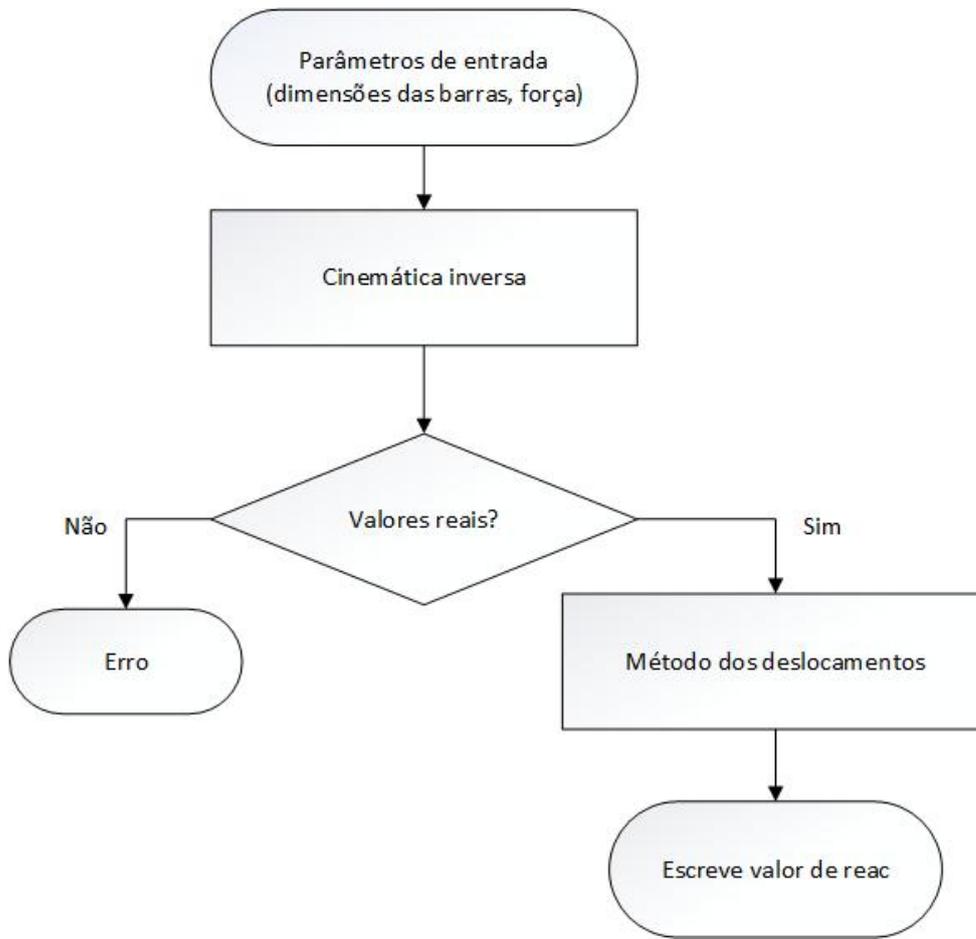
Da análise da Figura 3.22 representativa do mecanismo final, constata-se que a estrutura é hiperestática pois possui seis incógnitas e é apenas possível retirar quatro equações de equilíbrio estático.



*Figura 3.22 - Modelo cinemático do mecanismo paralelo de nove barras ligadas utilizado no método dos deslocamentos*

Esta figura serviu de base para a obtenção da matriz de rigidez implementada. Tendo em conta que a barra de acionamento  $L_1$  representa a ligação AB e a barra de acionamento  $L_9$  a ligação IG, é considerado um encastramento nos nós A e I. O valor de  $M_A$  e de  $M_I$  representa o momento existente nos pontos de fixação da estrutura quando aplicada uma força ( $F_{ext}$ ) e corresponde ao binário necessário nos motores para contrariar essa força aplicada no ponto terminal do mecanismo, caso estes atuem diretamente no nó.

O programa implementado em MATLAB e que permite analisar os momentos na estrutura resulta de uma adaptação a um programa desenvolvido no trabalho de dissertação do Fernando Carneiro [86]. A Figura 3.23 apresenta um diagrama ilustrativo do código implementado.



*Figura 3.23 - Diagrama ilustrativo do código implementado, em MATLAB, que realiza a análise de momentos do mecanismo desenvolvido*

Introduzindo a posição do ponto terminal, o ângulo que a direção da força faz com o eixo x e definindo as dimensões das barras e o valor da força, o programa resolve as equações de cinemática inversa tal como em programas anteriormente descritos. Caso destas equações resultem valores reais é então resolvido o método dos deslocamentos o que se traduz no final num vetor solução com trinta e seis linhas. Cada linha representa uma reação ou momento num determinado nó sendo que a terceira linha representa o momento  $M_A$  e a linha trinta e cinco representa o momento  $M_I$ .

Para confirmar os resultados foi utilizado o *software Multiframe 4D*, o qual consiste num *software* de análise estrutural. De referir que este *software* não foi utilizado para realizar a análise de momentos pois exige que, para cada posição do ponto terminal pretendida sejam inseridas, manualmente, as respetivas coordenadas de cada ponto do mecanismo.

Na Figura 3.24 é apresentada a estrutura gerada em MATLAB e em *Multiframe 4D*.

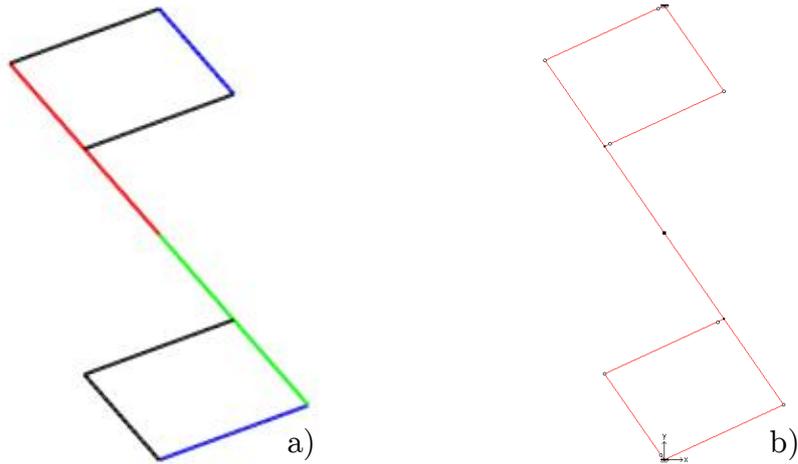


Figura 3.24 - Estrutura gerada em: a) MATLAB; b) Multiframe

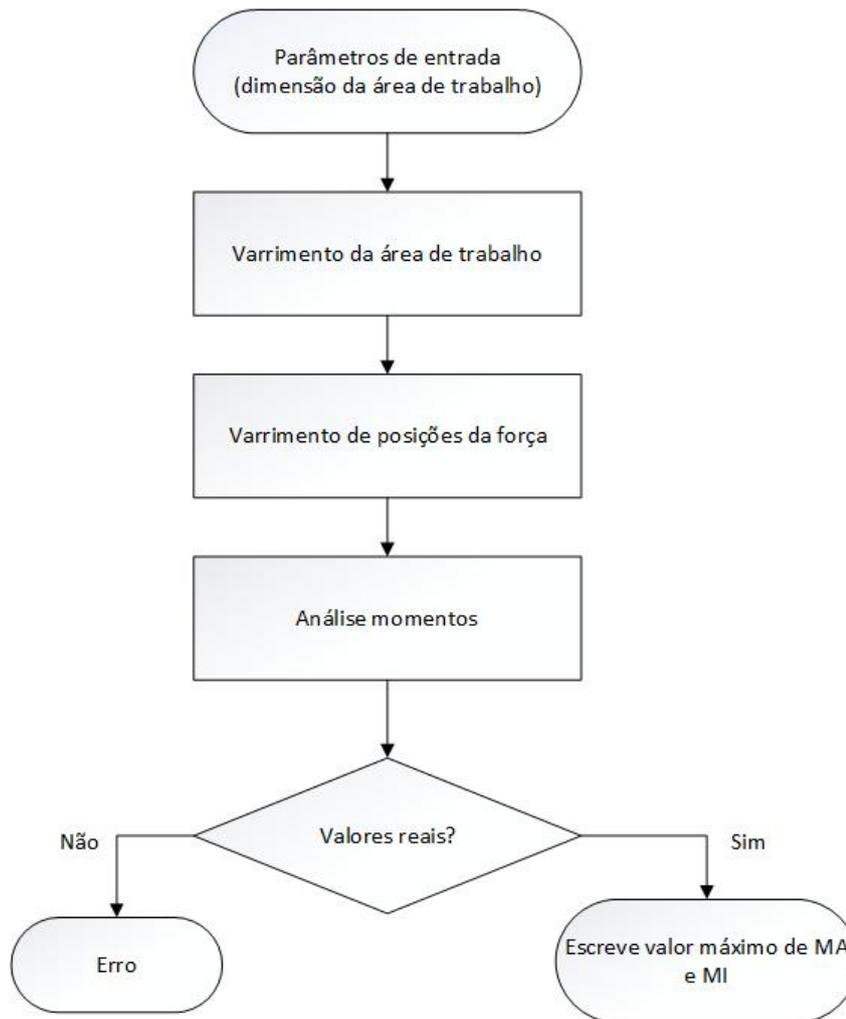
Através da Figura 3.25 é possível comprovar que perante a mesma configuração e valor de força (20 N) existe uma proximidade bastante satisfatória entre os resultados de ambos os programas. A primeira tabela foi obtida em MATLAB e a segunda em *Multiframe* 4D e foram realçados os valores dos momentos  $M_A$  e  $M_I$  em ambas as tabelas.

1	4.8474	13	-1.3193e-09	25	3.2755e-09
2	-7.0476	14	-3.1713e-09	26	-6.1841e-09
3	-421.7241	15	-6.8212e-13	27	2.2737e-13
4	6.8212e-13	16	2.2737e-13	28	1.5012e-13
5	9.2545e-09	17	-1.5405e-09	29	-5.2951e-09
6	9.6987e-09	18	6.8003e-08	30	5.2459e-09
7	-1.1369e-13	19	-9.0949e-13	31	0
8	-6.8212e-13	20	2.2737e-13	32	9.0949e-13
9	4.1013e-08	21	1.1371e-08	33	15.1526
10	-1.5932e-08	22	-4.6165e-09	34	7.0476
11	5.6843e-14	23	0	35	1.3183e+03
12	1.3642e-12	24	0	36	0

	Joint	Rx' N	Ry' N	Mz' N-mm
1	1	4,845	-7,043	-421,479
2	2	-0,000	0,000	0,000
3	3	-0,000	-0,000	0,000
4	4	-0,000	0,000	0,000
5	5	-0,000	-0,000	0,000
6	6	0,000	0,000	0,000
7	7	15,155	7,043	1318,521
8	8	-0,000	-0,000	0,000
9	9	-0,000	-0,000	0,000
10	Total	Rx=20,000	Ry=0,000	

Figura 3.25 - Tabela da análise da transmissão de binário, obtida em MATLAB e *Multiframe* 4D

Como este último programa desenvolvido permite apenas conhecer o valor dos momentos ponto a ponto, isto é, necessita que seja sempre inserida a posição do ponto terminal assim como a direção da força, desenvolveu-se um programa que permite conhecer, de forma automática, o binário exigido aos motores em qualquer posição de uma área de trabalho desejada assim como para qualquer direção da força aplicada no ponto terminal. Na Figura 3.26 apresenta-se um diagrama ilustrativo do código desenvolvido.



*Figura 3.26 - Diagrama ilustrativo do código implementado, em MATLAB, que realiza um varrimento da análise de momentos do mecanismo desenvolvido*

Definindo as dimensões do quadrado que define o espaço de trabalho, o programa efetua um varrimento de um determinado número de pontos dentro desse espaço assim como de umas determinadas direções de força que variam entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ . Na janela de comando são apresentados os valores correspondentes aos momentos máximos nos pontos de atuação (A e I). Conhecendo os binários disponibilizados pelos motores, estes resultados permitem concluir que motores podem ser utilizados e caso estes não possuam binário suficiente por ataque direto, pode saber-se a razão de transmissão necessária para compensar.

Os valores máximos de  $M_A$  e  $M_I$  obtidos no programa de varrimento de momentos são:

- $M_A = 2000 \text{ N.mm}$ ;
- $M_I = 2700 \text{ N.mm}$ .

Apesar de ser exigido um binário diferente aos dois motores optou-se por considerar para ambos o valor máximo identificado no programa. Assim, cada motor

deve transmitir à respetiva barra de atuação um binário na ordem dos 2700 N.mm. Também se considerou que, em caso de necessidade, deveria existir uma razão de transmissão idêntica em ambos os lados de acionamento.

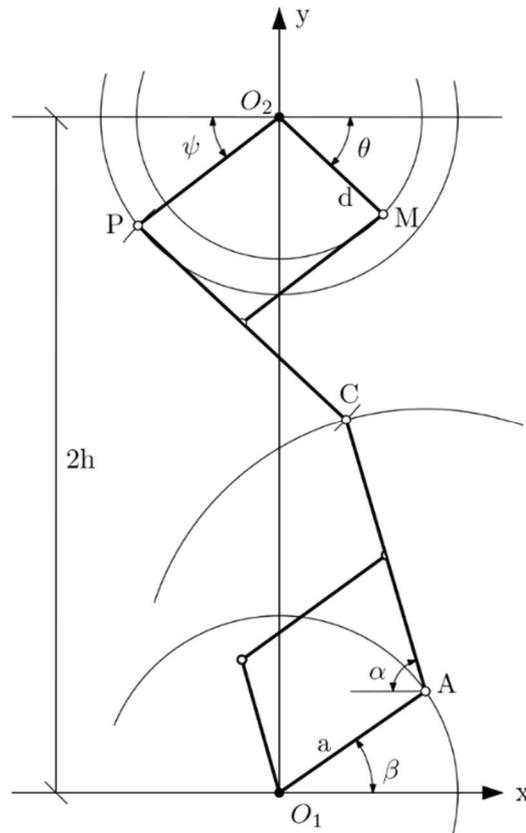
Tendo em conta que os motores utilizados possuem um binário na ordem dos 310 N.mm (12 V, 1 A), não é possível transmitir o movimento por ataque direto. Deste modo, será necessário compensá-los com uma razão de transmissão sendo que se estipulou uma de 1:10.

De salientar que neste cálculo não foi considerada a necessidade de compensar todo o atrito existente no mecanismo sendo que este poderá ser compensado com o aumento da tensão fornecida aos motores, caso necessário. De facto foi considerada uma tensão de 12 V mas ambos os motores podem ser alimentados até 30 V.

### 3.2.5 Cinemática Direta

Tal como foi previamente referido, a análise da cinemática direta permite encontrar a localização do ponto terminal sendo fornecido um conjunto de parâmetros de entrada, nomeadamente os ângulos das juntas ativas. Nos mecanismos paralelos é extremamente difícil resolver o problema de cinemática direta. Vários autores dedicam-se exclusivamente a investigar este tipo de mecanismos, porém a resolução deste caso específico não se encontra disponível tendo sido, assim, resolvido de raiz.

Tendo em consideração a Figura 3.27, usando a notação indicada, pretende-se conhecer a posição do ponto terminal do mecanismo representado pelo ponto C presente num referencial XY. Como tal são considerados como conhecidos os ângulos formados entre as barras atuadas e as bases do mecanismo,  $\theta$  e  $\beta$ , assim como todas as dimensões das barras ativas e passivas. As barras atuadas são a  $O_1A$  e  $O_2M$ .



*Figura 3.27 – Modelo cinemático do mecanismo paralelo de nove barras ligadas utilizado para resolver o problema de cinemática direta*

Considerando que o ponto C resulta da intersecção de duas circunferências cujo centro e raio são conhecidos, procura-se definir a posição do ponto A e do ponto P que complementam as barras que se intersectam no ponto C. O ponto A representa um dos pontos da barra atuada  $O_1A$  e como tal a sua posição depende unicamente do ângulo  $\beta$  e pode ser obtido através das seguintes equações:

$$x_A = a \cdot \cos(\beta) \quad (3.33)$$

$$y_A = a \cdot \sin(\beta) \quad (3.34)$$

Por sua vez a posição do ponto P não representa um dos pontos da barra atuada  $O_2M$  e como tal não depende exclusivamente dessa barra. Esta depende também da barra atuada  $O_1A$ . Uma vez que a barra PC é intersectada em C por uma circunferência de centro em A e comprimento L define-se a equação da circunferência:

$$(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 = L^2 \quad (3.35)$$

Como a barra PC tem a particularidade de, em qualquer configuração, ser sempre paralela à barra atuada  $O_2M$ , o ângulo efetuado pela barra PC será sempre igual ao efetuado pela barra  $O_2M$  e pode ser representado através das seguintes equações:

$$x_C = x_P + L \cdot \cos(\theta) \quad (3.36)$$

$$y_C = y_P - L \cdot \sin(\theta) \quad (3.37)$$

A interseção no ponto C da barra PC com a circunferência de centro A é definida pela equação que relaciona a equação (3.35) com as equações (3.36) e (3.37), e resulta:

$$x_P^2 + y_P^2 + K_1 \cdot x_P - K_2 \cdot y_P = -x_A^2 - y_A^2 + 2L \cdot (x_A \cdot \cos(\theta) - y_A \cdot \sin(\theta)) \quad (3.38)$$

Sendo que:

$$K_1 = 2(L \cdot \cos(\theta) - x_A) \quad (3.39)$$

$$K_2 = 2(L \cdot \sin(\theta) + y_A) \quad (3.40)$$

A circunferência de centro  $O_2$  e comprimento  $a$  que intersesta em P a barra PC é definida pela seguinte equação:

$$x_P^2 + (y_P - 2h)^2 = a^2 \quad (3.41)$$

Multiplicando a equação (3.38) por (-1) e somando à equação (3.41) obtém-se uma equação que relaciona a posição em P com as duas barras atuadas.

$$y_P = K_4 + K_5 \cdot x_P \quad (3.42)$$

Sendo que:

$$K_4 = \frac{K_3}{K_2 - 4h} \quad (3.43)$$

$$K_5 = \frac{K_1}{K_2 - 4h} \quad (3.44)$$

e

$$K_3 = a^2 - 4h^2 + x_A^2 + y_A^2 - 2L(x_A \cdot \cos(\theta) - y_A \cdot \sin(\theta)) \quad (3.45)$$

Substituindo a equação (3.42) em qualquer uma das equações das circunferências obtém-se uma equação de segundo grau que permite obter o valor da posição P em x:

$$K_8 \cdot x_p^2 + K_7 \cdot x_p + K_6 = 0 \quad (3.46)$$

Sendo que:

$$K_6 = K_4^2 - 4h \cdot K_4 + 4h^2 - a^2 \quad (3.47)$$

$$K_7 = 2 \cdot K_4 \cdot K_5 - 4h \cdot K_5 \quad (3.48)$$

$$K_8 = 1 + K_5^2 \quad (3.49)$$

Desenvolvendo um algoritmo que consista na introdução dos valores de entrada (ângulos das barras atuadas, dimensões das barras e distâncias entre os pontos de fixação) para obter o valor de  $x_p$  na equação de segundo grau (3.46), e usando esta equação para obter o valor de  $y_p$  na equação (3.42), consegue-se assim obter a posição do ponto terminal C através das equações (3.36) e (3.37).

De salientar que, como é perceptível na equação (3.46), existem duas soluções possíveis para a posição do ponto P (P e P') uma vez que os ângulos  $\alpha$  e  $\psi$  não são definidos. Mantendo os ângulos das barras atuadas constantes e assumindo as mesmas dimensões das barras é possível obter duas configurações como se pode visualizar na Figura 3.28.

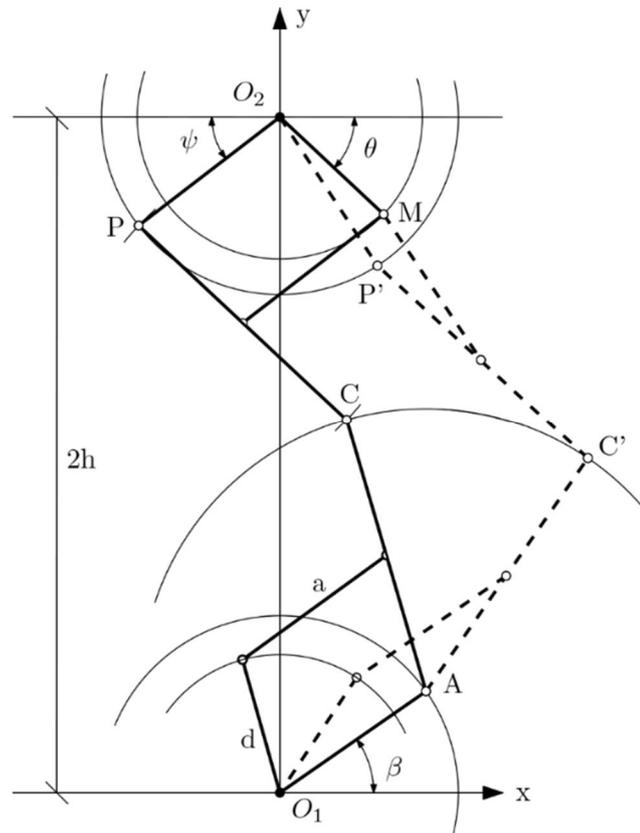


Figura 3.28 - Duas soluções possíveis mantendo o mesmo valor dos ângulos  $\theta$  e  $\beta$

Uma vez que na configuração utilizada como referência, o valor de  $x_p$  é negativo, e na solução da equação (3.46) se obtém um valor negativo e outro positivo, escolhe-se assim a equação que traduza o valor de  $x_p$  num valor negativo.

Implementando em MATLAB o algoritmo referido obtém-se de forma expedita o valor do ponto terminal resultante dos valores dos ângulos das barras atuadas. Na Figura 3.29 é apresentado um diagrama que ilustra o código implementado em MATLAB e que resolve o problema da cinemática direta.

