



**POLITÉCNICO  
DO PORTO**



# Sistema de Treino para Pilotos de Parapente

Sérgio Miguel Duarte da Silva

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Para a obtenção do Mestrado de Bolonha em  
Engenharia Electrotécnica, Sistemas Eléctricos de Energia

2010

Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Instituto Superior de Engenharia  
Instituto Politécnico do Porto

# Sistema de Treino para Pilotos de Parapente



Sérgio Miguel Duarte da Silva

Dissertação apresentada para a obtenção do Mestrado de Bolonha em  
Engenharia Electrotécnica, Sistemas Eléctricos de Energia

**Orientador: Doutor Nuno Gomes**

Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Instituto Superior de Engenharia  
Instituto Politécnico do Porto

2010

## **Resumo**

O trabalho aqui apresentado teve como principal objectivo o desenvolvimento de um simulador de voo de parapente.

O trabalho pode ser dividido em três partes.

Na primeira foi desenvolvida uma pesquisa, desenvolvimento e construção de uma estrutura física que permita a movimentação do utilizador do simulador. Depois de uma pesquisa sobre simuladores de voo de parapente na *World Wide Web* foram encontradas algumas, embora poucas, estruturas para simuladores deste tipo. Foram estudadas várias soluções, sendo escolhidas três. Das escolhidas foi feito o estudo físico e mecânico de duas delas a partir do qual foi escolhida uma, por ser a que reúne as características pretendidas nomeadamente simples construção, fácil montagem e portabilidade. Por fim realizou-se a construção da estrutura que é baseada num baloiço de criança, que foi reforçado e alterado de forma a permitir a movimentação do utilizador em profundidade e lateralmente.

Na segunda, foi feita a escolha dos equipamentos que permitem a movimentação do utilizador. Após análise a escolha recaiu sobre motores de passo-a-passo e equipamentos adjacentes, *drive* e fontes de alimentação.

Por fim, desenvolveram-se alguns programas informáticos de controlo de posição e variação de velocidade que interagem com o utilizador através dum teclado ou um *joystick*.

## ***Abstract***

The main goal of this paperwork is the development of a paragliding flight simulator.

The paperwork is divided on three parts.

On the first part was developed a research, a creation and a construction of a physical structure which allows the movements by the user of the simulator. After a research about paragliding flight simulators on the "World Wide Web", some structures for simulators like these were found, although few. Several possibilities were studied, but only three were chosen. Two of the three solutions were analyzed from which only one solution resulted. The chosen solution combines the ideal features such as simple construction, easy assembly and portability. At last, the construction of the structure was realized which is based on a child swing that was reinforced and shaped to allow the user free movements on depth and sideways.

On the second part the equipments which allow the movements of the user were chosen. After a analysis stepper motors were chosen, so as the complementary equipment, drive and power sources.

Ultimately, some programs of positioning control and speed variation were developed which can interact with the user through a keyboard or a joystick.

## ***Agradecimentos***

Registo aqui os meus agradecimentos a todos os que de, alguma forma, contribuíram para o êxito deste trabalho, em especial:

Ao Doutor Nuno Gomes, pela importante e significativa contribuição para a elaboração deste trabalho por acreditar no meu potencial propondo-me a realização de novos projectos no âmbito do trabalho;

Ao Eng. Carlos Vinhas do Departamento de Física, pelas horas de ajuda, na resolução dos problemas físicos, subentendidos deste tipo de estrutura e de movimentação;

Aos meus pais por toda a atenção, compreensão e apoio que me deram, agradecendo em especial o facto de me proporcionarem a oportunidade de estudar. Sem eles esta tese não existiria;

Aos meus colegas pelo incentivo, companheirismo, ajuda com os seus conhecimentos e algumas horas de diversão.

Autor.