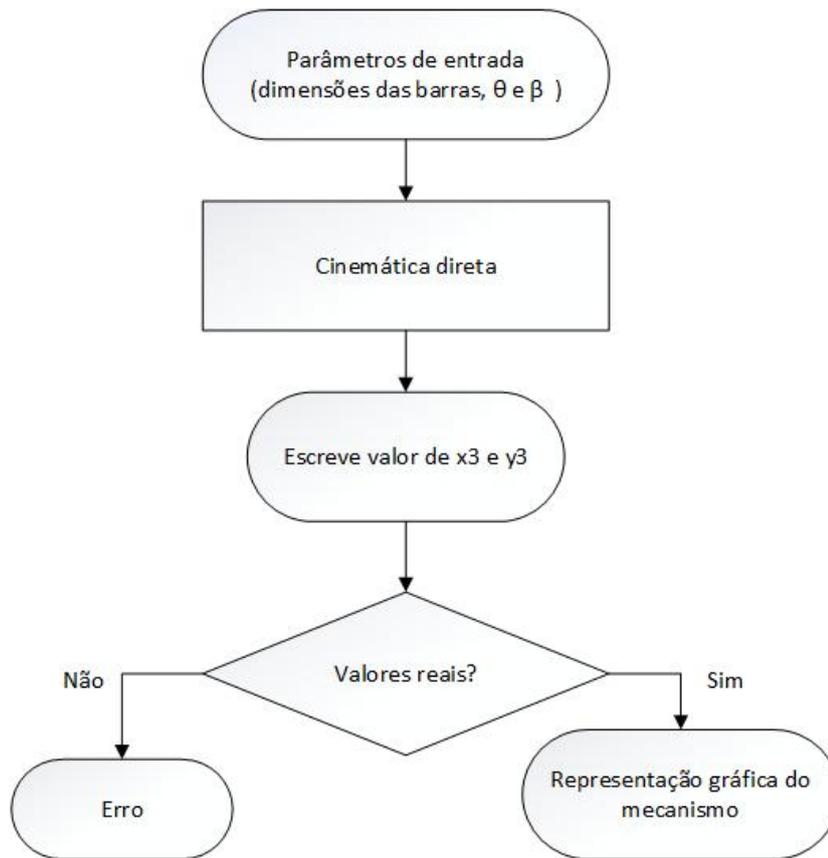
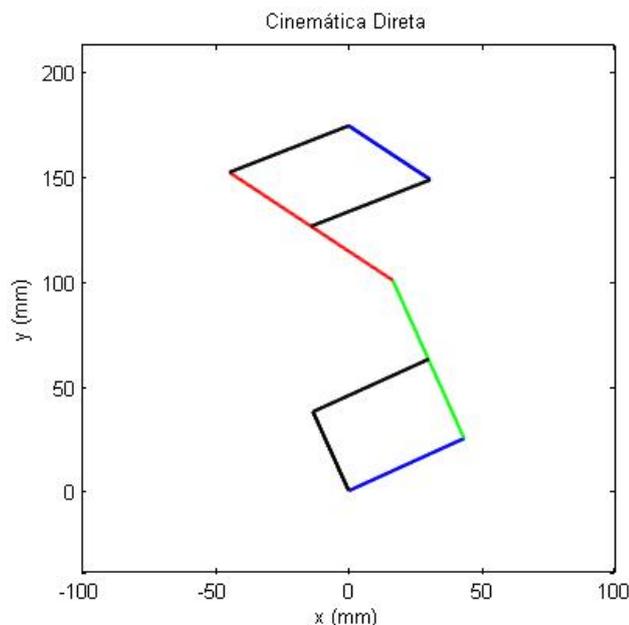


Figura 3.29 - Diagrama ilustrativo do código da cinemática direta implementado em MATLAB

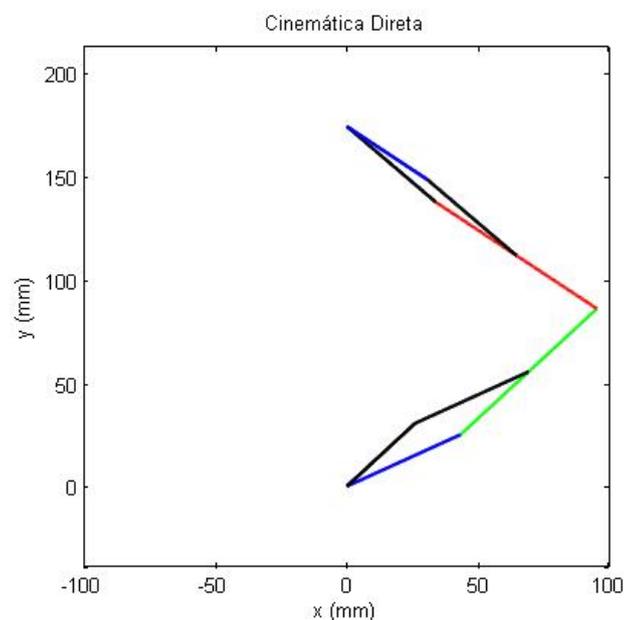
Assim, inserindo na janela de comando do MATLAB o nome do respectivo *script*, o programa é iniciado e lê os valores das dimensões das barras que definem o mecanismo, e que são alteráveis dentro do mesmo *script*. De seguida surge uma mensagem de texto que pede para inserir os valores pretendidos dos ângulos das barras de acionamento ( $\theta$  e  $\beta$ ). Posto isto, o programa corre as equações de cinemática direta e apresenta o valor da posição de  $P_3$  ( $x_3$  e  $y_3$ ). Por último, o programa tenta gerar uma representação gráfica baseada nos resultados das equações. Caso estas equações apresentem como resultado valores imaginários é apresentada, na janela de comando, uma mensagem de erro alertando para a impossibilidade de representar os pontos com esses valores. Quando resultam em todas as equações valores reais é gerado o gráfico ilustrativo.

A Figura 3.30 representa graficamente uma determinada configuração do mecanismo obtida através do MATLAB.



*Figura 3.30 - Figura gerada em MATLAB com a configuração do mecanismo em função da cinemática direta*

Na Figura 3.31 encontra-se representada a outra configuração possível para os mesmos valores dos ângulos  $\theta$  e  $\beta$  da figura anterior.



*Figura 3.31 - Figura gerada em MATLAB com a outra configuração do mecanismo possível utilizando os mesmos valores dos ângulos  $\theta$  e  $\beta$*

A cinemática direta é necessária na maioria das aplicações hápticas uma vez que contém a relação para a identificação dos movimentos. Se a posição dos atuadores for medida através de sensores, como por exemplo *encoders* rotativos, a cinemática direta

pode ser usada para calcular a posição da mão. A força disponível na saída é também baseada neste tipo de cinemática e os cálculos destas forças podem ser realizados com o auxílio da implementação da matriz Jacobiana [75].

### 3.2.6 Singularidades

Comparativamente com os mecanismos em série e apesar dos mecanismos paralelos possuírem uma maior rigidez, precisão, melhores características dinâmicas, entre outros, estes mecanismos possuem um mau desempenho perto das zonas de singularidade tal como os mecanismos em série. Tal como referido na secção 3.1.2, uma singularidade ocorre quando o ponto terminal ganha ou perde um grau de liberdade sendo que o desempenho da transmissão de força do mecanismo é muito baixo [87].

Devido a uma forma similar ao *Sensation*, as singularidades de cinemática inversa do mecanismo desenvolvido ocorrem fora do espaço de trabalho definido, algo que sempre esteve presente na sua conceção.

Quanto às singularidades de cinemática direta, prevê-se que estas também ocorram fora do espaço de trabalho.

Obviamente esta matéria também merece um grande cuidado e estudo. Porém, é um processo bastante complicado e moroso e como tal não foi realizada qualquer análise de carácter mais aprofundado, ficando como um trabalho a realizar futuramente.

## 3.3 Conclusão

No presente capítulo foi explicitado todo o estudo realizado a nível da modelação da cinemática da solução para conceção e desenvolvimento de um dispositivo háptico com dois graus de liberdade num movimento planar, e com um conjunto de requisitos já enunciados no capítulo 1. Foi possível definir as dimensões da estrutura, escolher a melhor colocação dos pontos de fixação, definir os limites do espaço de trabalho e perceber as suas limitações também a nível do mesmo espaço de trabalho. Permitiu também conhecer os binários exigidos aos motores podendo-se assim eleger os motores a utilizar e ainda estudar a melhor solução de transmissão de movimento. Esta modelação permitiu também perceber as vantagens e desvantagens do mecanismo escolhido, nomeadamente na questão das singularidades.

Trata-se assim de um mecanismo paralelo de nove barras ligadas com dois graus de liberdade e dois eixos de movimento controlados de modo a satisfazer os requisitos impostos.

## 4 Projeto e Desenvolvimento da Solução Mecânica

### 4.1 Introdução

Tendo sido feita uma descrição sumária de alguns tipos de dispositivos hápticos, nomeadamente de soluções planares descritas na literatura com 2 GL, seguiu-se a apresentação do estudo realizado ao nível das soluções existentes e da evolução de uma delas. Prosseguiu-se com a modelação da cinemática do mecanismo que se adotou. Agora é dado um primeiro passo no desenvolvimento de uma solução mecânica que cumpra os requisitos do problema a resolver, visando a realização do projeto mecânico.

A solução final foi obtida através de um processo iterativo, no qual foram estudadas diversas possibilidades, desenvolvidas e testadas virtualmente utilizando o *software* de modelação 2D e 3D *SolidWorks*. De referir que se tornou ainda possível testar a prova de conceito das soluções que foram desenvolvidas graças à existência, no laboratório, de uma impressora 3D que permitiu dar forma a um sistema físico sem custos e rapidamente, dá forma às peças projetadas em *CAD*, com enorme celeridade, o que se revelou extremamente útil e incentivador.

Neste capítulo serão apresentados todos os passos para a obtenção de uma estrutura que possua 2 GL, movendo-se num plano horizontal e cujo estudo foi realizado no capítulo anterior. Posteriormente serão também apresentadas as formas de transmissão de movimento, através de motores CC, que permita controlar todo o movimento da estrutura.

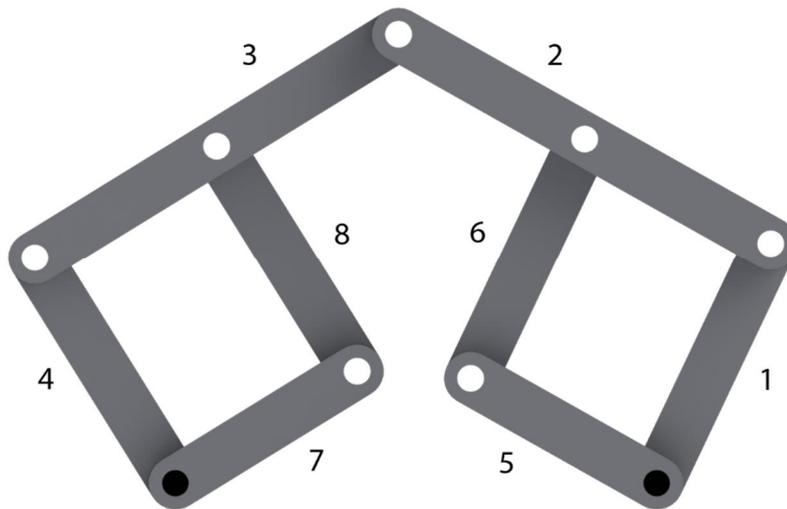
### 4.2 Materialização do Mecanismo de Nove Barras Ligadas

O dimensionamento das barras obedeceu aos seguintes fatores:

- O ponto terminal do mecanismo deverá alcançar qualquer ponto do espaço de trabalho definido;

- O afastamento entre os pinos de fixação deve ter uma distância suficiente, de modo a evitar que as barras interiores, que formam o paralelograma, não se intercequem, qualquer que seja a sua posição;
- A estrutura deve possuir uma boa rigidez e robustez;
- O atravancamento deverá ser o mais baixo possível, sem nunca descurar em relação aos pontos referidos anteriormente;

Tendo em conta estes pressupostos, recorrendo ao apoio da modelação em CAD, assim como à modelação em MATLAB previamente realizada, a relação entre as dimensões consideradas são apresentadas com o apoio da Figura 4.1.



*Figura 4.1 - Mecanismo paralelo em 2D*

As barras 1, 4, 6, 8 têm um comprimento de 50 mm, as barras 2 e 3 apresentam um comprimento de 80 mm e as barras 5 e 7 um comprimento de 40 mm. A largura das barras é 10mm, por se entender ser um valor suficiente para peças obtidas por prototipagem rápida.

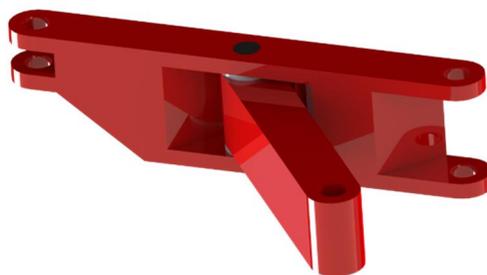
A relação entre a barra 1 e 2, tal como entre a barra 3 e 4, tem um peso extremamente importante no tamanho a dar ao comprimento das mesmas, na medida em que se torne possível cumprir o primeiro requisito, ou seja, que a partir de um ponto fixo o ponto terminal seja capaz de alcançar qualquer ponto do espaço de trabalho.

As dimensões das restantes barras procuram cumprir a forma do paralelograma e as ligações das barras 2 e 3 são localizadas a meio das mesmas.

A distância entre os pontos de fixação torna-se, para já, aquela que cumprindo o requisito de não existir interceção entre as barras interiores, permite que o ponto terminal alcance todo seu espaço de trabalho.

Porém, para se conceber um mecanismo real, torna-se necessário passar de uma solução em 2D para uma em 3D e, portanto, dar volume às barras.

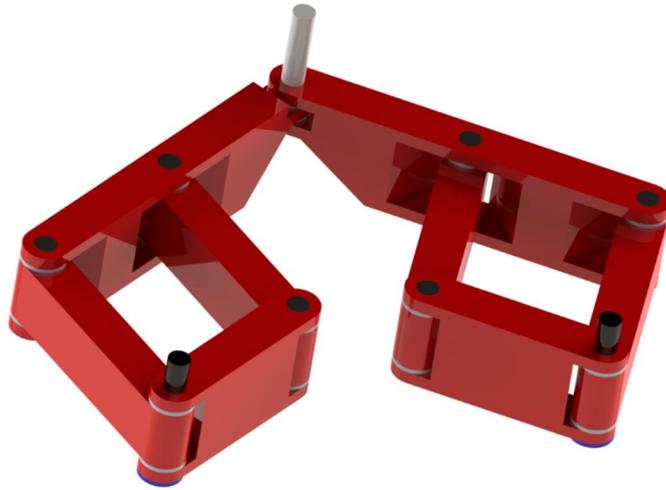
A primeira questão a ter em atenção, prende-se com o facto de se tornar necessário realizar encaixes entre as barras e, portanto, decidiu-se que seria do modo representado na Figura 4.2. As duas barras possuem um furo passante para colocar um pino que fará a centragem dos furos e o guiamento das barras, permitindo que exista apenas rotação entre estas. O atrito existente devido ao contato entre barras é reduzido com a colocação de anilhas entre essas zonas de contato. Outra questão centra-se na necessidade de alargar essas zonas de encaixe, pois as barras estarão sujeitas a movimentos de rotação, umas em relação às outras e, como tal, se fosse feito um encaixe à medida elas não rodariam. A forma de se ultrapassar este problema também é perceptível na Figura 4.2.



*Figura 4.2 - Representação do encaixe das barras*

As barras mais altas têm 23mm de altura, e as outras têm 15mm. É extremamente importante salientar que estas dimensões foram pensadas para uma solução que será impressa em material de plástico e portanto torna-se necessário implementar uns valores que garantam o mínimo de rigidez às peças. Obviamente que a construção de um protótipo passará, em princípio, por material injetado o que permite reduzir na altura e possivelmente na largura das peças. De notar que embora possam ser mais pequenas terão claramente maior rigidez.

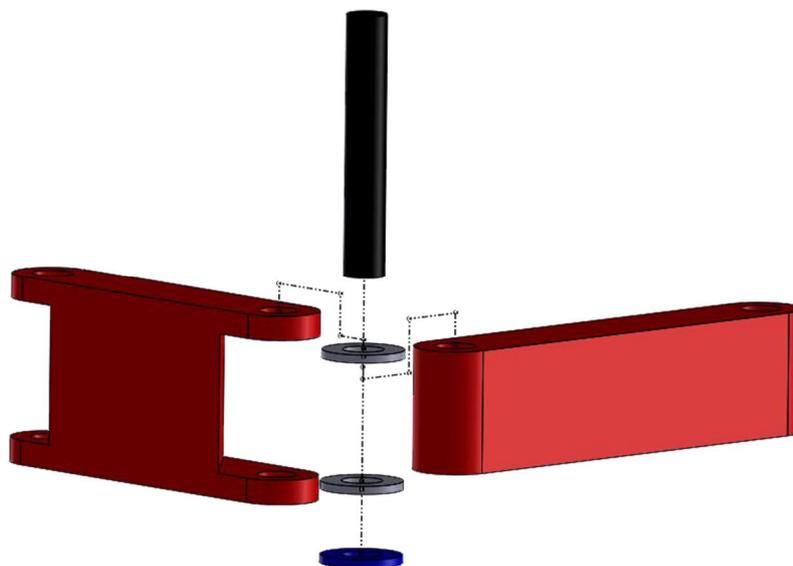
Posto isto, é apresentado na Figura 4.3, a primeira solução 3D concebida.



*Figura 4.3 - Mecanismo paralelo desenvolvido em 3D*

Os dois pinos pretos que se sobressaem na figura são os pinos de fixação e como tal toda a estrutura se movimenta em relação a ambos. São eles os responsáveis por fixar a estrutura à caixa. Na base do mecanismo, orientadas pelos mesmos pinos, estão anilhas, de maneira a que a estrutura não entre em contato diretamente com a base da caixa. Tal como já foi referido, o contato entre todas as barras é realizado através de anilhas e são ligadas por pinos que permitem rotação. O pino na zona terminal tem como função servir de manípulo, numa fase inicial, apenas para movimentar o mecanismo.

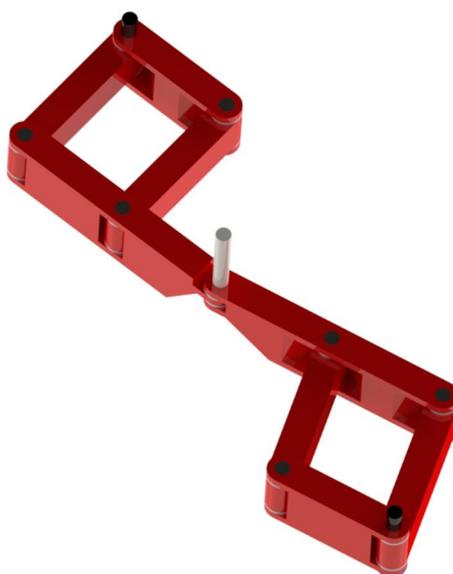
Na Figura 4.4, está representada uma vista explodida, para poder perceber a ligação das barras ao pino de fixação.



*Figura 4.4 - Vista explodida da zona de fixação do mecanismo*

É colocada uma anilha (a azul na Figura 4.4) por baixo da barra de maior altura e centrada com o furo. As duas anilhas a cinzento são também centradas com o furo da barra mas colocadas na zona interior. A barra de menor altura é alojada entre essas duas anilhas tendo também o seu furo centrado com o das anilhas e da barra de maior altura. O pino de fixação é colocado na zona dos furos e atravessa todo o conjunto.

Tendo em conta os requisitos do projeto, tal como as dimensões do dispositivo e do espaço de trabalho, procede-se a novas alterações na estrutura. A grande diferença incide na passagem de um dos pinos de fixação para o lado oposto da caixa, Figura 4.5.

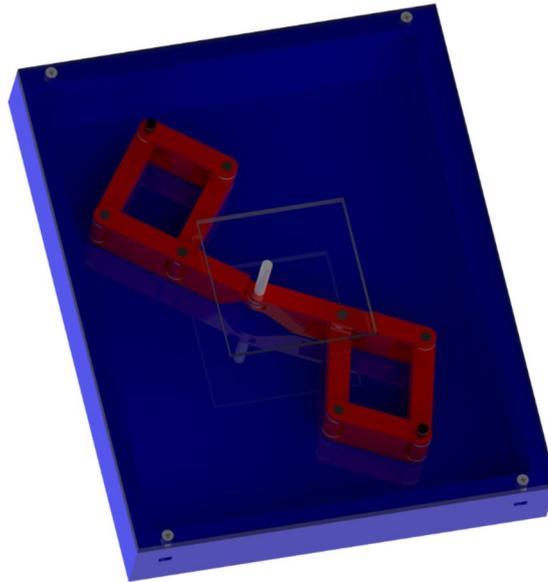


*Figura 4.5 - Mecanismo paralelo com as partes de fixação nas extremidades conforme solução estudada*

É concedida assim uma maior rigidez ao mecanismo, tendo em conta cargas que sejam aplicadas perpendicularmente ao plano de movimento. Isto porque o utilizador para além de empurrar o manípulo numa determinada direção, paralela ao plano horizontal, tem muitas vezes tendência em pressionar o manípulo para baixo, causando um maior esforço na estrutura.

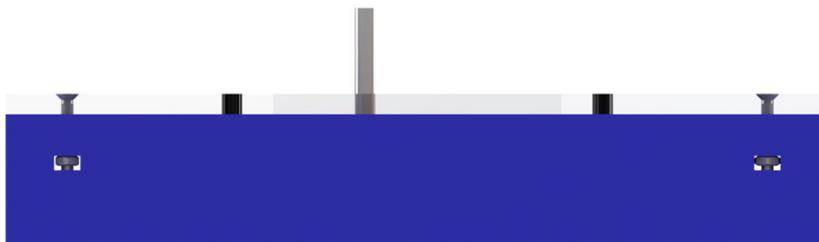
Para além disso, permite uma melhor distribuição da mesma pelo espaço total assim como um melhor posicionamento do espaço de trabalho podendo estar mais centrado em relação à caixa.

Nesta solução de conceito foi concebida também uma caixa, com uma dimensão de 200x200x37mm, para alojar a estrutura e fixar os pinos, e que pode ser visível na Figura 4.6. O objetivo é validar a robustez da solução encontrada para a ligação/fixação das diferentes barras.



*Figura 4.6 - Mecanismo paralelo alterado com caixa*

A fixação da tampa é realizada através de parafusos, que roscam nas porcas alojadas na caixa, um pouco abaixo da tampa. Este modo de fixação é perceptível na Figura 4.7, assim como é notório nesta vista os pinos de fixação do mecanismo alojados na tampa, sendo que também estão alojados na base da caixa.