*"Façam o favor de ser felizes..."*

*Raul Solnado*

*Dedicado aos meus pais.*

# ***Índice Geral***

Resumo .....	I
Abstract .....	II
Agradecimentos .....	III
Índice Geral .....	VI
Lista de Figuras .....	VIII
Lista de Siglas .....	XII
1 Introdução.....	1
1.1 Objectivo do Trabalho.....	1
1.2 Âmbito do Trabalho .....	1
1.3 Enquadramento/Motivação do trabalho .....	1
1.4 Objecto de Estudo .....	2
1.5 Organização da Tese .....	2
2 Estado da arte .....	4
2.1 Simuladores, abordagem geral .....	4
2.1.1 Simuladores de condução .....	4
2.1.2 Simuladores de desportos .....	8
2.1.3 Simuladores na área da medicina.....	10
2.1.4 Simuladores de voo .....	11
2.2 Simuladores de voo em parapente .....	12
2.2.1 Simuladores de parapente, generalidades.....	12
2.2.2 Simulador SMAAP .....	13
2.2.3 Simulador de paramotor alemão.....	14
2.2.4 Simulador de paramotor desenvolvido por Mark Deseck .....	15
2.2.5 Simulador da Active Fly .....	17
2.2.6 Simulador parapente comercial .....	18
2.3 Motores .....	19
2.3.1 Introdução aos motores de passo-a-passo .....	21
2.3.2 Aplicações dos motores de passo-a-passo.....	21
2.3.3 Constituição básica.....	22
2.3.4 Funcionamento básico.....	22
2.3.5 Classificação dos motores de passo-a-passo .....	23
2.3.6 Arquitectura e Aspectos Construtivos .....	26

2.3.7	Características dos motores da passo-a-passo .....	27
2.3.8	Regimes de funcionamento .....	31
2.4	Sistema de controlo e Tipos de <i>Drive</i> .....	34
2.4.1	Sistemas de controlo .....	34
2.4.2	Tipos de Drive .....	35
3	Estrutura .....	40
3.1	Primeiros estudos .....	40
3.2	Construção .....	43
4	Física .....	45
4.1	Formulação física .....	45
4.2	Valores obtidos .....	51
5	Motor e Sistema de Controlo .....	56
5.1	Escolha do motor .....	56
5.2	Método de controlo dos motores .....	56
5.3	Circuito Final .....	58
5.4	Sensores de mão .....	59
6	Programas de Comando .....	60
6.1	Programas de comando .....	60
6.1.1	Microsoft Visual C++ 6.0, Comando por teclado .....	60
6.1.2	Microsoft Visual Studio 2008 - Comando por sensores na estrutura .....	61
6.1.3	Microsoft Visual Basic 6.0, Comando por joystick .....	62
7	Simulação em Matlab™, Simulink .....	64
7.1	Movimentação lateral .....	64
7.2	Movimentação em profundidade .....	67
8	Conclusões e Trabalho Futuro .....	72
8.1	Satisfação dos objectivos .....	72
8.2	Trabalhos Futuros .....	73
	Referências .....	74
	Anexo A .....	-1-