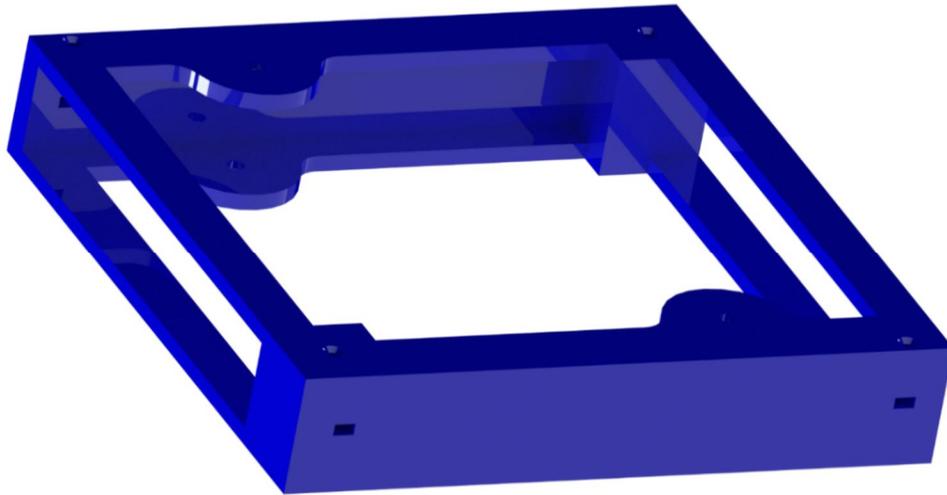
*Figura 4.7 - Modo de fixação da tampa*

Decidiu-se assim, passar para uma solução impressa, de modo a estudar o comportamento real do mecanismo desenvolvido. Este tipo de impressão requer alguns cuidados nomeadamente a utilização de um plano de impressão para que a primeira camada de material depositada sirva de base para as restantes, não devendo haver uma grande variação de áreas entre camadas consecutivas. De referir também que as dimensões das peças projetadas devem ter em conta “tolerânciamentos”, isto é, possuem folga uma vez que devido às variações de temperatura as peças tendem a contrair.

Deste modo procederam-se algumas alterações ao nível da caixa e da tampa. Como se pode verificar na Figura 4.8, o fundo foi removido para evitar custos, usando-se apenas o necessário para suportar a tampa. A tampa é também impressa e tem uma

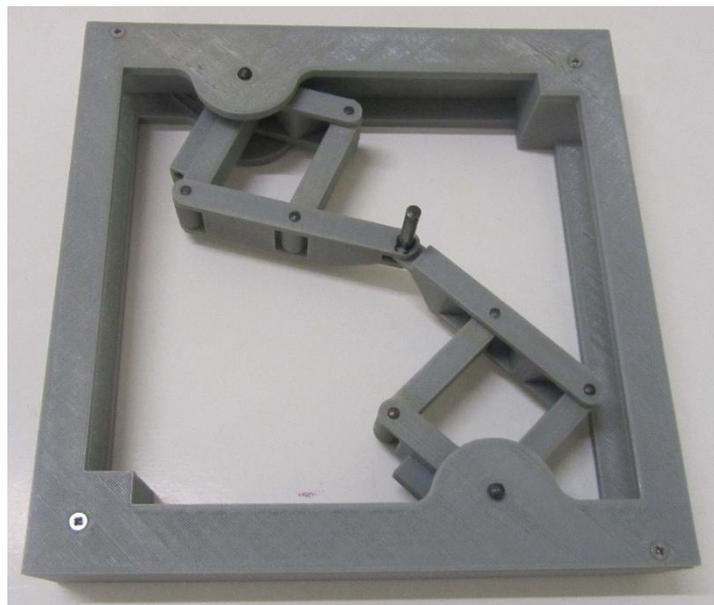
forma que permita ser fixada à base e ainda suportar os pinos de fixação. A caixa também apresenta rasgos laterais com o intuito de se tornar possível estudar os movimentos das barras que irão estar ligadas aos motores e que serão as responsáveis por controlar os movimentos do resto do mecanismo.

De salientar que tanto os pinos como as anilhas são em aço inoxidável e não impressos.



*Figura 4.8 - Caixa para impressão*

O resultado da montagem dos vários componentes (impressos) do mecanismo pode ser observado na Figura 4.9. De salientar que existem diferentes recursos no laboratório (fresadora, etc.) que foram essenciais para atingir o sistema final.



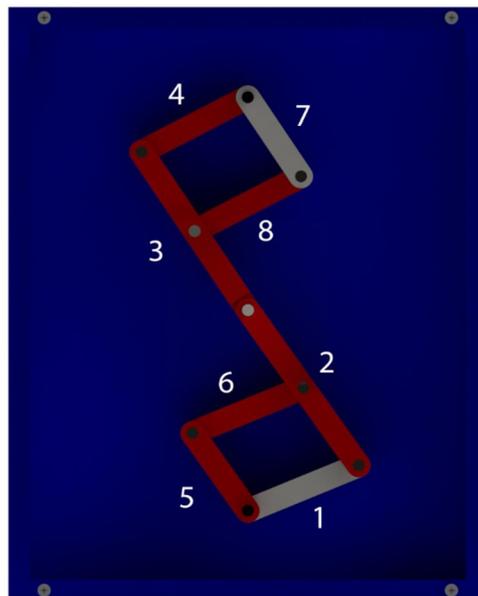
*Figura 4.9 - Solução inicial impressa*

A solução estrutural apresenta pouco atrito entre os vários componentes sendo de referir que as peças são bastante compactas assim como toda a estrutura é incrivelmente rígida, tendo em conta o seu processo de fabrico.

### 4.3 Sistema de Transmissão do Movimento

Tal como foi referido no capítulo 3, o principal ponto de partida para a implementação de uma solução de transmissão de movimento às barras, passa por primeiramente eleger as barras responsáveis por esse movimento. De seguida procurou-se abordar uma ligação que exija o menor esforço e binário do motor, que possua um baixo atrito, que seja estável, e que preferencialmente não obrigue a um aumento do volume da caixa.

A estrutura impressa facilitou o estudo e escolha das barras, responsáveis pelo acionamento (barras 1 e 7), e são representadas a claro na Figura 4.10.



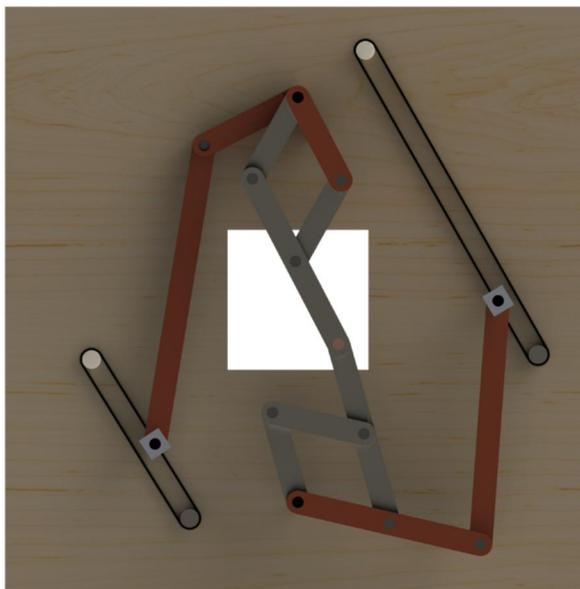
*Figura 4.10 - Representação das barras de acionamento escolhidas*

É de salientar que quando se considera, como barras atuantes, as barras 1 e 4 ou as barras 5 e 7, a estrutura apresenta dificuldades em cumprir os movimentos pretendidos. Esta dificuldade é agravada principalmente quando o ponto terminal se encontra no meio da zona de trabalho (ver Figura 4.10), existindo um alinhamento entre as barras 2 e 3 assim como entre as barras de acionamento (1 e 4 ou 5 e 7), podendo estar-se, eventualmente, na presença de uma singularidade.

Dessa constatação resultou que as barras apresentadas (1 e 7) foram as consideradas para o estudo de soluções de acionamento.

### 4.3.1 Acionamento por Correia

A primeira solução apresentada passa pela utilização de correias como modo de acionamento, Figura 4.11.



*Figura 4.11 - Representação em 2D do acionamento por correia*

Nesta solução, a barra de acionamento ligada ao pino de fixação inferior, sofre um aumento do seu comprimento e articula em uma nova barra, que por sua vez está unida a um cursor através de um pino, para permitir rotação da barra. Esse cursor está unido à correia movendo-se só quando a correia se move, ou vice-versa. Deve existir um guiamento do cursor, pois a barra terá tendência em empurrar ou puxar a correia em direções diferentes do movimento natural da correia. O movimento da correia é imposta por uma polia fixa ao eixo do motor, que se encontra colocado num extremo e é orientada por uma polia colocada no extremo oposto.

Por sua vez, à barra de acionamento superior é concebida uma forma que permita que o seu acionamento seja realizado no lado contrário ao da barra de acionamento inferior. É assim articulada a uma outra barra que segue o mesmo princípio do referido para a outra barra de acionamento.

Embora a utilização da correia como meio de transmissão de potência traga vantagens a nível de simplicidade, custo, manutenção e confiabilidade, esta solução apresenta alguns pressupostos. A necessidade de aumentar o tamanho da caixa, pois a distância entre os eixos rotativos da correia deve corresponder pelo menos à variação do ângulo da barra, sendo que se deve ainda considerar as polias e portanto aumentar a distância para as mesmas não sofrerem contato do cursor. Existe ainda o problema a nível do escorregamento entre a correia e a polia que pode diminuir o rendimento da

transmissão, assim como acrescer problemas a nível de atrito, nomeadamente na zona de guiamento.

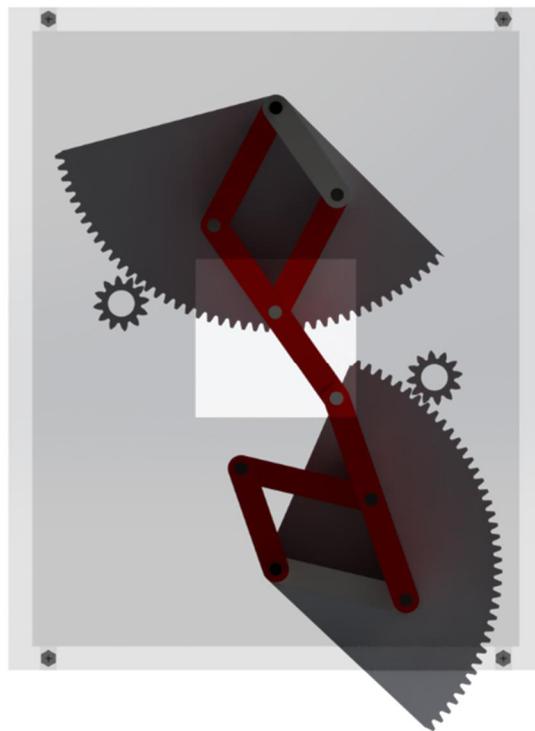
### 4.3.2 Acionamento por Engrenagem

Tendo em consideração as últimas constatações, procurou-se estudar uma outra alternativa que recorre ao uso de engrenagens.

Foram estipulados alguns requisitos para a abordagem a esta solução, nomeadamente que:

- As rodas dentadas movimentem-se dentro das dimensões de caixa estipulada;
- Exista no mínimo uma razão de transmissão de 1:10;
- Os motores encontrem-se alojados fora do espaço de trabalho;

A solução concebida é apresentada na Figura 4.12.



*Figura 4.12 - Representação em 2D do acionamento por rodas dentadas*

A barra de acionamento encontra-se solidária com a roda dentada e, portanto, movem-se de igual maneira. A roda dentada engrena no pinhão sendo que a rotação deste último é controlada pelo motor.

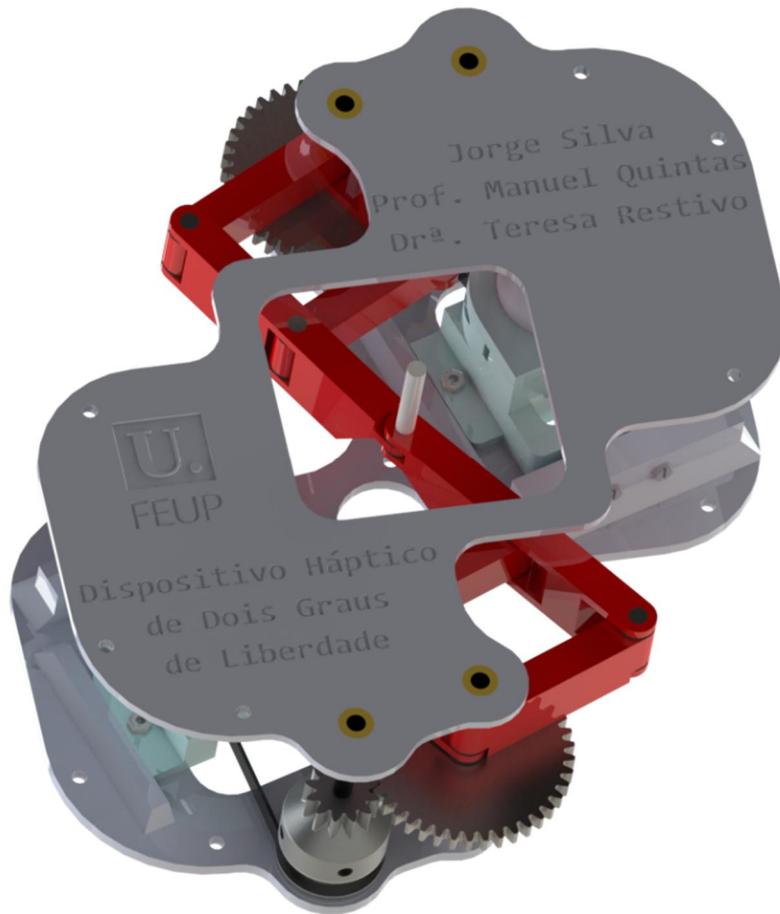
A variação de ângulo de movimento realizado pela roda dentada deve ser no mínimo equivalente ao da barra de acionamento e, portanto, não se torna necessário o uso de uma roda completa, sendo assim utilizado um setor dentado. Obviamente este setor deve ser um pouco maior que o ângulo a rodar para certificar que existe sempre engrenamento.

Através da análise da cinemática do mecanismo, percebeu-se que a variação de ângulo de uma barra de acionamento é consideravelmente inferior à outra, sendo que na barra que possui valor inferior não existiram dificuldades em cumprir os requisitos e alojar as engrenagens dentro da caixa. O setor nesse lado de acionamento apresenta um tamanho superior ao necessário, isto porque se colocou o motor e o pinhão numa zona que não intersesta-se o outro conjunto (pinhão e motor), tendo-se procurado que esse setor estivesse debaixo da zona de ação da barra de acionamento para existir uma boa fixação entre estes.

Porém, como foi perceptível na figura anterior, a barra que necessita de realizar o movimento maior impede que o setor dentado esteja totalmente alojado no espaço definido. Tal seria possível se o motor estivesse situado dentro do espaço de trabalho, o que implicaria um aumento substancial da altura do dispositivo, pois seria necessário sobrepor o mecanismo ao motor. Obviamente outra solução passaria por aumentar substancialmente o comprimento da caixa mas implicaria desrespeitar os requisitos iniciais.

### **4.3.3 Acionamento por Correia e Engrenagem**

Considerando todos os pressupostos das soluções estudadas, desenvolveu-se uma solução que utiliza como meio de atuação os princípios das duas anteriores, ou seja, recorre ao uso de engrenagens e ainda de correias, conforme é apresentada na Figura 4.13.



*Figura 4.13 - Representação da solução de acionamento por correia e engrenagem concebido*

Esta solução deriva de uma análise cuidada de determinados pormenores assim como de certos requisitos, alguns já referidos e outros que serão explicados detalhadamente ao longo da abordagem a esta solução de acionamento. Como o princípio de funcionamento é rigorosamente o mesmo em ambas as barras de acionamento, será referido apenas uma delas.

O motor possui uma polia acoplada ao seu veio, sendo que este transmite movimento para uma outra polia de maior dimensão, através de uma correia dentada que envolve as duas polias, Figura 4.14.



*Figura 4.14 - Transmissão de movimento através de correia*

Tanto os motores (Figura 4.15) como as correias (Figura 4.16) e as polias (Figura 4.17) foram adquiridos tendo recaído a sua seleção numa aproximação às dimensões já referidas.



*Figura 4.15 - Motor*



*Figura 4.16 - Correia*



*Figura 4.17 - Polia*

As suas características estão presentes na Tabela 4.1.

*Tabela 4.1 - Características da correia e das polias adquiridas*

	Correia	Polia do motor	Polia
Material	Borracha reforçada com fibra	Plástico	Alumínio
Número de dentes	79	13	36
Diâmetro externo [mm]	–	8.6	22.8
Perímetro interno [mm]	158	–	–
Passo dos dentes [mm]	2	2	2

Supondo que não existe escorregamento, a razão de transmissão provém diretamente da divisão do diâmetro da polia mandada pelo da polia mandante, ou então do número de dentes. Sabendo que a polia mandante tem 13 dentes e a outra 36, a razão de transmissão é de 1:2.77. O posicionamento da polia de maior dimensão é realizado através de um pino, com a mesma dimensão dos pinos de fixação da estrutura, e o seu comprimento dependerá da altura da caixa.

A polia possui dois furos, desfasados por 90°, com 4mm de diâmetro cada, que permite roscar dois parafusos de modo a fixar a polia ao pino. O pino roda solidário à polia, e este movimento é possível devido à existência de um casquilho de bronze em cada extremo do pino, sendo que um casquilho se encontra alojado na base e outro na tampa. Na Figura 4.18 é apresentado o guiamento da polia e do pinhão através do pino assim como a sua fixação à caixa, desenvolvido em SolidWorks.



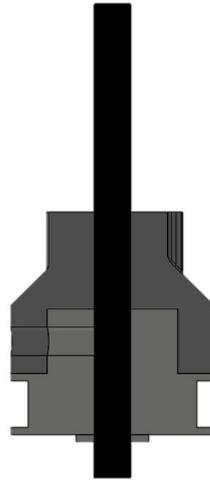
*Figura 4.18 - Representação do guiamento da polia e do pinhão desenvolvido em SolidWorks*

A Figura 4.19 apresenta o encaixe na polia do pinhão impresso na impressora 3D.



*Figura 4.19 - Encaixe do pinhão na polia*

Na Figura 4.20, é apresentada uma vista em corte do acoplamento do pinhão à polia.



*Figura 4.20 - Vista em corte do encaixe do pinhão na polia*

O pinhão possui um encaixe que envolve a zona de fixação da polia, com dois furos de igual defasamento. Assim, os parafusos, para além de fixar a polia ao pino, prendem o pinhão à polia obrigando a um movimento solidário de ambos. O movimento do pinhão é transmitido para uma roda dentada através de um engrenamento entre ambos. Considerando uma eficiência muito próxima dos 100%, assim como desprezando perdas, nomeadamente por atrito, a razão de transmissão total, isto é, entre o motor e a roda dentada provém de um produto da razão de transmissão entre o motor e a polia, pela razão de transmissão entre o pinhão e a roda dentada. Como o limite mínimo da razão de transmissão total deverá rondar os 1:10 e sabendo a razão entre as polias escolheu-se uma razão de transmissão entre as engrenagens de 1:3.50, originando uma relação final de 1:10, ou seja, dentro dos valores estipulados e ainda com umas dimensões de rodas que permitem que sejam utilizadas na totalidade e não por setores e cujos valores são apresentados na Tabela 4.2

*Tabela 4.2 - Valores obtidos para as engrenagens*

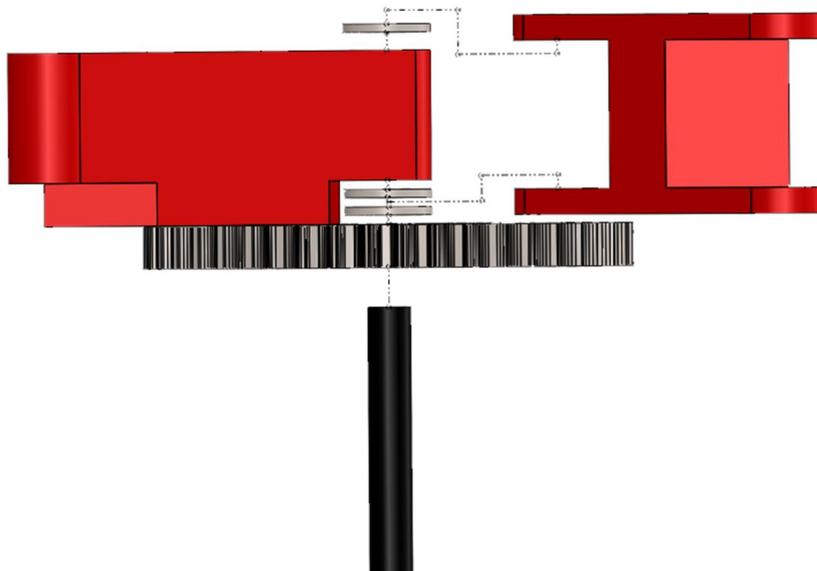
	Engrenagem mandante	Engrenagem satélite
Número de dentes	12	42
Diâmetro externo [mm]	19.41	55.79

A roda dentada encontra-se rigidamente ligada à barra de acionamento e, na Figura 4.21, é apresentada esta solução desenvolvida em CAD.



*Figura 4.21 - Representação da barra de acionamento de maior altura rigidamente ligada à roda dentada*

Na Figura 4.22 é possível observar uma vista explodida da barra de acionamento, pertencente ao conjunto de barras de menor altura, para perceber esta ligação, tal como o encaixe da outra barra que liga ao mesmo pino de fixação.



*Figura 4.22 - Vista explodida da barra de acionamento de menor altura rigidamente ligada à roda dentada*

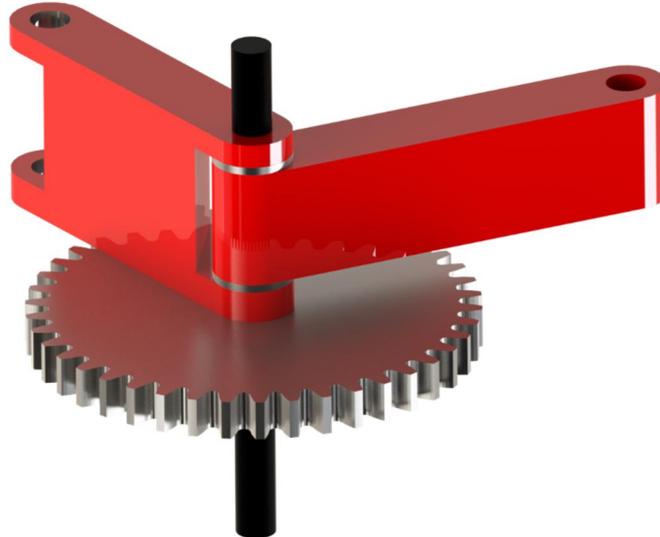
Imediatamente a seguir à roda dentada e alinhada com o furo, é colocada uma anilha para encostar a outra barra. Depois, o resto do encaixe entre as duas barras é idêntico ao inicialmente utilizado. De referir duas alterações na barra de acionamento, que consiste na sua extensão até à roda para se tornar então rigidamente ligada, e

ainda dois rasgos nessa zona para permitir que as barras possuam rotação nas zonas das articulações. Na versão final desta barra de acionamento (Figura 4.23) considerou-se apenas o setor da roda dentada necessário para o movimento de maneira a poupar material.



*Figura 4.23 - Barra de acionamento de maior altura com setor dentado*

Como as barras de acionamento são diferentes é apresentada na Figura 4.24 uma vista da barra de acionamento com maior altura, rigidamente ligada à roda dentada.



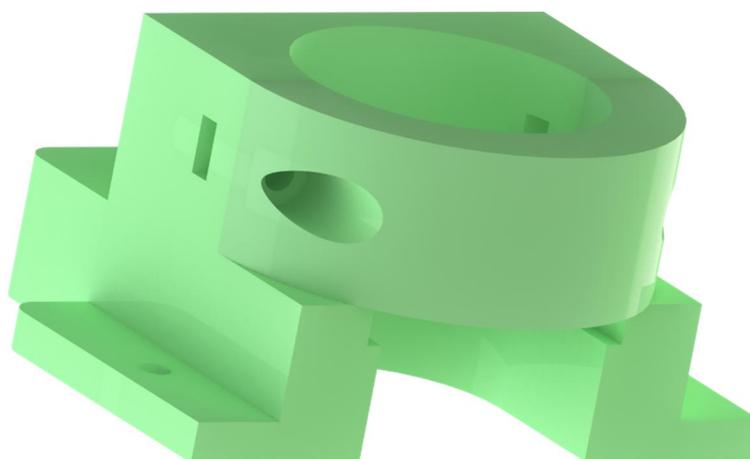
*Figura 4.24 - Representação da barra de acionamento de maior altura rigidamente ligada à roda dentada*

Como neste caso a barra de acionamento é aquela que possui maior altura, a única alteração necessária seria torná-la rigidamente ligada à roda dentada. Porém, de maneira a poupar material para além de se utilizar o setor dentado optou-se também por realizar um encaixe na roda dentada de maneira a encaixar a barra de acionamento já existente que resultou do teste de validação estrutural. O setor dentado da barra de maior altura é apresentado na Figura 4.25.

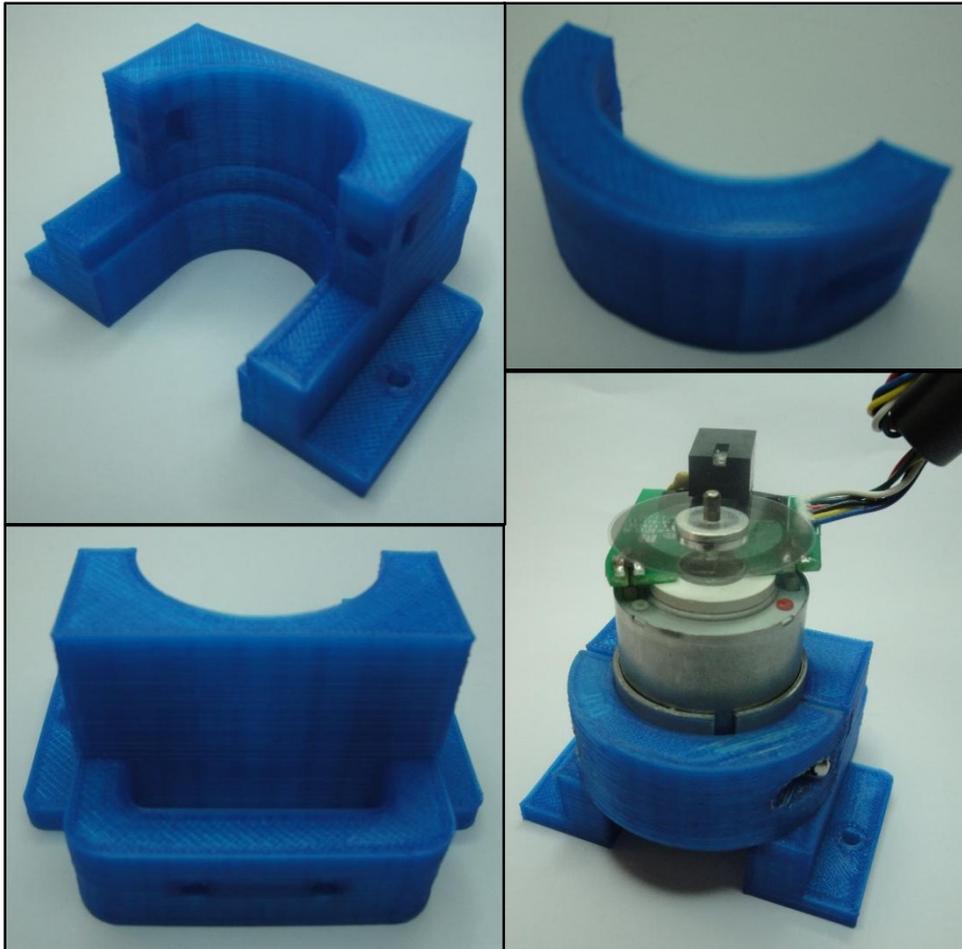


*Figura 4.25 - Setor dentado impresso com encaixe*

Tanto o motor como o seu suporte foram posicionados numa zona da caixa onde não há interferência com a estrutura. Inicialmente o motor estaria fixo ao suporte através de dois parafusos, roscados a dois orifícios próprios existentes no mesmo, mas nas duas posições possíveis do motor em relação ao suporte o seu encoder não evita o contato com a estrutura. Como tal a fixação será através de uma peça móvel em forma de meia lua que envolve metade do motor sendo fixada ao resto do suporte por dois parafusos. Na Figura 4.26, é ilustrado o suporte do motor que o permite fixar à base, desenvolvido em SolidWorks, e na Figura 4.27 o suporte do motor impresso.



*Figura 4.26 - Representação das peças utilizadas como suporte do motor*



*Figura 4.27 - Suporte do motor impresso*

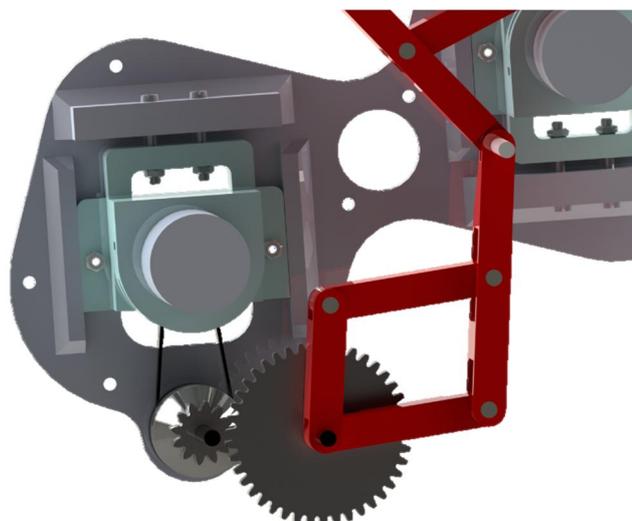
Deste modo o motor pode ser alojado segundo uma posição onde o *encoder* não interfira com a estrutura sendo depois aparafusada a peça móvel garantindo a imobilização do motor. O suporte possui ainda na base dois furos para o fixar à base da caixa.

Existe também a necessidade em manter a correia totalmente esticada, para tal é utilizado um esticador, no qual o suporte do motor é puxado numa saliência presente na zona traseira. Na base da caixa torna-se necessário realizar adaptações para aplicar este método, Figura 4.28.



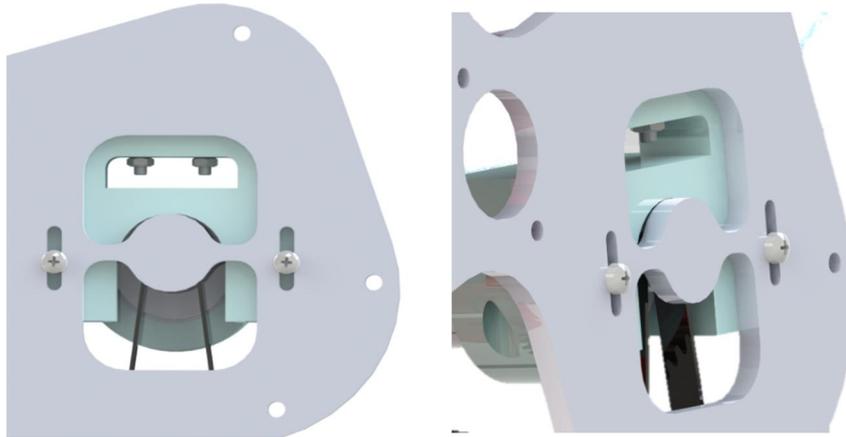
*Figura 4.28 - Representação da base da caixa com modificações para o acionamento e fixação*

Assim, foi criada uma saliência na base com dois furos, onde se colocam dois parafusos que, por sua vez, atravessam os furos traseiros do suporte. Deste modo as porcas são roscadas nos parafusos aproximando o suporte da saliência e é então mantido numa posição que garanta o esticamento necessário da correia. Na Figura 4.29 é apresentada a solução que garante o esticamento necessário da correia.



*Figura 4.29 - Representação da solução que garante o esticamento necessário da correia*

Obviamente o suporte necessita de efetuar um deslocamento linear e portanto existem dois rasgos (ver Figura 4.30) de maneira a fixar o suporte à base impedindo todos os movimentos menos aquele na direção da saliência. Foram ainda criados dois guiamentos para certificar que o suporte não se desloca para os lados na presença de esforços sobre o motor.



*Figura 4.30 - Fixação do suporte do motor à base da caixa*

É importante referir que, uma vez que foi sempre dada especial atenção ao facto de o material ser impresso e estarmos perante uma prova de conceito, decidiu-se que tanto a base da caixa como a tampa seriam uma espécie de escantilhão com a única função de guiar todos os pinos. Foi portanto retirado todo o material desnecessário não só devido a uma questão de poupança mas também devido ao tamanho da tampa ultrapassar os limites máximos de impressão. Na Figura 4.31 apresenta-se a base da caixa do mecanismo impressa.



*Figura 4.31 - Base da caixa impressa*

Nos furos onde encaixam os pinos de fixação da estrutura e os pinhões estão alojados os casquilhos de bronze fixados por aperto, de maneira a reduzir o atrito existente entre os pinos e a caixa. Existem também dois furos na parte central que servem para fixar esta base a uma placa de madeira pois tanto a base como a tampa possuem muito pouca espessura não sendo capazes de suportar estruturalmente todo o mecanismo. Os restantes furos existem para alojar veios roscados que atravessam tanto a placa de madeira como o resto da caixa de maneira a conceder ao dispositivo uma boa rigidez. Estes veios são fixos à base de madeira, à base da caixa e à tampa através de porcas.

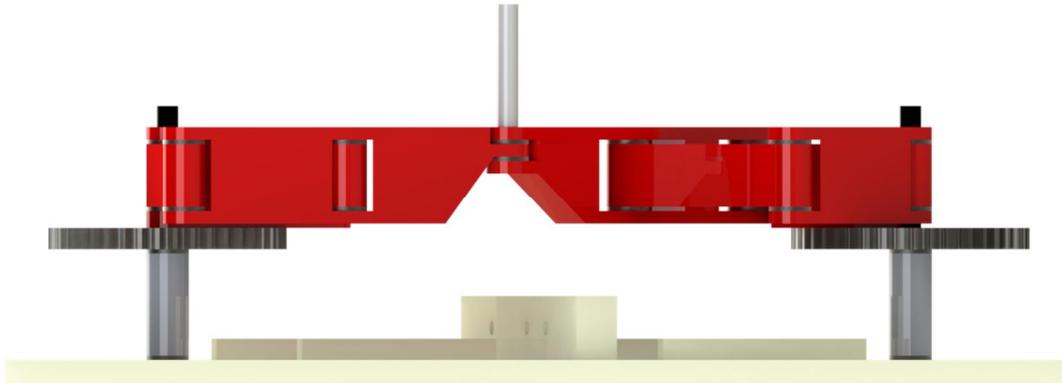
A tampa (Figura 4.32) possui uma dimensão maior comparativamente com a base pois só se encontra fixa pelos veios roscados e possui no centro a forma que define o espaço de trabalho.



*Figura 4.32 - Tampa da caixa impressa*

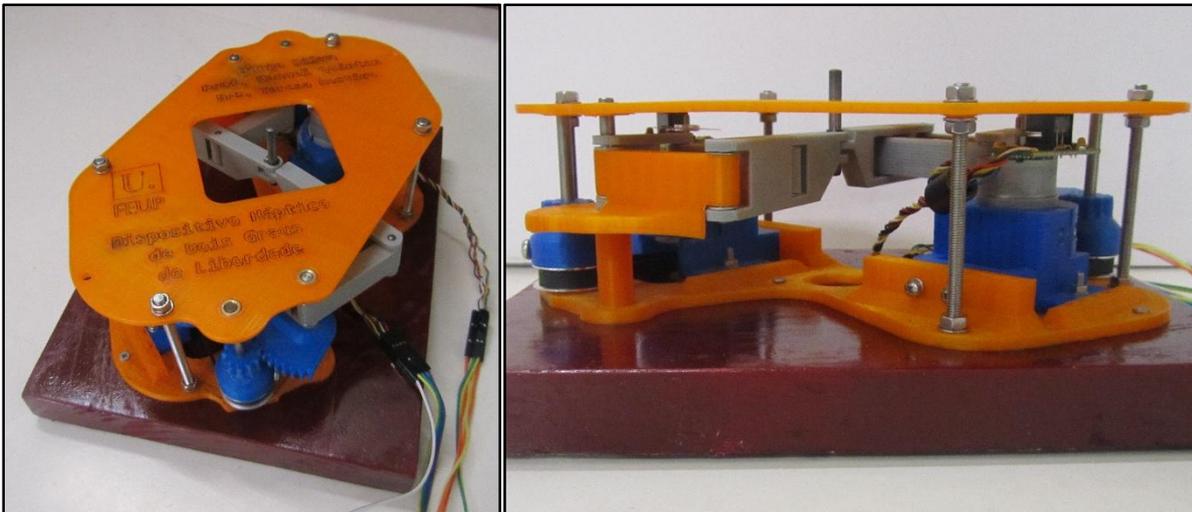
Foi estipulado que a altura da caixa rondasse os 70mm e, para tal, tornou-se necessário dispor todos os componentes em lugares que permitissem cumprir o requisito. Como o motor, na vertical, ocupa praticamente os 70mm torna-se necessário colocá-lo com as suas extremidades o mais próximas possível dos limites da caixa e, portanto, o primeiro acionamento por correia estaria o mais próximo da base ou da tampa. Tendo em consideração o facto de a estrutura necessitar de estar próxima da parte superior da caixa para não conferir um manípulo demasiado longo, optou-se por colocar o acionamento mais perto da base para conferir uma melhor distribuição e também para que a polia mandada não se encontre demasiado suspensa, sendo que a colocação de uma anilha é suficiente para, na ausência de aperto suficiente da polia ao pino, ela não se deslocar para baixo colocando em causa todo o acionamento. A estrutura é colocada na posição pretendida recorrendo à colocação de um casquilho impresso em cada pino

de fixação como se pode visualizar na Figura 4.33. Entre cada casquilho e a base e também entre o este e a roda dentada existe uma anilha que faz esta separação para reduzir o atrito.



*Figura 4.33 - Representação da elevação da estrutura através de casquilhos*

Na Figura 4.34 apresenta-se a solução final do mecanismo desenvolvido para prova de conceito.



*Figura 4.34 - Mecanismo final*

## 4.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os projetos mecânicos referentes ao mecanismo escolhido e às soluções de acionamento adotadas e discutidos criteriosamente os detalhes fundamentais ao funcionamento do mesmo.

A utilização da impressora 3D permitiu criar peças com geometrias complexas e obtê-las num curto espaço de tempo, caso contrário não teria sido possível obter o sistema final apresentado.

O mecanismo provou apresentar uma boa rigidez tendo em conta o facto de o material ser impresso. Deste modo a utilização de materiais poliméricos e com maior leveza permite uma redução de custos sendo que podem ser utilizados em gamas de forças que outros não conseguem. Esta rigidez deve-se também ao facto de o espaço de trabalho se situar entre os dois pontos de fixação, configuração que resultou dos estudos desenvolvidos no capítulo 3.

Uma distribuição cuidada de todos os componentes permitiu obter um dispositivo fisicamente e globalmente equilibrado.



## **5 Projeto e Desenvolvimento do Sistema Elétrico/Eletrónico**

### **5.1 Introdução**

Após o estudo e conceção cuidada de toda a componente mecânica que envolve a prova de conceito do dispositivo háptico de 2 GL, torna-se importante desenvolver uma solução eletrónica que permita comandar o dispositivo e torná-lo autónomo. Como já foi previamente referido, um dos requisitos desta dissertação apontava para que tanto a arquitetura de comando como a de controlo do dispositivo háptico seja baseada na utilização de microcontroladores.

Assim, este capítulo vai começar por fornecer alguma informação relevante sobre os microcontroladores nomeadamente algumas das suas principais características e vantagens. Posteriormente será apresentado o circuito eletrónico desenvolvido assim como expostos alguns dos seus componentes utilizados. Por último será abordada a programação realizada e exposto o algoritmo de controlo implementado.

É de salientar que esta dissertação não prevê a implementação da lei de comando do sistema por razões de exequibilidade temporal. O objetivo aqui visado é demonstrar que o circuito eletrónico desenvolvido é capaz de operar a solução de estrutura háptica implementada neste trabalho.

### **5.2 Microcontrolador**

Um microcontrolador (Figura 5.1) corresponde essencialmente a um circuito integrado que incorpora num mesmo elemento um microprocessador programável, memória RAM (Random Access Memory), memória ROM (Read Only Memory), barramentos de comunicação e elementos integrados personalizados (periféricos) [88].

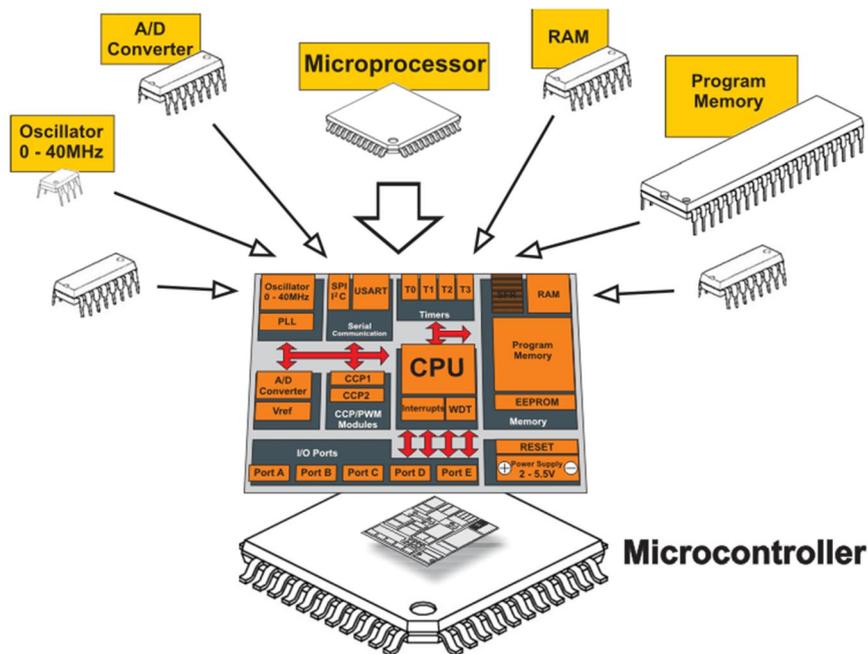


Figura 5.1 - Esquema da estrutura de um microcontrolador [89]

Os microprocessadores de uso geral necessitam da adição de outros periféricos de forma a poderem ser utilizados. Porém, os microcontroladores incluem os mais diversos periféricos tais como portas I/O digitais, conversores analógicos/digitais, osciladores internos, entre outros.

Os microcontroladores utilizados nesta dissertação são disponibilizados pela empresa *Microchip* e destacam-se pela utilização de uma arquitetura *Harvard*, ou seja utilizam dois barramentos distintos que permitem transferir os dados e ler as instruções de programa simultaneamente. São baseados na utilização de um microprocessador RISC (Reduced Instruction Set Computing) dotado de um conjunto bastante simples e reduzido de instruções que lhe confere uma maior fluência de dados através da CPU e uma maior velocidade de funcionamento.

Tendo em conta as características mencionadas, comparativamente a elementos de comando como é o caso de um autómato, o microcontrolador destaca-se essencialmente pelo seu baixo preço, avançamento reduzido e muito baixo consumo energético.

### 5.3 Arquitetura

Como é expetável, um requisito primordial para a solução implementada também a nível de eletrónica é o seu custo reduzido e ainda o seu baixo consumo energético. Para além disso pretende-se que a solução desenvolvida possa ser expansível e de fácil integração com trabalhos futuros pelo que deverá ter, portanto, um carácter modular. É portanto, inevitável o recurso aos microcontroladores.

Foi requisito deste trabalho que o sistema se encontre preparado para comunicar via USB com um computador e comandar os dois motores CC atuantes da estrutura háptica. Para tal foi implementada a arquitetura presente na Figura 5.2.