## ***Lista de Figuras***

Figura 2-1 Máquinas de jogos electrónicos, “simuladores do povo” .....	4
Figura 2-2 Simulador de treino de condução, tipo 1 .....	5
Figura 2-3 Simulador de treino de condução, tipo 2 .....	5
Figura 2-4 Simulador de treino de condução, tipo 3 .....	5
Figura 2-5 Simulador de treino de condução para veículos pesados .....	6
Figura 2-6 Simulador de fórmula 1 .....	6
Figura 2-7 Simulador de fórmula 1 como tecnologia hexagonal de sistemas hidráulicos .....	7
Figura 2-8 Simulador como tecnologia hexagonal de tubos hidráulicos .....	7
Figura 2-9 Simulador <i>Force Dynamics 301 ultimate</i> .....	7
Figura 2-10 Simulador de velocípedes .....	8
Figura 2-11 Simulador de motociclos .....	8
Figura 2-12 Simulador virtual de golfe interior .....	8
Figura 2-13 Simuladores de desportos .....	9
Figura 2-14 Simulador de tiro .....	9
Figura 2-15 Simulador de esqui “doméstico” .....	9
Figura 2-16 Simulador de esqui olímpico .....	9
Figura 2-17 Simulador hípico .....	10
Figura 2-18 Simulador electrónico de nascimento .....	10
Figura 2-19 Simulador dum paciente cardíaco .....	10
Figura 2-20 <i>Simulator 747-400</i> .....	11
Figura 2-21 Simulador profissional de helicópteros <i>Fyit</i> .....	11
Figura 2-22 Simulador de combate aéreo SX02 .....	11
Figura 2-23 Simuladores básicos .....	12
Figura 2-24 Simulador hidráulico da <i>SMAPP</i> .....	13
Figura 2-25 Simulador de paramotor alemão .....	14
Figura 2-26 Simulador de paramotor alemão, pormenores dos sensores .....	14
Figura 2-27 Simulador de paramotor alemão, pormenores estruturais .....	15
Figura 2-28 Estrutura do simulador, desenvolvido por Mark Deseck .....	16
Figura 2-29 Electrónica do simulador, desenvolvido por Mark Deseck .....	16
Figura 2-30 Acelerador e travão do simulador, desenvolvido por Mark Deseck .....	17
Figura 2-31 Simulador da <i>Active Fly</i> .....	18
Figura 2-32 Responsáveis pelo projecto inglês .....	18

Figura 2-33 Aspecto final do simulador.....	19
Figura 2-34 Constituição básica de um MPP .....	22
Figura 2-35 Exemplo de funcionamento de um MPP com 4 bobinas .....	23
Figura 2-36 Esquema de um MPP do tipo híbrido.....	24
Figura 2-37 Caminhos magnéticos num motor híbrido.....	24
Figura 2-38 Representação dos campos magnéticos num motor híbrido de 4 fases ..	25
Figura 2-39 Esquema de ligação dos enrolamentos dos MPP .....	26
Figura 2-40 Configuração das Fases dos MPP .....	26
Figura 2-41 Característica $T/\theta$ .....	27
Figura 2-42 Características Dinâmicas dum MPP .....	28
Figura 2-43 Variação da Zona de Arranque/Paragem com a inércia da carga .....	29
Figura 2-44 Zona de sobrevelocidade para sequências de alimentação de meio passo e 1 passo.....	29
Figura 2-45 Zona de sobrevelocidade para vários circuitos de alimentação .....	29
Figura 2-46 Resposta impulsional dum MPP .....	30
Figura 2-47 Esquema e cálculos para funcionamento em regime micropasso].....	31
Figura 2-48 Forma de onda da corrente numa fase no modo micropasso .....	32
Figura 2-49 Sistema de controlo genérico para um motor de passo .....	34
Figura 2-50 Sistemas de blocos de uma <i>drive</i> amplificador .....	34
Figura 2-51 Excitação bipolar .....	36
Figura 2-52 Excitação unipolar .....	36
Figura 2-53 Esquema de ligação <i>L/R Drive</i> e gráficos da tensão e corrente a esta associado .....	37
Figura 2-54 Esquema de ligação <i>BiLevel</i> e gráficos da tensão e corrente a esta associado .....	37
Figura 2-55 Esquema de ligação e de funcionamento de um <i>chopper</i> de corrente constante (Ponte H).....	38
Figura 2-56 Formas de onda de um circuito básico de um <i>chopper</i> .....	38
Figura 3-1 Primeiros estudos .....	40
Figura 3-2 Estudo pré-final, situação de equilíbrio .....	41
Figura 3-3 Estudo pré-final, movimentação lateral .....	41
Figura 3-4 Estudo pré-final, movimentação em profundidade .....	42
Figura 3-5 Estrutura final e respectivas movimentações. ....	42
Figura 3-6 Estrutura base .....	43
Figura 3-7 Fases de Construção.....	43
Figura 3-8 Estrutura Final .....	44
Figura 4-1 Inércias presentes num motor.....	45