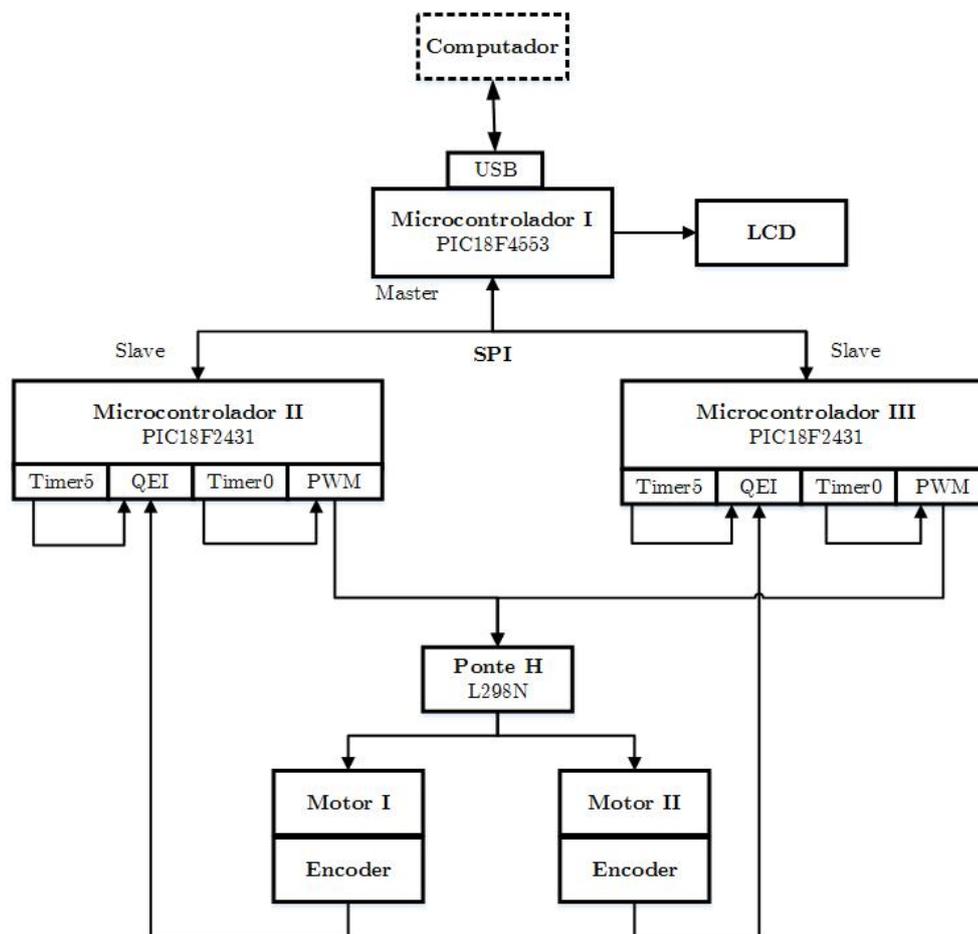


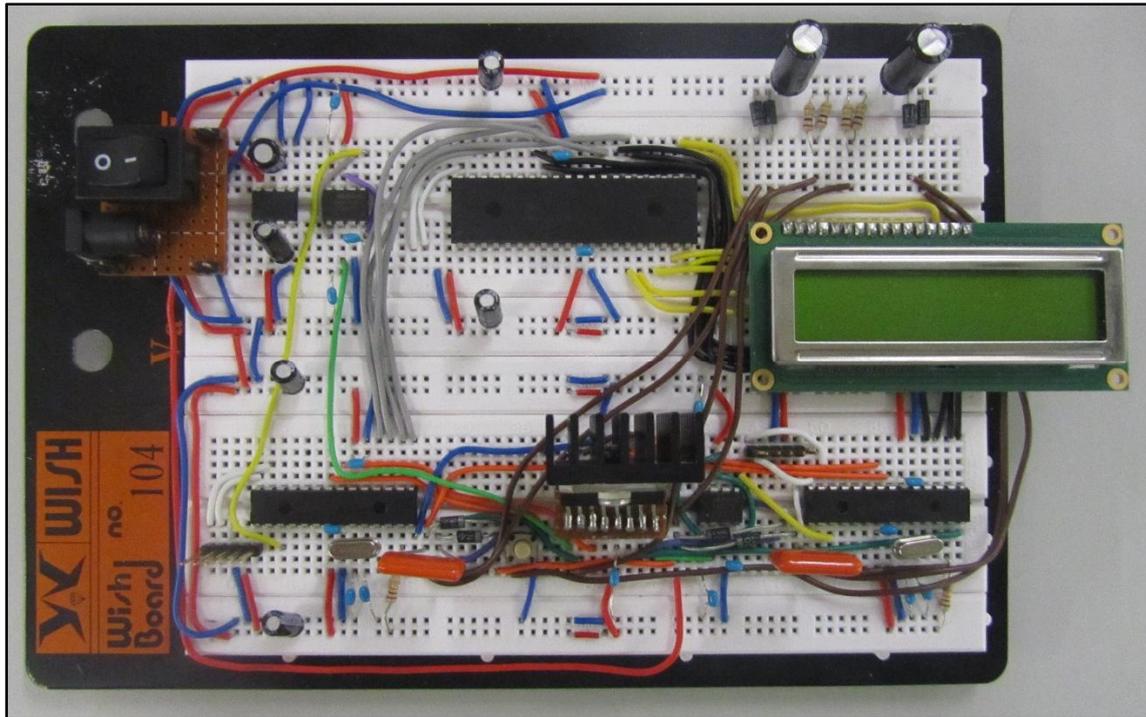
Figura 5.2 - Diagrama ilustrativo da arquitetura implementada

O ambiente virtual (computador) deve poder enviar informações, nomeadamente posição, ao dispositivo háptico. Para tal, é utilizado o microcontrolador I (*Master*) que será responsável por receber essas informações através de uma comunicação USB. Este microcontrolador é ainda responsável pela comunicação com os microcontroladores II e III (*Slaves*), através de uma comunicação SPI. Numa fase inicial de testes, o *Master* também transmite informação para o LCD não sendo, posteriormente, necessário o uso deste *display*.

Os microcontroladores II e III são responsáveis pelo controlo dos motores. Estes microcontroladores *Slave* enviam o sinal do módulo de PWM (Pulse-Width Modulation) para os respetivos motores recorrendo ao *Drive* L298N, que possui duas pontes H. Por sua vez o módulo QEI possibilita a leitura dos *encoders* que permitem determinar a posição e o sentido dos motores.

## 5.4 Circuito Eletrónico

Na Figura 5.3 é apresentado o circuito eletrónico implementado para o controlo do dispositivo. Foi utilizada uma placa de teste, sendo utilizado um microcontrolador PIC18F4553 que recebe a informação de dois microcontroladores PIC18F2431 responsáveis pelo controlo dos motores. Para verificar o correto funcionamento dos motores foi utilizado um *display* LCD.



*Figura 5.3 - Circuito eletrónico implementado*

Na Figura 5.4 é apresentado o respetivo esquema elétrico (ver Anexo A), desenhado com a ajuda do *software* EAGLE 6.4.0. Nesta figura é possível observar todos os constituintes eletrónicos e as respetivas ligações existentes.

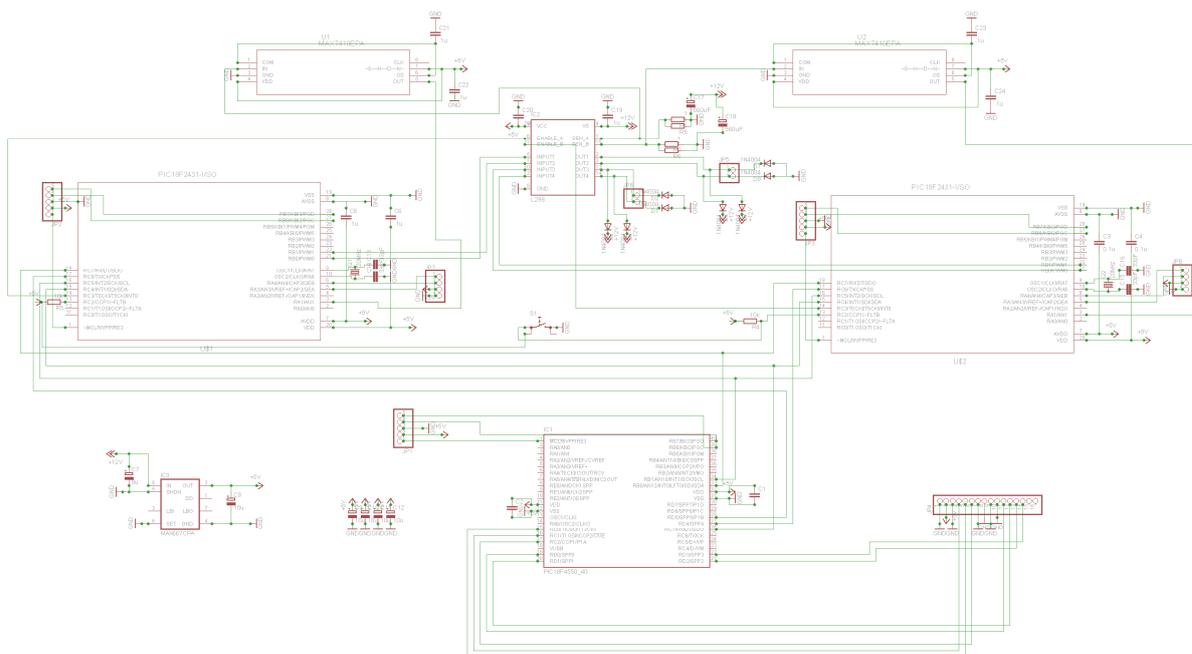


Figura 5.4 - Circuito esquemático da placa de circuito desenvolvida (ANEXO A)

## 5.5 Componentes Eletrónicos

Nesta secção são apresentados e abordados com maior detalhe os vários elementos presentes no circuito eletrónico desenvolvido e ainda a devida justificação da escolha de cada um face às respetivas necessidades.

### 5.5.1 Microcontroladores

Um dos vários requisitos nesta dissertação pressupõe que o dispositivo desenvolvido seja capaz de comunicar com outros dispositivos (por ex. computador) através de uma comunicação USB. Como tal, a escolha recaiu sobre o microcontrolador PIC18F4553 que possui uma interface para comunicação USB 2.0 (12 Mbit/s). Este microcontrolador pertence à família de 8 bits da *Microchip* e a velocidade do oscilador interno varia entre 32 kHz a 8 MHz. Possui treze portas para o módulo conversor analógico/digital de 12 bits, o que significa que também se encontra preparado para recolher dados de eventuais sensores a integrar no dispositivo.

Na Figura 5.5 é possível observar o número de portas disponíveis neste microcontrolador assim como as respetivas funções associadas a cada porta.

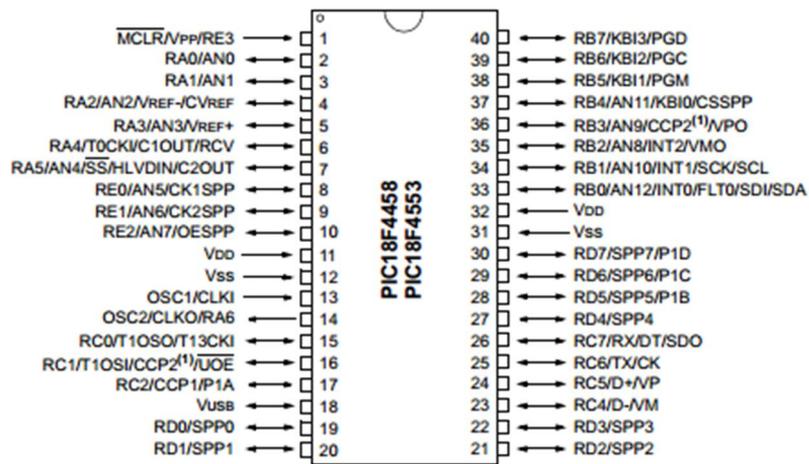


Figura 5.5 - Diagrama de pinos do microcontrolador PIC18F453 [90]

Salienta-se que este microcontrolador será também o responsável por enviar qualquer tipo de informação para o LCD e comunica com os outros microcontroladores através do modo SPI.

Na Tabela 5.1 é apresentada uma lista que refere a utilização de cada um dos pinos do microcontrolador.

Tabela 5.1 - Lista de pinos utilizados do microcontrolador PIC18F453

Pino	Utilização	Pino	Utilização
1	Programação (MCLR)	21	LCD
2	-	22	LCD
3	-	23	D- (USB)
4	-	24	D+ (USB)
5	-	25	-
6	-	26	SDO (SPI)
7	-	27	Porta digital RD4 (SPI - Master)
8	-	28	Porta digital RD5 (SPI - Master)
9	-	29	-
10	-	30	-
11	V <sub>DD</sub>	31	V <sub>SS</sub>
12	V <sub>SS</sub>	32	V <sub>DD</sub>
13	-	33	SDI (SPI)
14	-	34	SCK (SPI)
15	LCD	35	-
16	LCD	36	-

17	LCD	37	-
18	V <sub>USB</sub> (USB)	38	-
19	LCD	39	Programação (PGC)
20	LCD	40	Programação (PGD)

Como a principal função deste circuito eletrónico é controlar os motores CC utilizados no dispositivo háptico desenvolvido e como se decidiu que cada microcontrolador controla o respetivo motor, optou-se por integrar no circuito dois microcontroladores PIC18F2431. Estes microcontroladores possuem módulos de *Power Control PWM* (PCPWM) e *Motion Feedback* (MFM). O módulo PCPWM possui uma resolução de 14 bits embora deva existir um compromisso entre a sua resolução e a frequência de funcionamento. O MFM possui ainda o submódulo QEI (Quadrature Encoder Interface), que permite medir a posição angular do veio do motor, por intermédio de um *encoder* a ele solidário, o que é de especial importância nesta aplicação.

Na Figura 5.6 é possível observar o número de portas disponíveis neste microcontrolador assim como as respetivas funções associadas a cada porta

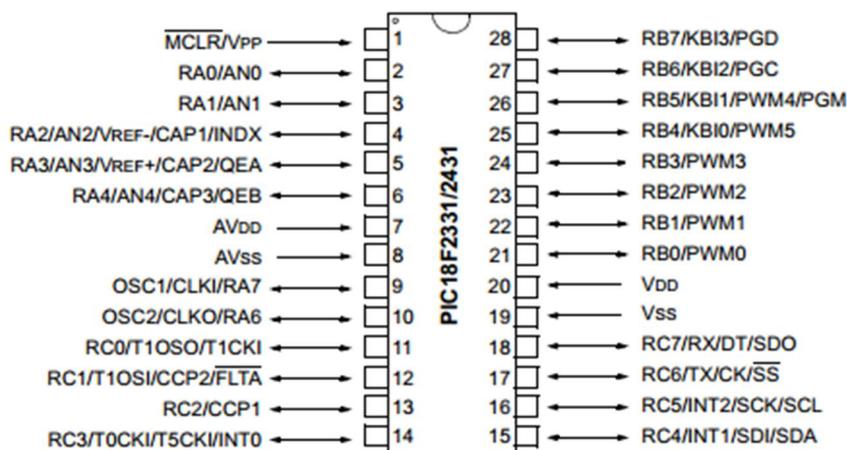


Figura 5.6 - Diagrama de pinos do microcontrolador PIC18F2431 [91]

Como cada pino de ambos os microcontroladores têm a mesma utilização é apresentada na Tabela 5.2 a lista equivalente para ambos.

Tabela 5.2 - Lista de pinos do microcontrolador PIC18F2431

Pino	Utilização	Pino	Utilização
1	Programação (MCLR)	15	SDI (SPI)
2	-	16	SCK (SPI)
3	Porta analógica AN1 (Filtro)	17	SS (SPI - <i>Slave</i> )
4	-	18	SDO (SPI)
5	QEA ( <i>Encoder</i> )	19	V <sub>SS</sub>
6	QEB ( <i>Encoder</i> )	20	V <sub>DD</sub>
7	V <sub>DD</sub>	21	PWM0 ( <i>INPUT</i> 1 – Ponte H)
8	V <sub>SS</sub>	22	PWM1 ( <i>INPUT</i> 2 – Ponte H)
9	OSC1 (Cristal externo)	23	-
10	OSC2 (Cristal externo)	24	-
11	-	25	-
12	-	26	-
13	Porta digital RC2 (Botoneira)	27	Programação (PGC)
14	Porta digital RC3 ( <i>ENABLE</i> -	28	Programação (PGD)

### 5.5.2 Regulador de Tensão

A secção de potência deste circuito, composta pelas pontes H e pelos motores, é alimentada por um transformador de 12 V. Porém os restantes componentes do circuito são alimentados por uma tensão de 5 V, sendo portanto necessário ajustar a alimentação para estes valores de tensão utilizando um regulador de tensão. O regulador utilizado é o MAX667 da *Maxim Integrated*. Permite uma tensão de entrada de 3,5 V a 16,5 V e disponibiliza uma corrente máxima de 250 mA assim como uma tensão de 5 V. Na Figura 5.7 é apresentado o diagrama de pinos e o de montagem deste regulador.

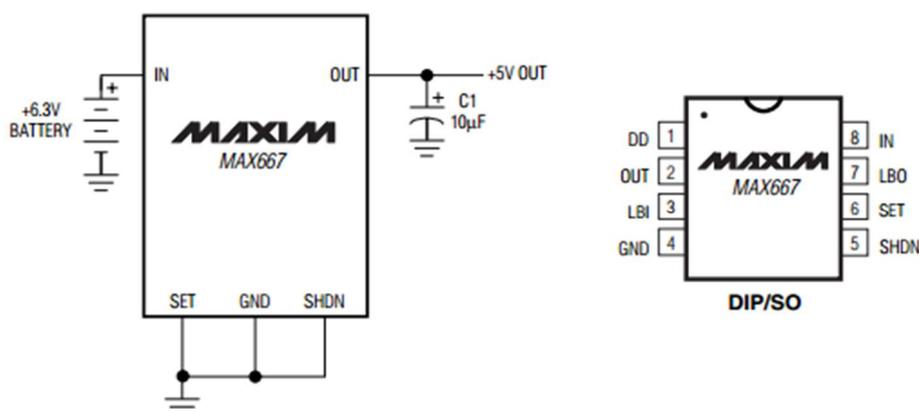


Figura 5.7 – Diagrama de pinos e de montagem do regulador de tensão MAX667 [92]

### 5.5.3 Drive L298N

Como já referido pretende-se alimentar o setor de condicionamento de sinal com uma tensão elétrica de 5 V e ainda o circuito de potência, nomeadamente as pontes H com uma tensão de 12 V. Pretende-se ainda controlar os motores CC nos dois sentidos de rotação. Deste modo, recorreu-se ao *drive* L298N da *STMicroelectronics*. Este *drive* funciona como uma interface entre os sinais de comando do microcontrolador e o motor uma vez que os motores necessitam de uma alimentação elétrica diferente da disponibilizada pelos microcontroladores. É alimentado diretamente pelo transformador de 12 V permitindo uma tensão de entrada máxima de 46 V e disponibilizando uma corrente máxima de 4 A (2 A por ponte).

O *drive* utilizado é apresentado na Figura 5.8 sendo de referir que foi incorporado um dissipador de calor com uma resistência térmica de 12.2 K/W.

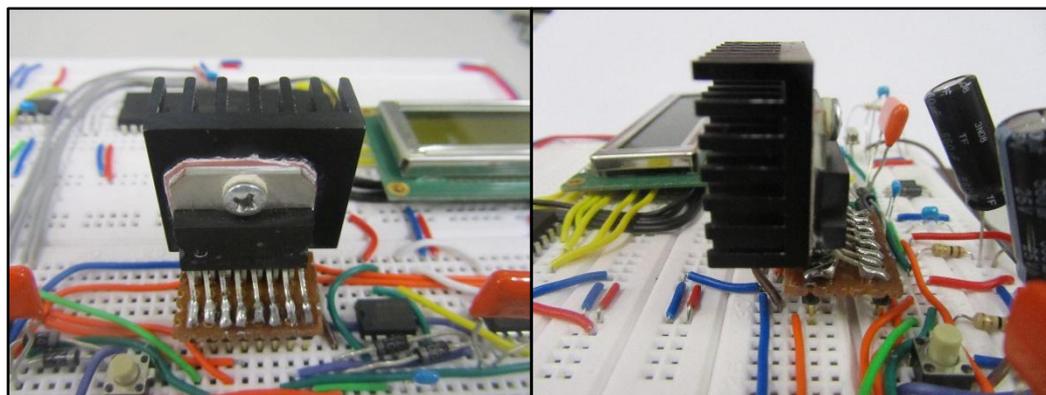


Figura 5.8 - Drive L298N com dissipador de calor

Na Figura 5.9 pode-se observar as portas disponíveis neste *drive* assim como as respetivas funções associadas a cada porta.

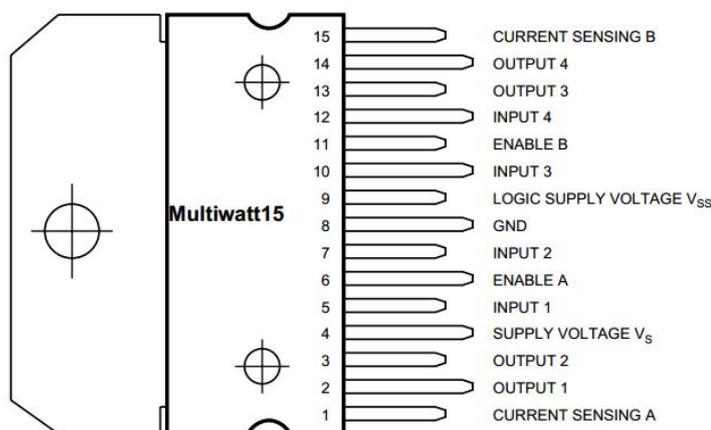


Figura 5.9 - Diagrama de pinos do drive L298N da *STMicroelectronics* [93]

Na Tabela 5.3 é apresentada uma lista que refere a utilização de cada um dos pinos do *drive* L298N.

*Tabela 5.3 - Lista de pinos do drive L298N*

Pino	Utilização
1	<i>CURRENT SENSING A (Ground)</i>
2	<i>OUTPUT 1 (Motor 1)</i>
3	<i>OUTPUT 2 (Motor 1)</i>
4	<i>SUPPLY VOLTAGE V<sub>s</sub> (alimentado pelos 19 V)</i>
5	<i>INPUT 1 (PWM0 – microcontrolador do motor 1)</i>
6	ENABLE A (RC3 - microcontrolador do motor 1)
7	<i>INPUT 2 (PWM1 – microcontrolador do motor 1)</i>
8	GND
9	V <sub>ss</sub> (alimentado pelo circuito)
10	<i>INPUT 3 (PWM0 – microcontrolador do motor 2)</i>
11	ENABLE B (RC3 - microcontrolador do motor 2)
12	<i>INPUT 4 (PWM1 – microcontrolador do motor 2)</i>
13	<i>OUTPUT 3 (Motor 2)</i>
14	<i>OUTPUT 4 (Motor 2)</i>
15	<i>CURRENT SENSING B (Ground)</i>

Como referido, este integrado possui duas pontes H e cada uma recebe o sinal do módulo de PWM em modo complementar do respetivo microcontrolador. A modulação do tipo PWM é uma técnica tradicional utilizada para controlar um circuito analógico utilizando as saídas digitais de um microcontrolador. Este tipo de modulação envolve a geração de uma onda retangular com *duty cycle* variável. Assim, tendo em consideração uma tensão de entrada de 12 V e um *duty cycle* de 10%, a tensão de saída será em média 1,2 V. Deste modo é então possível variar a tensão de saída variando o *duty cycle* [94].

Na Figura 5.10 são apresentados os sinais de PWM, visíveis no osciloscópio, para valores de *duty cycle* de 50% e 75%.

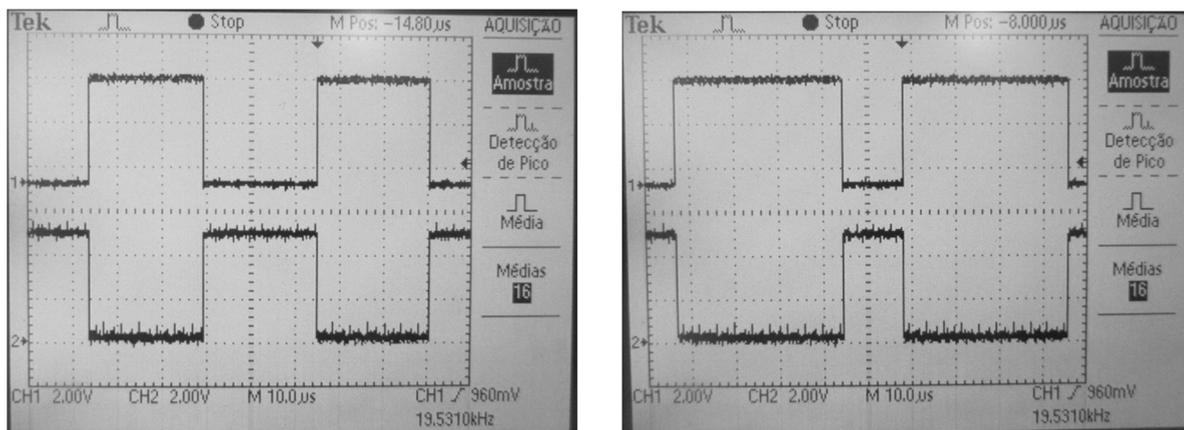


Figura 5.10 - Sinais de PWM em modo complementar gerados com duty cycle de 50% e 75%

Cada ponte H permite alimentar o respetivo motor assim como controlar o sentido de rotação de cada motor. Na Figura 5.11 é apresentado o circuito lógico implementado no *drive* L298N.

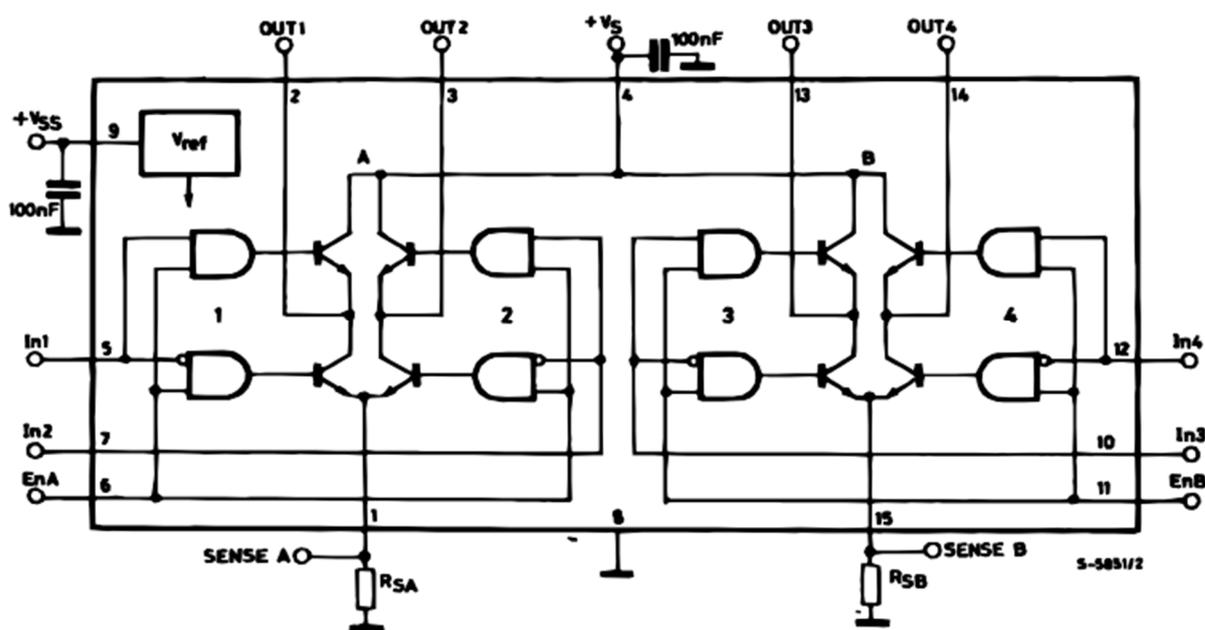


Figura 5.11 - Circuito lógico implementado no *drive* L298N [93]

A inversão da corrente elétrica de alimentação do motor traduz-se numa inversão do campo eletromagnético gerado no rotor, o que origina uma rotação no sentido contrário ao anterior. Cada ponte H permite esta inversão uma vez que possui quatro transístores sendo que ligando um par cruzado de transístores se obtém um determinado sentido de rotação e a permutação dos pares permite obter o sentido de rotação contrário.

De salientar que, em cada ponte, os emissores dos transístores inferiores, Figura 5.11, encontram-se ligados e no seu terminal externo correspondente (Sense A e Sense B) pode ser ligado uma resistência externa, cuja perda de carga aos seus terminais permite determinar a intensidade de corrente. Assim, considerando-se uma resistência de  $0,5 \Omega$  em cada terminal e tendo presente a Lei de Ohm é possível implementar, no circuito eletrónico, um conversor corrente-tensão no qual a tensão é diretamente proporcional à corrente. Esta leitura de corrente poderá ser utilizada para determinar o binário exercido pelos motores em cada instante.

É de salientar que este baixo valor Óhmico da resistência tenta evitar uma perda de carga excessiva aos seus terminais e uma variação do valor da resistência com a temperatura devido ao seu aquecimento.

#### 5.5.4 Filtros

O Motor tem baixa indutância acompanhando as transições do sinal do PWM e portanto não filtra o sinal elétrico da alimentação deste. Sendo a leitura realizada por amostragens, o sistema de aquisição “apanhava” valores de corrente muito dispare visto o trem de pulsos da alimentação de corrente não estar suficientemente suavizada/filtrada. Assim recorreu-se a um filtro passa-baixo de modo a permitir uma leitura do valor médio do sinal de corrente.

O filtro passa-baixo utilizado é o *Butterworth* de 5ª ordem que se encontra implementado no MAX7410 da *Maxim Integrated*. Este integrado é alimentado a uma tensão de 5 V.

Na Figura 5.12 é apresentado o diagrama de pinos e o de montagem deste filtro.

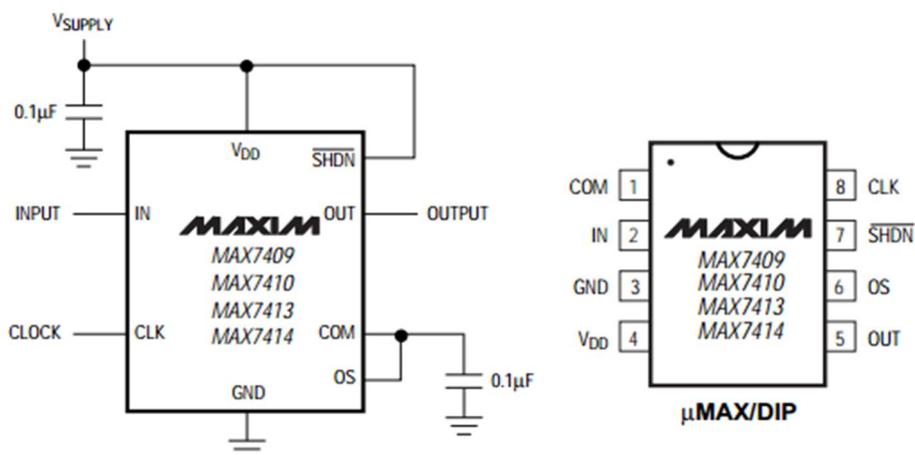


Figura 5.12 - Diagrama de pinos e de montagem do regulador de tensão MAX7410 [95]

Na Figura 5.13 é possível observar o sinal de tensão antes do filtro (Channel 1) e o sinal após filtragem (Channel 2).

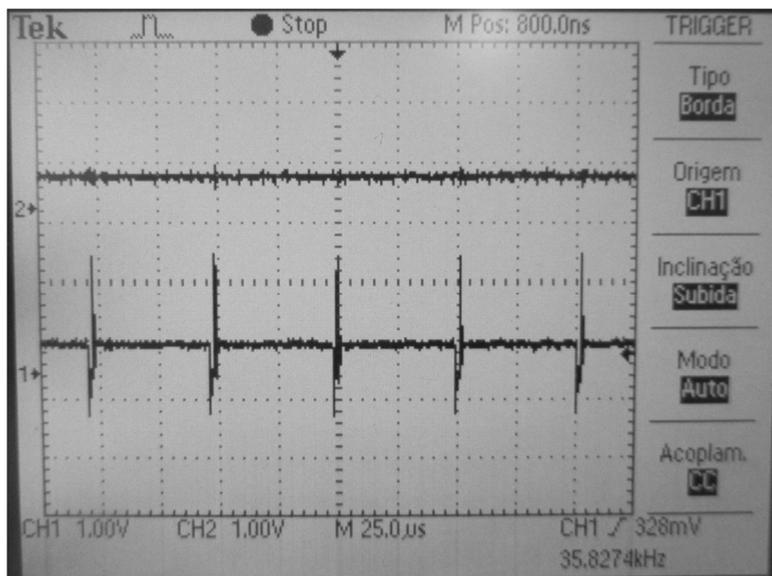


Figura 5.13 - Filtragem do sinal utilizando o filtro MAX7410

### 5.5.5 Display

Para efetuar determinados testes no circuito eletrónico foi utilizado o *display* LCD (ver Figura 5.14) da *Displaytech*. É um LCD, com retroiluminação, de 2 linhas por 16 caracteres e requer uma tensão de alimentação de 5 V [96].

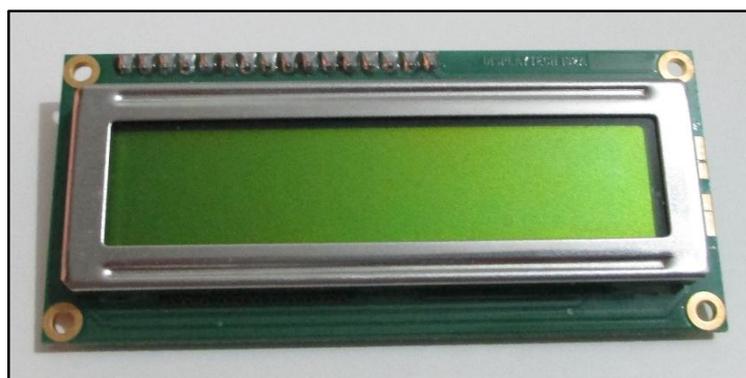
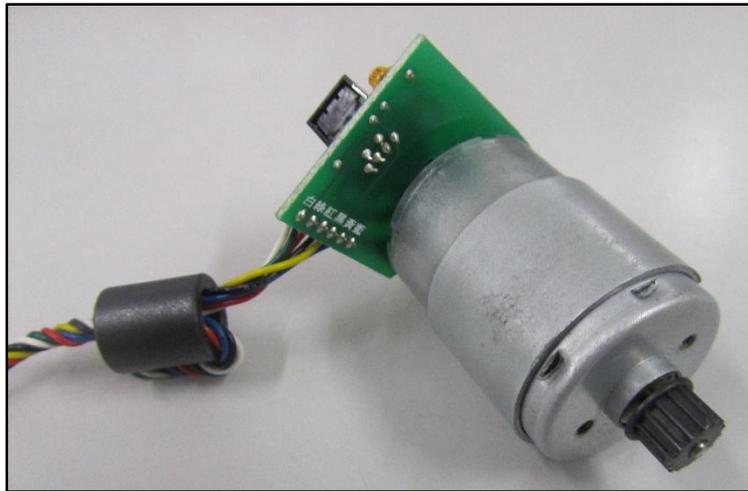


Figura 5.14 - Display LCD utilizado no circuito eletrónico

### 5.5.6 Motores CC

Os motores utilizados no projeto são os RS-385PH com *encoder*, fornecidos pela empresa *Mabuchi Motor*. Na Figura 5.15 é apresentado um desses motores.



*Figura 5.15 - Motor CC RS-385PH*

São motores de corrente contínua com escovas em carbono e as suas características estão presentes na Tabela 5.4.

*Tabela 5.4 - Características do motor RS-385PH da Mabuchi Motor [97]*

Tensão Nominal	24 V
Tensão Mínima	12 V
Tensão Máxima de Funcionamento	30 V
Corrente Máxima	2.35 A
Velocidade de Rotação sem Carga	8700 rpm
Potência Mínima	0.9 W
Potência Máxima	40 W
Peso	82 g

A posição e sentido é lido através de um *encoder* digital, Figura 5.16, que se encontra acoplado ao motor. Este *encoder* possui uma pista com 448 divisões por rotação e dois sensores em quadratura.

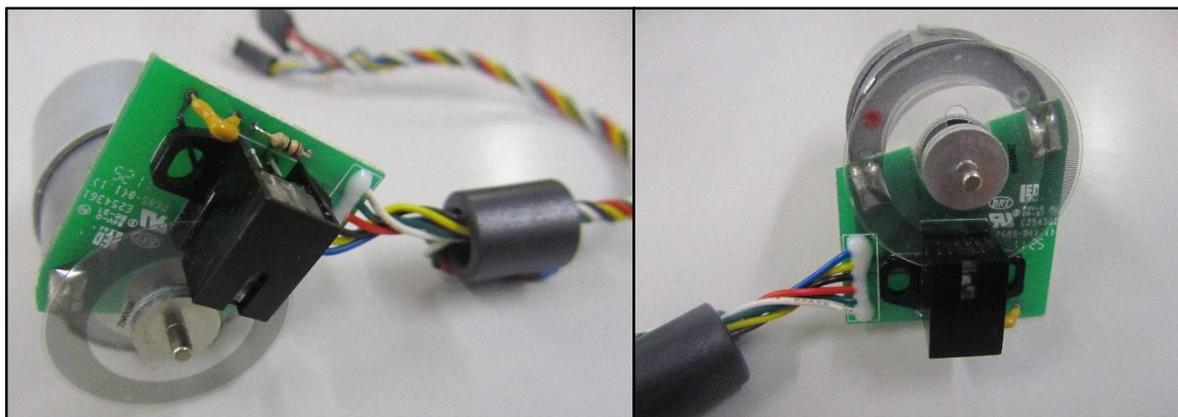


Figura 5.16 - Encoder digital incorporado no motor RS-385PH

## 5.6 Programação

Estudada a arquitetura a implementar assim como a solução para o respetivo circuito eletrónico de controlo e seus componentes procede-se à programação dos microcontroladores.

Nesta programação recorreu-se ao *software* MPLABx desenvolvido pela *Microchip* e baseou-se na linguagem de programação C. A ferramenta de programação utilizada é o PICKkit 3 da *Microchip* (ver Figura 5.17) sendo que uma vantagem é a sua compatibilidade com o MPLABx. Outra vantagem é a existência da função *debugger*, nestes programadores, que permite detetar erros e verificar o funcionamento do código implementado.



Figura 5.17 - Programador PICKkit 3 da Microchip

Entre as diversas implementações efetuadas, a nível de código, irá ser dado um maior destaque à implementação da comunicação SPI que permite que o microcontrolador *Master* comunique com os dois microcontroladores *Slave*. Será também abordada a leitura de posição pelo módulo QEI assim como os requisitos

estipulados para a escolha de uma frequência de PWM. Por último será apresentado o controlo realizado.

### 5.6.1 Comunicação SPI

A comunicação entre os microcontroladores realiza-se através do módulo SSP (Synchronous Serial Port). Este módulo permite a comunicação com outros microcontroladores e outros dispositivos periféricos como por exemplo EEPROMs e conversores A/D. O módulo SSP pode funcionar no modo SPI ou I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit).

O SPI é um protocolo síncrono que permite que um dispositivo *Master* inicie a troca de informação com um ou vários dispositivos *Slave*. Funciona no modo *full duplex* permitindo que sejam enviados e recebidos 8 *bits* de dados simultaneamente em ambos os dispositivos.

Para existir comunicação são utilizados os pinos SDO (Serial Data Out), SDI (Serial Data In) e SCK (Serial Clock). A Figura 5.18 apresenta as ligações efetuadas entre dois microcontroladores [91].

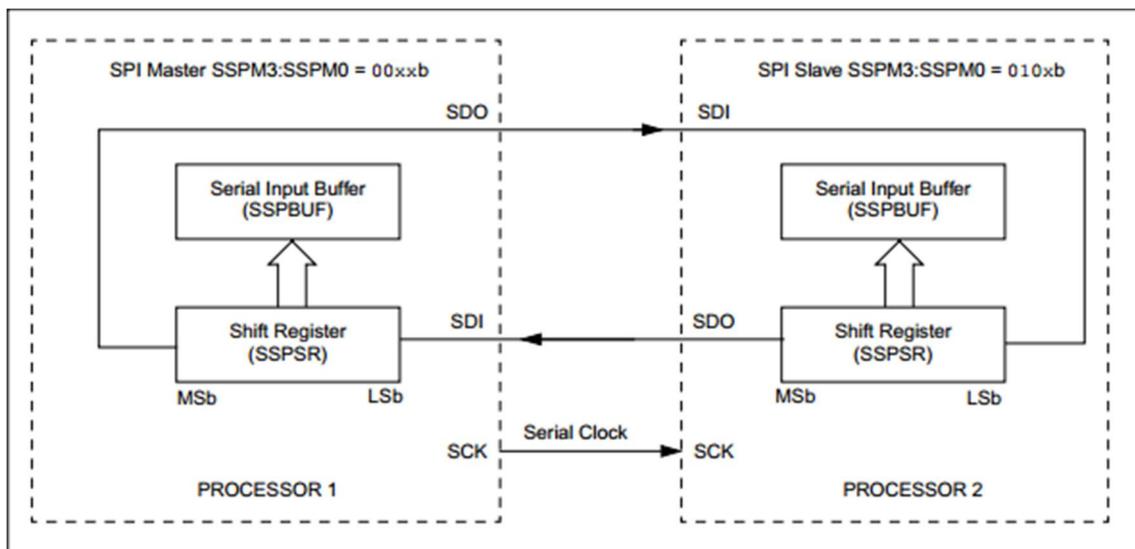


Figura 5.18 - Ligações entre dois microcontroladores no modo SPI [98]

O SDO e o SDI são responsáveis por transportar a informação sendo que os dados que saem pelo pino do SDO entram no pino SDI ou vice-versa.

Tendo em conta que se trata de um protocolo síncrono, é fornecido pelo *Master* um sinal de relógio que controla a mudança de dados e os instantes em que estes devem ser lidos. Esta sincronização é realizada através do pino SCK e salienta-se que os *slaves* não podem controlar o relógio, apenas o *Master*.

Existe ainda um quarto pino denominado SS (Slave Select) ou CS (Chip Select) e que serve para indicar ao *Slave* que o *Master* pretende trocar informação com ele. Quando está presente no sinal um nível lógico baixo significa que o SS foi ativado e portanto também a comunicação entre o *Master* e o *Slave*. Este sinal é particularmente importante perante situações em que exista mais do que um *Slave* no sistema e o *Master* necessita escolher com qual pretende comunicar.

A cada troca de informação, os dados são armazenados no registo SSPBUF sendo então este lido pelo *software*. Cada valor escrito neste registo é transferido para o SSPSR e por sua vez transferido entre dispositivos.

Após uma configuração correta dos registos, nomeadamente o registo SSPCON (Synchronous Serial Port Control) e o SSPSTAT (Synchronous Serial Port Status), o envio de um *byte* por parte do *Master* inicia a transmissão de dados [99]. Na Figura 5.19 é apresentada uma adaptação do diagrama temporal existente em [98] e que ilustra o funcionamento da comunicação SPI para os registos definidos no programa.

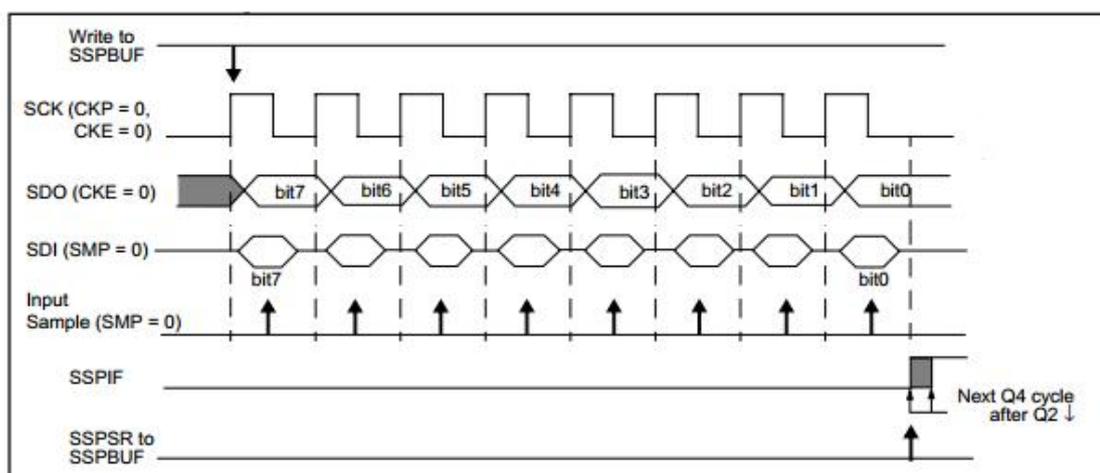


Figura 5.19 - Diagrama temporal ilustrativo do funcionamento da comunicação SPI

É transferido um *bit* por cada impulso de *clock* sendo que ao fim de 8 impulsos de *clock* é transferido um *byte* de informação. Após a transmissão deste *byte* o *bit* BF (pertencente ao registo SSPSTAT) toma o valor um, e significa que o *buffer* contém dados que ainda não foram lidos. Por sua vez a *flag* de interrupção associada ao *bit* SSPIF toma também o valor 1, no entanto o seu *reset* deve ser efetuado no *software*.

Na Figura 5.20 apresenta-se o diagrama de blocos que descreve a comunicação SPI existente entre os microcontroladores.

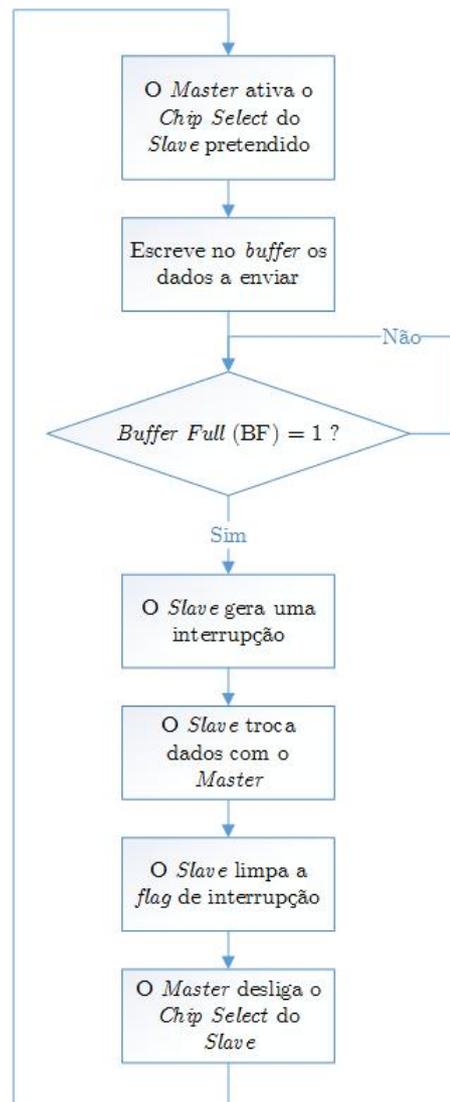


Figura 5.20 - Diagrama de blocos representativo da comunicação SPI entre os microcontroladores PIC18F2431

De maneira a ser possível verificar o correto funcionamento da comunicação SPI recorreu-se a um osciloscópio. Este permite visualizar os vários sinais presentes neste modo de comunicação. Na Figura 5.21 são apresentados os sinais de saída dos pinos SCK (Canal 1) e SDO (Canal 2) do dispositivo *Master* e que correspondem ao envio de 2 bytes.

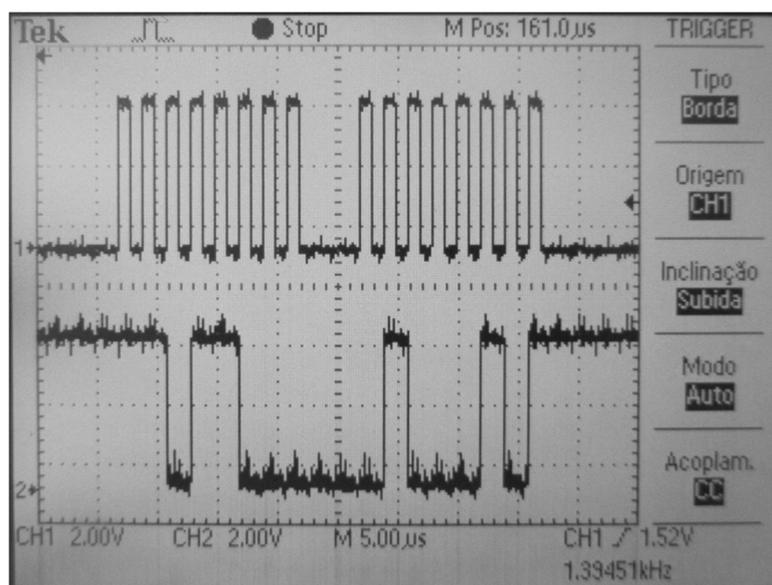


Figura 5.21 - Sinal do SCK (Channel 1) e do SDO (Channel 2) do Master

Na Figura 5.22 são apresentados os sinais SCK (Channel 1) e SDO (Channel 2) do Master sendo que os dois primeiros bytes correspondem a uma verificação para iniciar a troca de dados, os dois seguintes correspondem ao *duty cycle*, depois são os dois de posição e por último os dois de corrente.

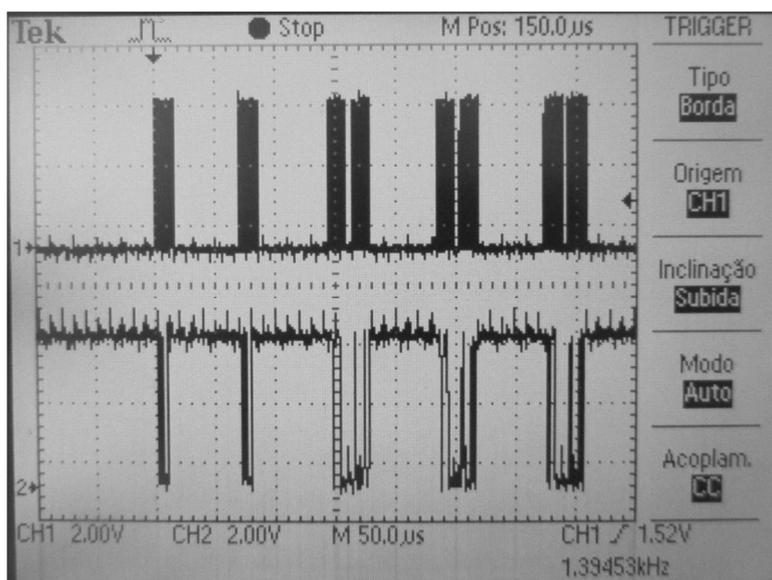


Figura 5.22 - Sinal do SCK (Channel 1) e do SDO (Channel 2) do Master, referentes a troca de dados relevantes

Na Figura 5.23 são apresentados os sinais SDO (Channel 1) do Master e o SDO (Channel 2) de um dos Slaves.

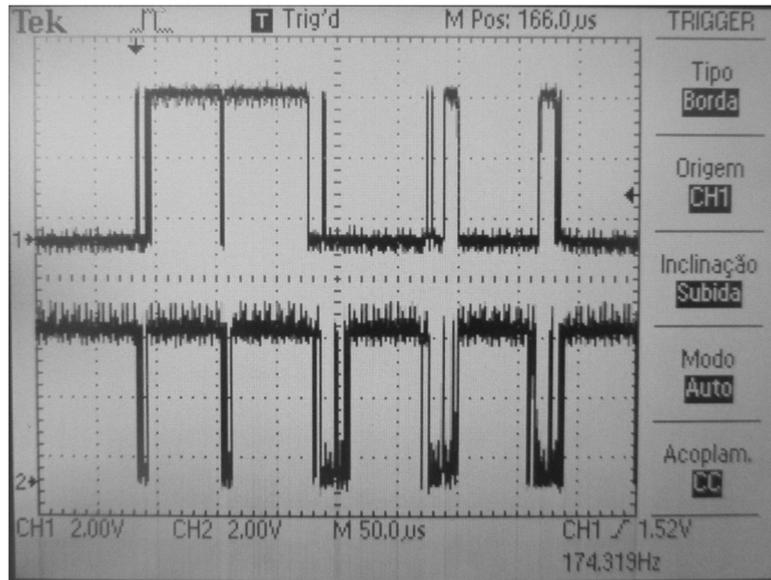


Figura 5.23 - Sinal do SDO (Channel 1) do Master e do SDO (Channel 2) do Slave

### 5.6.2 Frequência do PWM

Os motores DC podem ser comandados de diversas formas sendo que neste trabalho foi utilizada a tecnologia PWM (Pulse Width Modulation).

Para calcular a frequência do PWM recorreu-se à metodologia sugerida no *Datasheet* do microcontrolador que controla o motor [91]. Esta sugere as seguintes expressões:

$$T_{PWM} = \frac{(PTPER + 1) \times PTMRPS}{F_{OSC} / 4} \quad (5.1)$$

$$\text{Resolution} = \frac{\log\left(\frac{F_{OSC}}{F_{PWM}}\right)}{\log(2)} \quad (5.2)$$

$$F_{PWM} = \frac{1}{T_{PWM}} \quad (5.3)$$

sendo  $T_{PWM}$  o período do PWM,  $PTPER$  o registo que define o período do PWM,  $PTMRPS$  o *prescaler* do *timer* do PWM,  $F_{OSC}$  a frequência do oscilador, e  $F_{PWM}$  a frequência do PWM.

Inicialmente, procurou-se cumprir os seguintes requisitos:

- Um valor de frequência do PWM acima da frequência audível;
- Uma resolução igual ou superior a 10 *bits*;
- A utilização do cristal interno.

Tendo em conta estes pressupostos utilizou-se:

$$PTPER = 255 = 0xFF$$

$$PTMRPS = 1$$

$$F_{osc} = 20000000 \text{ Hz}$$

Obtendo-se:

$$\text{Resolução} = 10 \text{ bits}$$

$$F_{PWM} = 19531 \text{ Hz}$$

De salientar que foi imperativo colocar a frequência do PWM superior à frequência audível. Utilizando o microcontrolador à frequência máxima de 8 MHz (cristal interno) seria necessário diminuir a resolução disponível (considerou-se um mínimo de 10 *bits*), o que seria crítico uma vez que o sistema possui uma grande zona morta. Teve-se, portanto, que recorrer a um cristal externo com uma frequência de 20 MHz.

Foi também necessário definir a frequência de amostragem do algoritmo de controlo para implementar no Timer0, tendo em conta que este permite gerar interrupções em tempo real. Deste modo, definiu-se que esta frequência deve ser maior ou igual a 10 vezes as frequências que caracterizam o comportamento dinâmico do sistema a controlar, isto é, conforme à expressão:

$$f_s \geq 10f_{\max.\text{signal}} \quad (5.4)$$

Tendo em conta que não se conhecia com exatidão a velocidade destas dinâmicas, definiu-se uma frequência de amostragem de 1 KHz.

Para o Timer0 no modo 16 *bits* e com um ciclo máquina de 2:

$$T_s = 0.001 = 1ms \quad (5.5)$$

$$t_{overflow} = (2^{16} - 1) \times 0.5 \mu s \Rightarrow t_{overflow} \times N \geq 1ms \Rightarrow N = 1 \quad (5.6)$$

Uma vez que, num microcontrolador, as interrupções geradas pelos *Timers* ocorrem quando estes atingem o *overflow*, existe uma necessidade de se inicializar a contagem do *timer* de modo a que este atinja o *overflow* após apenas 1 ms e tendo em consideração que a contagem é efetuada à frequência:

$$\frac{F_{oscilador}}{4} \times \text{Prescaler} \quad (5.7)$$

Com um *prescale* de 1:1, a inicialização do Timer0 deverá ser:

$$65535 - \frac{1000 \mu s}{0.5 \mu s} = 63535 = 0xF82F \quad (5.8)$$

$$TMR0H = 0xF8 \quad (5.9)$$

$$TMR0L = 0x2F \quad (5.10)$$

### 5.6.3 Leitura de Posição

O módulo MFM é um periférico projetado para aplicações de monitorização de movimento e possui dois submódulos:

- *Input Capture (IC)*;
- *Quadrature Encoder Interface (QEI)*.

O submódulo indicado para a leitura de posição e deteção do sentido de rotação é o QEI. A configuração deste é realizada pelo registo QEICON.

O QEI permite obter a informação da posição mecânica proveniente de um *encoder* incremental. O *encoder* de quadratura possui, normalmente, três canais de saída que fornecem informação sobre o movimento do veio do motor, nomeadamente a posição angular e a direção. São eles a fase A (QEA), a fase B (QEB) e o *Index* (INDX).

Se a fase QEA conduz a fase QEB, isto significa que o motor está a rodar no sentido dos ponteiros de relógio. Se a fase QEB conduz a fase QEA então este está a

rodar no sentido contrário. O INDX é uma saída opcional que pode ser utilizada quando se pretende conhecer uma referência absoluta [100]. Na Figura 5.24 é possível observar o funcionamento destes sinais do *encoder* de quadratura.

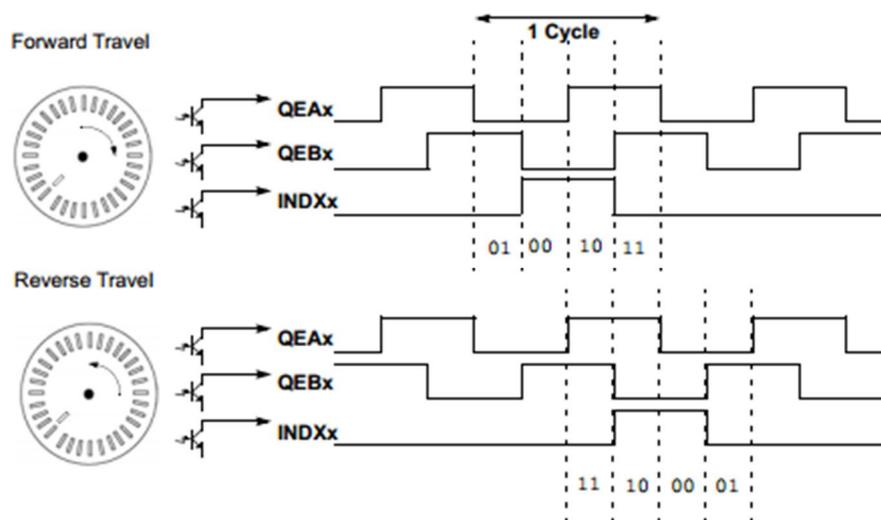


Figura 5.24 - Sinais utilizados no encoder de quadratura [100]

O modo QEI consiste na lógica do *decoder* e interpreta os sinais das fases QEA e QEB. Utiliza o registo POSCNT (Position Counter) que é responsável pela contagem de posição e contém uma resolução de 16 *bits*.

A resolução da medição de posição depende da frequência com que o registo POSCONT é incrementado. Existem dois modos para medir a posição:

- QEI x2;
- QEI x4.

Nesta leitura de posição implementada foi utilizado o modo QEI x4. O modo de atualização QEI x4 proporciona uma resolução mais fina, comparativamente com o modo QEI x2. Deteta as transições ascendentes e descendentes de ambas as fases QEA e QEB enquanto que o modo QEI x2 apenas deteta as transições ascendentes e descendentes da fase QEA [91].

Na Figura 5.25 é apresentada a leitura de posição pelo modo QEI x2 e na Figura 5.26 a leitura de posição pelo modo QEI x4.

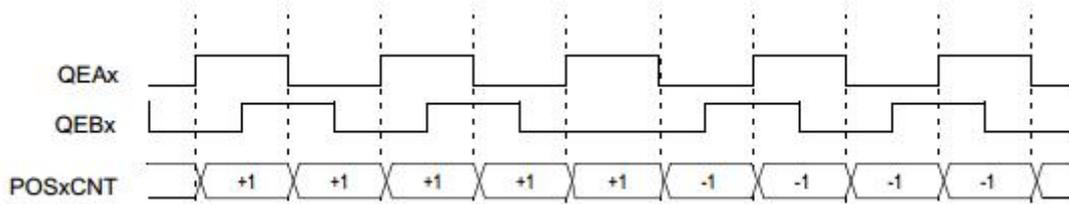


Figura 5.25 - Leitura de posição utilizando o modo QEI x2 [100]

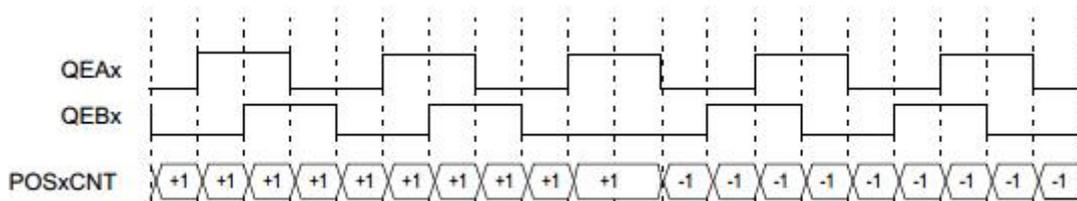


Figura 5.26 - Leitura de posição utilizando o modo QEI x4 [100]

Na Figura 5.27 é possível observar as fases QEA (Channel 1) e QEB (Channel 2), presentes no sinal enviado pelo *encoder* de quadratura, quando o motor roda num dado sentido.

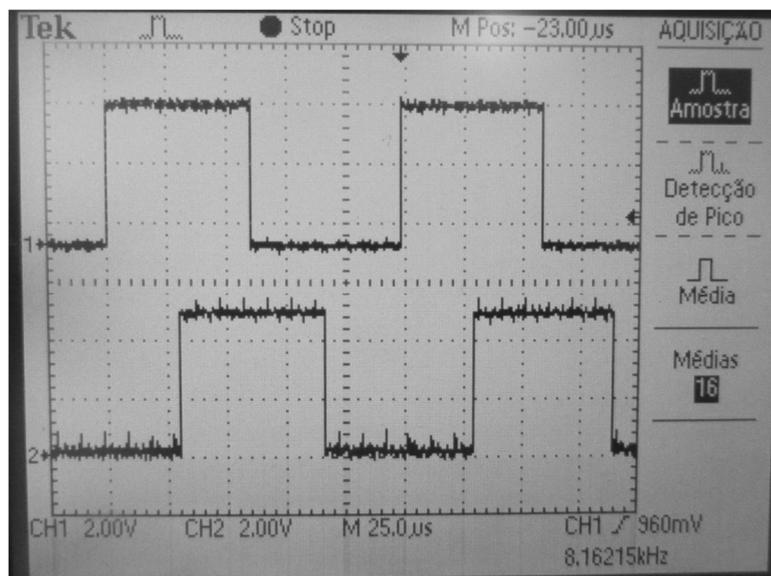


Figura 5.27 - Sinal (QEA e QEB) enviado pelo encoder de quadratura

### 5.6.4 Controlo

A dinâmica do sistema a controlar pode ser descrita como uma função de transferência de 2ª ordem e de tipo 1 [101, 102]. Na Figura 5.28 apresenta-se o diagrama de blocos correspondente ao sistema em malha aberta.

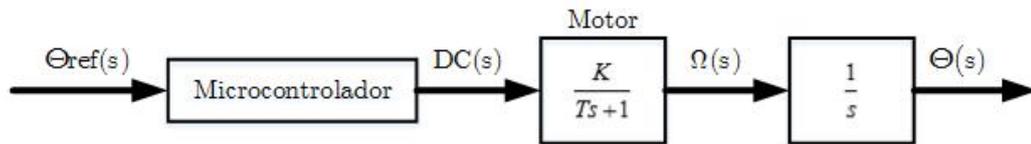


Figura 5.28 - Sistema a controlar em malha aberta

É preciso ter em atenção o facto de os motores possuírem, dentro da zona de tensão aplicada, uma zona morta proveniente das forças de atrito associadas à cadeia cinemática e, como tal, torna-se necessário implementar uma compensação no sistema. De forma a caracterizar esta zona criou-se um algoritmo no qual se faz variar o valor do *Duty Cycle* ( $DC$ ). Foi detetado que o início da rotação dos motores se dava quando:

- $DC \approx 600$ , para a rotação no sentido dos ponteiros do relógio;
- $DC \approx 417$ , para a rotação no sentido contrário.

Salienta-se que os valores de *duty cycle* apresentados correspondem a uma resolução do PWM de 10 *bits*. Portanto este varia entre 0 e 1023 sendo que o 511 corresponde à zona de inversão do sentido de rotação.

Na Figura 5.29 é apresentado o diagrama de blocos do sistema a controlar com a inclusão da compensação dos atritos dos motores.

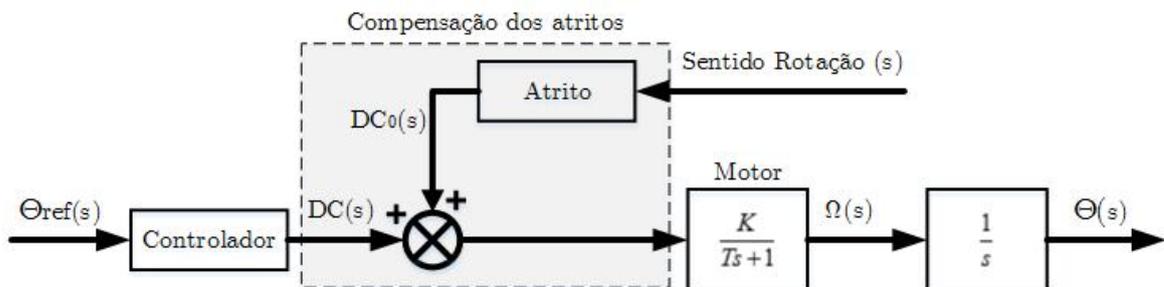


Figura 5.29 - Sistema com compensação dos atritos dos motores

Para além do requerido neste trabalho, procurou-se observar, numa fase inicial, a resposta dos motores perante um deslocamento do manípulo resolvendo-se implementar apenas um controlador proporcional. De referir que se utilizou o *encoder* para ler o sinal de saída, o que permite estabelecer uma comparação entre a saída e a entrada de referência. Na Figura 5.30 é apresentado o sistema com o controlador proporcional.

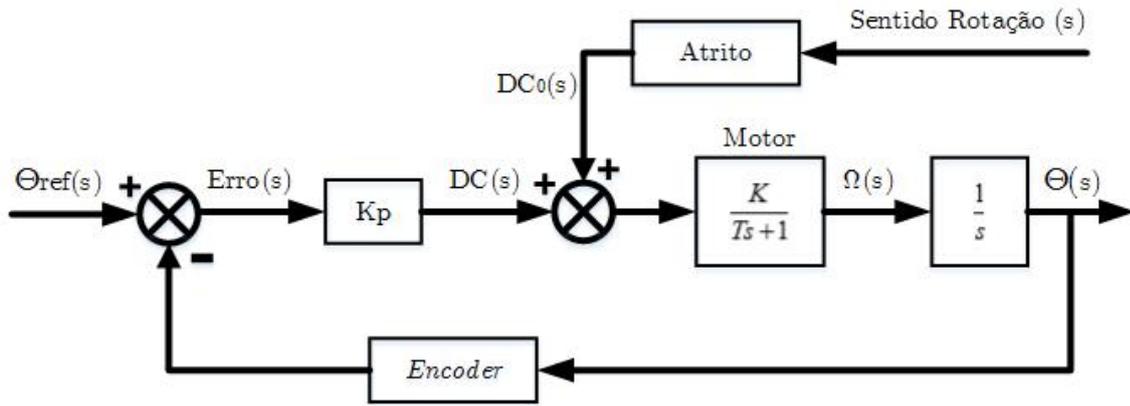


Figura 5.30 - Sistema com controlo proporcional

A ação de controlo é assim dada por:

$$U(s) = kp.E(s) = Kp.(Pref(s) - P(s)) \tag{5.11}$$

Esta ação é posteriormente convertida para um valor de *Duty Cycle* do PWM correspondente.

O sistema com um controlador proporcional continua a ser um sistema de 2ª ordem e de tipo 1, portanto apresenta um erro nulo na resposta ao degrau:

$$e_{ss} \approx 0 \tag{5.12}$$

De maneira a ser possível implementar a ação de controlo num microcontrolador é necessário proceder a uma discretização do domínio contínuo. Este procedimento requer a amostragem da leitura de posição fornecida pelo *encoder*, das variáveis associadas a esta e à posição de referência [103]. Definiu-se que a frequência de amostragem ( $f_{sampling}$ ) deve ser pelo menos dez vezes superior à frequência presente no sinal que se pretende amostrar [102]. Deste modo utilizou-se uma frequência de amostragem de 1 kHz tal como foi previamente referido.

A ação de controlo no domínio discreto do controlador proporcional é apresentado na equação (5.13):

$$u_k = K_p . e_k \tag{5.13}$$

Definido o controlo, implementou-se então um programa verificando-se que quando este é iniciado o manípulo pode ser movido, manualmente, sem qualquer

oposição. Quando se carrega numa botoneira existente na placa eletrónica, a posição em que se encontra o manípulo é definida como zero. Deste modo, o dispositivo reage a qualquer tentativa de deslocar o manípulo para outra qualquer posição, tentando os motores deslocá-lo para a posição definida através da botoneira.

## 5.7 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se a arquitetura implementada para controlo do dispositivo assim como o circuito eletrónico desenvolvido. Foram também abordados, com algum detalhe, os componentes introduzidos no circuito sendo que o estudo do seu funcionamento permitiu adquirir e compreender conceitos assim como realizar as ligações necessárias para a sua implementação no circuito eletrónico.

Referiu-se ainda alguma da programação efetuada a nível dos microcontroladores que permitiu testar a comunicação entre eles e o controlo dos motores utilizados.

Salienta-se que a eletrónica implementada serve perfeitamente os propósitos assim como o sistema responde às implementações efetuadas (está “vivo”).

A comunicação entre os diferentes dispositivos também é bastante fiável tendo em conta que não existe perda de informação. Esta foi observada e confirmada pela sua visualização no osciloscópio.



## 6 Conclusão e Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusão

O trabalho desenvolvido cumpre todos os objetivos inicialmente propostos, tendo sido desenvolvida uma solução para a estrutura cinemática e para a eletrônica de comando de um dispositivo háptico dotado de dois graus de liberdade.

O dispositivo háptico desenvolvido apresenta um mecanismo paralelo de nove barras ligadas. Este efetua um movimento planar com dois graus de liberdade.

O posicionamento dos pontos de ancoragem da estrutura à base do dispositivo em lados opostos ao espaço de trabalho confere-lhe uma maior rigidez assim como um espaço de trabalho situado exatamente na área central do mecanismo e por sua vez do dispositivo. A abordagem realizada a este tipo de mecanismo assim como a conveniente localização dos seus pontos de fixação permitiu contornar determinados problemas, nomeadamente ao nível de algumas das singularidades existentes.

A cadeia de transmissão de movimento utilizada recorre ao uso de correias e engrenagens exteriores, uma vez que permite conciliar a necessidade de ampliar o binário disponível nos motores com a necessidade de tornar a solução compacta e com um atravancamento adequado ao pretendido.

A utilização da impressora 3D possibilitou a criação de peças com geometrias complexas e a sua obtenção num curto espaço de tempo, tendo permitido a materialização da solução encontrada e assim, dar incentivo e avanços que conduziram ao estado avançado do protótipo desenvolvido.

A eletrônica de comando desenvolvida e baseada em microcontroladores apresenta um bom desempenho a nível de programação e execução e um atravancamento e custo reduzidos.

O protótipo desenvolvido apresenta uma alternativa às soluções atuais sendo alvo de alguns aspetos inovadores:

- Baixo atravancamento face ao espaço de trabalho definido;
- Elevada rigidez estrutural mesmo baseada na utilização de componentes de baixo peso e rigidez;
- Baixa rigidez exigida aos componentes permite utilizar materiais mais baratos mesmo para gamas de força similares às outras soluções existentes;
- Dispositivo fisicamente e globalmente equilibrado devido a uma distribuição cuidada de todos os seus componentes;
- Solução mais barata relativamente às existentes no mercado devido à utilização de microcontroladores e devido às referências feitas anteriormente.

O custo total do protótipo rondou cerca de 150€, sendo aproximadamente 25€ para eletrónica, 11€ para os motores, e 70€ para o material impresso utilizado. Prevê-se ainda que uma solução final poderá rondar um preço inferior a 75€.

## 6.2 Trabalhos Futuros

O trabalho desenvolvido poderá ser melhorado futuramente assim como poderá servir de base para o desenvolvimento de outros sistemas. Como tal, sugerem-se as seguintes implementações e/ou desenvolvimentos:

- Estudar singularidades do mecanismo de nove barras ligadas;
- Utilizar motores com maior capacidade de dissipação de calor (por ex: motores CC *coreless*);
- Reduzir o atravancamento total do dispositivo começando pela cadeia de transmissão recorrendo por exemplo a um moto-redutor CC *coreless*;
- Desenvolver um manípulo sensorizado que permita detetar a direção em que o utilizador movimenta o mesmo;
- Implementar toda a sensorização necessária para delimitação do espaço de trabalho;
- Substituir a placa eletrónica por uma PCB de maneira a reduzir o atravancamento e estudar a sua incorporação no dispositivo;
- Implementar a comunicação USB/microcontrolador/PC;
- Realizar todo o controlo do dispositivo;
- Desenvolver aplicações dedicadas que possam evidenciar e avaliar as potencialidades do dispositivo.

## Referências

- [1] LIM-FEUP-DEMEGI. *LIM-História*. Available: <http://paginas.fe.up.pt/~lim/historia.htm> [último acesso em Julho de 2014]
- [2] A. Cardoso, M. T. Restivo, M. R. Quintas, F. Chouzal, M. G. Rasteiro, J. C. Marques, *et al.*, "Online experimentation: Experiment@Portugal 2012," in *Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2014 11th International Conference on*, 2014, pp. 303-308.
- [3] P. U. Gomes, M. Rodrigues Quintas, and M. T. Restivo, "1 DOF haptic device built with parts of recycled material," in *Experiment@ International Conference (exp.at'13), 2013 2nd*, 2013, pp. 152-153.
- [4] G. C. Burdea and P. Coiffet, *Virtual Reality Technology*: Wiley, 2003.
- [5] A. S. o. M. E. ASME Landmarks, "'The Link Flight Trainer'," 18 December 2011.
- [6] *InventorVR*. Available: <http://www.mortonheilig.com/InventorVR.html> [último acesso em Julho de 2014]
- [7] TechFresh. (2014). *Vuzix HMD AV920 - C Head-Mounted Display*. Available: <http://videogames.techfresh.net/vuzix-hmd-av920-c-head-mounted-display/> [último acesso em Julho de 2014]
- [8] Wikipedia. (2014). *Head-mounted display*. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Head-mounted\\_display](http://en.wikipedia.org/wiki/Head-mounted_display) [último acesso em Julho de 2014]
- [9] A. F. International. (2014). *Military Training Systems/ MQ-9 Reaper*. Available: <http://www.armedforces-int.com/suppliers/link-simulation-training.html> [último acesso em Julho de 2014]
- [10] R. Tori, C. Kirner, and R. A. Siscoutto, *Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada*: Editora SBC, 2006.
- [11] B. B. P. a. G. J. G., "Seminar on Virtual Reality For a next generation."
- [12] U. o. M. B. Country. (2007). *Virtual reality applications*. Available: <http://www.umbc.edu/engineering/me/vrml/research/VR.htm> [último acesso em Julho de 2014]
- [13] W. Schoor, F. Bollenbeck, T. Seidl, D. Weier, W. Weschke, B. Preim, *et al.*, "VR Based Visualization and Exploration of Plant Biological Data," *JVRB - Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, vol. 6(2009), 2010.
- [14] HowStuffWorks. (2014). *HowStuffWorks "Virtual Reality Challenges"*. Available: <http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/other-gadgets/virtual-reality7.htm> [último acesso em Julho de 2014]

- [15] L. F. Training. (2014). *Lufthansa Flight Training*. Available: <http://www.lufthansa-flight-training.com/de/homeLufthansa> [último acesso em Julho de 2014]
- [16] FEUP. (2014). *ONLINE EXPERIMENTS LIM*. Available: <http://onlinelab.fe.up.pt/> [último acesso em Julho de 2014]
- [17] T. Knuuttila, "Models, representation, and mediation ". *Philosophy of Science*, vol. 72(5), pp. 1260 - 1271," 2005.
- [18] M. G. Jones, A. Bokinsky, T. Andre, D. Kubasko, A. Negishi, R. Taylor, *et al.*, "Nanomanipulator applications in education: the impact of haptic experiences on students' attitudes and concepts," in *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2002. HAPTICS 2002. Proceedings. 10th Symposium on, 2002*, pp. 279-282.
- [19] M. Mihelj and J. Podobnik, *Haptics for Virtual Reality and Teleoperation*: Springer Publishing Company, Incorporated, 2012.
- [20] J. J. Berkley, "Haptic Devices," 2003.
- [21] M. T. Lab. (2005). *Touch Lab Research*. Available: <http://touchlab.mit.edu/oldresearch/index.html> [último acesso em Julho de 2014]
- [22] K. M. Stanney, *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*: Taylor & Francis, 2002.
- [23] M. C. Lin, M. Otaduy, M. C. Lin, and M. Otaduy, *Haptic Rendering: Foundations, Algorithms and Applications*: A. K. Peters, Ltd., 2008.
- [24] B. R. Brewer, S. K. McDowell, and L. C. Worthen-Chaudhari, *Poststroke upper extremity rehabilitation: a review of robotic systems and clinical results* vol. 14.
- [25] J. Broeren, M. Dixon, K. S. Sunnerhagen, and M. Rydmark, *Rehabilitation after stroke using virtual reality, haptics (force feedback) and telemedicine* vol. 124, 2006.
- [26] M. D. Briefs. (2014). *Curictus: "Serious Games" for Stroke Rehab*. Available: <http://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/1105-mdb/features/8938> [último acesso em Julho de 2014]
- [27] C. Systems. (2010). *Photos/Video | cyberglovesystems.com*. Available: <http://www.cyberglovesystems.com/products/cybergasp/photos-video> [último acesso em Julho de 2014]
- [28] C. Lea. *Haptic Rendering and Visualization - Colin Lea*. Available: [https://sites.google.com/site/colincls/armllab/haptic\\_rendering](https://sites.google.com/site/colincls/armllab/haptic_rendering) [último acesso em Julho de 2014]
- [29] S. University. *Hapkit*. Available: <http://hapkit.stanford.edu/index.html> [último acesso em Julho de 2014]
- [30] C. Ramstein and V. Hayward, "The pantograph: a large workspace haptic device for multimodal human computer interaction," presented at the Conference Companion on Human Factors in Computing Systems, Boston, Massachusetts, USA, 1994.
- [31] N. T. Inc. (2012). *Falcon technical Specifications*. Available: <http://www.novint.com/index.php/novintxio/41> [último acesso em Julho de 2014]
- [32] F. Dimension. (2014). *Force Dimension - products - omega.3 - specifications*. Available: <http://www.forcedimension.com/products/omega-3/specifications> [último acesso em Julho de 2014]
- [33] F. Dimension. (2014). *Force Dimension - products - delta.3 - specifications*. Available: <http://www.forcedimension.com/products/delta-3/specifications> [último acesso em Julho de 2014]
- [34] H3D.org. (2008). *MOOG FCS HapticMaster* Available: [http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/MOOG\\_FCS\\_Haptic\\_Master](http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/MOOG_FCS_Haptic_Master) [último acesso em Julho de 2014]
- [35] Q. Inc. (2013). *Quanser - 5 DOF Haptic Wand*. Available: [http://www.quanser.com/Products/5dof\\_wand](http://www.quanser.com/Products/5dof_wand) [último acesso em Julho de 2014]

- [36] Geomagic. (2013). *Geomagic Touch (formerly Geomagic Phantom Omni) Overview*. Available: <http://geomagic.com/en/products/phantom-omni/overview> [último acesso em Julho de 2014]
- [37] Geomagic. (2013). *Phantom Premium 6DOF Overview*. Available: <http://geomagic.com/en/products/phantom-premium-6dof/overview/> [último acesso em Julho de 2014]
- [38] Geomagic, "Phantom Premium 1.0, 1.5, 1.5HF Device Guide," 2013.
- [39] Haption. *Haption SA - Virtuouse 3D Desktop*. Available: <http://www.haption.com/site/index.php/en/products-menu-en/hardware-menu-en/virtuose-3ddesktop-menu-en> [último acesso em Julho de 2014]
- [40] Haption. (2013). *Haption SA - Virtuouse 6D*. Available: <http://www.haption.com/site/index.php/en/products-menu-en/hardware-menu-en/virtuose-6d-menu-en> [último acesso em Julho de 2014]
- [41] F. Dimension. (2014). *Force Dimension - products - omega.6 - specifications*. Available: <http://www.forcedimension.com/products/omega-6/specifications> [último acesso em Julho de 2014]
- [42] F. Dimension. (2014). *Force Dimension - products - delta.6 - specifications*. Available: <http://www.forcedimension.com/products/delta-6/specifications> [último acesso em Julho de 2014]
- [43] M. T. Inc. (2013). *MPB 6 Degree of Freedom Haptic Interface - Specifications*. Available: [http://www.mpb-technologies.ca/mpbt/mpbt\\_web\\_2009/en/6dof/specs.html](http://www.mpb-technologies.ca/mpbt/mpbt_web_2009/en/6dof/specs.html) [último acesso em Julho de 2014]
- [44] F. Dimension. (2014). *Force Dimension - products - omega.7 - specifications*. Available: <http://www.forcedimension.com/products/omega-7/specifications> [último acesso em Julho de 2014]
- [45] F. Dimension. (2014). *Force Dimension - products - sigma.7 - specifications*. Available: <http://www.forcedimension.com/products/sigma-7/specifications> [último acesso em Julho de 2014]
- [46] A. J. Silva, O. A. Dom, #237, n. Ramirez, V. P. Vega, and J. P. O. Oliver, "PHANTOM OMNI Haptic Device: Kinematic and Manipulability," presented at the Proceedings of the 2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (cerma 2009), 2009.
- [47] V. R. A. Center. *Haptics User Study*. Available: <http://public.vrac.iastate.edu/~jmvance/RESEARCH/HapticsUserStudy/Hardware.htm> [último acesso em Julho de 2014]
- [48] PukiWiki. (2006). *Using Phantom Omni Haptic Device*. Available: <http://www.sigverse.org/wiki/en/index.php?Using%20Phantom%20Omni%20Haptic%20Device> [último acesso em Julho de 2014]
- [49] WorldNews. (2014). *Teleoperation of Comau industrial manipulator*. Available: [http://article.wn.com/view/2014/05/20/Open\\_positions\\_Postdoctoral\\_Research\\_13\\_positions\\_The\\_Depa/](http://article.wn.com/view/2014/05/20/Open_positions_Postdoctoral_Research_13_positions_The_Depa/) [último acesso em Julho de 2014]
- [50] Q. Inc. (2012). *Sensable PHANTOM OMNI :: QUARC Data Acquisition Card Support*. Available: [http://www.quarcservice.com/ReleaseNotes/files/sensable\\_phantom\\_omni.html](http://www.quarcservice.com/ReleaseNotes/files/sensable_phantom_omni.html) [último acesso em Julho de 2014]
- [51] J. A. Beckman and I. S. U. A. Engineering, *The PHANTOM Omni as an Under-actuated Robot*: Iowa State University, 2007.
- [52] P. K. Majid H. Koul, Praveen K. Singh, M. Manivannan, Subir K. Saha, "Gravity Compensation for PHANTOM Omni Haptic Interface," 2010.
- [53] T. H. M. a. J. K. Salisbury, "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects," 1994.
- [54] A. E. Saddik, M. Orozco, and M. Eid, *Haptics Technologies: Bringing Touch to Multimedia*: Springer, 2013.

- [55] Geomagic. (2013). *Geomagic Touch (formerly Geomagic Phantom Omni) Specifications*. Available: <http://geomagic.com/en/products/phantom-omni/specifications/> [último acesso em Julho de 2014]
- [56] C. Richard, "Getting a feel for dynamics: using haptic interface kits for teaching dynamics and controls," 1997.
- [57] A. Okamura. (1998). *Projects - Dexterous Manipulation Laboratory*. Available: [http://www-cdr.stanford.edu/dml/previous\\_projects/paddle/assembly.html](http://www-cdr.stanford.edu/dml/previous_projects/paddle/assembly.html) [último acesso em Julho de 2014]
- [58] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*: Springer, 2008.
- [59] T. A. B. P. L.S. Machado, T.K.L. Costa, M.T. Restivo and R.M. Moraes, "Improving Interaction in Remote Laboratories Using Haptic Devices, Proceedings of International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, REV2007," 24-26 June 2007, FEUP, Portugal.
- [60] J. M. L.S. Machado, A.M. Lopes, B.R.A. Sales, T.A.B. Pereira, D.F.L. and M. T. R. Souza, R.M. Moraes, "A Remote Access Haptic Experiment For Mechanical Material Characterization, Proceedings of the 8th Portuguese Conference on Automatic Control," pp. 870-874, ISBN 978-972-669-877-7, 2008, Vila Real, Portugal.
- [61] M. Rodrigues Quintas, Restivo, M.T., Rodrigues, J., Santos, B., "“Feeling force” 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation," REV'14, p. 326-327, IEEE Xplore, 2014, DOI:10.1109/REV.2014.6784181.
- [62] A. M. L. Maria T. Restivo, Liliane Machado, Ronei Moraes and Maria F. Chouzal, "Feeling Materials' Stiffness by Haptics for Training," accepted by Journal of Materials Education, July 2014.
- [63] C. G. Rose, J. A. French, and M. K. O'Malley, "Design and characterization of a haptic paddle for dynamics education," in *Haptics Symposium (HAPTICS), 2014 IEEE*, 2014, pp. 265-270.
- [64] R. B. G. a. A. M. Okamura, "Haptic Interaction for Hands-On Learning in System Dynamics and Controls," University of Michigan and Johns Hopkins University.
- [65] Q. M. Christensen, *Three Degree of Freedom Haptic Feedback for Assisted Driving of Holonomic Omnidirectional Wheelchairs*: Department of Mechanical Engineering, University of Utah, 2011.
- [66] G. Niezen. (2014). *Interaction devices*. Available: <http://www.pinterest.com/pin/133489576428316795/> [último acesso em Julho de 2014]
- [67] T. M. a. A. Okamura, "Hapkit Assembly Instructions," 2013.
- [68] S. online. (2014). *A Case Study: MR vs. Hall Effect for Position Sensing / Sensors*. Available: <http://www.sensormag.com/sensors/electric-magnetic/a-case-study-mr-vs-hall-effect-position-sensing-704> [último acesso em Julho de 2014]
- [69] SensorWiki.org. (2011). *sensors: force-sensitive resistor*. Available: [http://sensorwiki.org/doku.php/sensors/force-sensitive\\_resistor](http://sensorwiki.org/doku.php/sensors/force-sensitive_resistor) [último acesso em Julho de 2014]
- [70] V. Hayward. (2001). *Survey of Haptic Interface Research at McGill University*. Available: <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/bibuxton/buxtoncollection/a/pdf/VH-SFB-01.pdf> [último acesso em Julho de 2014]
- [71] M. Corporation. (2014). *Pantograph Detail*. Available: <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/bibuxton/buxtoncollection/detail.aspx?id=67> [último acesso em Julho de 2014]
- [72] C. F. I. M. (CIM). (2014). *Pantograph*. Available: <http://www.cim.mcgill.ca/~haptic/pictures/Pantograph.html> [último acesso em Julho de 2014]

- [73] G. Campion, W. Qi, and V. Hayward, "The Pantograph Mk-II: a haptic instrument," in *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, 2005, pp. 193-198.
- [74] S. F. a. S. B. Yi Zhang, "Introduction to Mechanisms," 2010.
- [75] T. A. Kern, *Engineering Haptic Devices*: Springer Science & Business Media, 2009.
- [76] C. Innocenti and V. Parenti-Castelli, "Direct position analysis of the Stewart platform mechanism," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 25, pp. 611-621, // 1990.
- [77] J. C. a. J.-W. L. Young-Hoon Chung, "Sensation: A new 2 DOF Parallel Mechanism for a Haptic Device."
- [78] S. G. Matej Rajh, Joze Flasker, Karl Gotlih, "Manipulability of a Haptic Mechanism within the Cylindrical Space of an MR Scanner," 2012.
- [79] I. The MathWorks. (2014). *MATLAB - The Language of Technical Computing*. Available: <http://www.mathworks.com/products/matlab/> [último acesso em Julho de 2014]
- [80] J. C. P. Claro, "Mecânica Geral - Capítulo II - Análise Descritiva de Mecanismos," 2007.
- [81] K. H. Hunt, *Kinematic geometry of mechanisms*: Clarendon ; Oxford University Press, 1978.
- [82] M. F. S. F. d. M. e. C. A. M. Oliveira, "Mecânica II - Cinemática," Porto - 2002.
- [83] A. AHMAD, "Kinematic and Dynamic Modeling of a 6 - DoF TAU Haptic Device," 2009.
- [84] xklsv. (2014). *Info / Atan2*. Available: <http://www.xklsv.org/viewwiki.php?title=Atan2> [último acesso em Julho de 2014]
- [85] C. A. d. M. Oliveira, *Análise Matricial de Estruturas*, 1997-1998.
- [86] F. Carneiro, "Desenvolvimento de um Sistema de Atuação e Controlo para Dedo de Luva de Reabilitação," 2014.
- [87] H. R. M. Daniali, "Instantaneous center of rotation and singularities of planar parallel manipulators," July 2005.
- [88] M. R. Quintas, "Apontamentos de Computação Industrial - Microcontroladores," Feup, 2013.
- [89] MikroElektronika. (2014). *Chapter 1: World of Microcontrollers - Book: PIC Microcontrollers - Programming in C*. Available: <http://www.mikroe.com/chapters/view/14/chapter-1-world-of-microcontrollers/> [último acesso em Julho de 2014]
- [90] Microchip, "PIC18F2458/2553/4458/4553 Data Sheet," 2009.
- [91] Microchip, "PIC18F2331/2431/4331/4431," 2010.
- [92] M. I. Products, "MAX667 +5V/Programmable Low-Dropout Voltage Regulator," 2008.
- [93] STMicroelectronics, "L298 Dual Full-Bridge Driver," 2000.
- [94] M. Barr, "Pulse width modulation," *Embedded Systems Programming*, vol. 14, pp. 103-104, 2001.
- [95] M. I. Products, "MAX7409/MAX7410/MAX7413/MAX7414 5th-Order, Lowpass; Switched-Capacitor Filters," 1998.
- [96] Displaytech, "LCD Module Product Specification - 162A Series," 2009.
- [97] M. Motor. *RS-385PH*. Available: [http://www.mabuchi-motor.co.jp/cgi-bin/catalog/e\\_catalog.cgi?CAT\\_ID=rs\\_385ph](http://www.mabuchi-motor.co.jp/cgi-bin/catalog/e_catalog.cgi?CAT_ID=rs_385ph) [último acesso em Julho de 2014]
- [98] Microchip, "PICmicro Mid-Range MCU Family Reference Manual," 1997.
- [99] Microchip. *SPI - Overview and Use of the PICmicro Serial Peripheral Interface*. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/spi.pdf> [último acesso em Julho de 2014]
- [100] M. T. Inc., "Section 15. Quadrature Encoder Interface (QEI)," 2007.
- [101] K. Ogata, *Engenharia de controle moderno*: Pearson Prentice Hall, 2011.
- [102] F. G. d. Almeida, "Apontamentos de Sistemas de Controlo," 2011.
- [103] J. Vande Vegte, *Feedback Control Systems*: Prentice Hall, 1994.



## **ANEXO A: Circuito eletrônico desenhado no *software* EAGLE**