Figura 4-2 Esquema de forças numa cadeira de parapente em suspensão.....	46
Figura 4-3 Esquema de forças numa cadeira de parapente em suspensão.....	46
Figura 4-4 Física, movimento lateral, situação de equilíbrio.....	47
Figura 4-5 Física, movimento lateral, situação de movimento.....	48
Figura 4-6 Física, movimento em profundidade, situação de estática.....	49
Figura 4-7 Física, movimento em profundidade, movimentação para trás.....	50
Figura 4-8 Física, movimento em profundidade, movimentação para trás.....	51
Figura 5-1 MPP FL86STH156-4208A-H.....	56
Figura 5-2 Sistema de controlo para elevação do conjunto cadeira/pessoa.....	56
Figura 5-3 Cabo de ligação computador placa de comunicação.....	57
Figura 5-4 Porto de comunicação.....	57
Figura 5-5 Drive MSD 980.....	57
Figura 5-6 Fonte de alimentação; PS705.....	58
Figura 5-7 Circuito de controlo implementado.....	58
Figura 5-8 Esquema de ligações dos sensores.....	59
Figura 6-1 Fluxograma geral, MVC++6, Comando pelas teclas do teclado.....	60
Figura 6-2 Consola MVC++6, Comando pelas teclas do teclado.....	61
Figura 6-3 Fluxograma geral, MVS2008, Comando pelos sensores de mão.....	61
Figura 6-4 Janela principal MVS2008, Comando pelos sensores de mão.....	62
Figura 6-5 Fluxograma geral MVB 6, Comando por <i>joystick</i> .....	62
Figura 6-6 Janela Principal; MVB 6, Comando por <i>joystick</i> .....	63
Figura 7-1 Gráfico de oscilação, movimentação lateral.....	64
Figura 7-2 Resultados da movimentação lateral, tensões.....	65
Figura 7-3 Gráfico para a movimentação lateral.....	66
Figura 7-4 Gráfico de oscilação, movimentação em profundidade.....	67
Figura 7-5 Resultados da movimentação em profundidade, tensões.....	69
Figura 7-6 Gráfico para a movimentação em profundidade.....	69
Figura 7-7 Gráfico $B_{arr} = F(P, \Theta)$ , movimentação lateral.....	70
Figura 7-8 Gráfico $B_{arr} = F(P, \Theta)$ , movimentação em profundidade.....	71
Figura A.1 Movimentação lateral, esquema geral.....	-2-
Figura A.2 Movimentação lateral, tensões, método de cálculo.....	-3-
Figura A.3 Movimentação lateral, força no veio, método de cálculo.....	-4-
Figura A.4 Movimentação em profundidade, esquema geral.....	-5-
Figura A.5 Movimentação em profundidade, identificação dos ângulos.....	-6-
Figura A.6 Movimentação em profundidade, tensões, ângulo negativo, método de cálculo.....	-7-

Figura A.7 Movimentação em profundidade, tensões, ângulo positivo, método de cálculo .....-8-

Figura A.8 Movimentação em profundidade, força no veio, método de cálculo .....-9-

## ***Lista de Siglas***

*MPP: Motores de Passo-a-Passo*

*USB: Universal Serial Bus*

*LCD: Liquid Crystal Display*

*NASA: National Aeronautics and Space Administration*

*PVC: Policloreto de Vinilo*

*BHPA: British Hang Gliding Association*

*CNC: Computer Numeric Control*

*CC: Corrente continua*

*CA: Corrente alternada*

*PLC: Programmable Logic Control*

*EMI: Electromagnetic Interference*

*RFI: Radiofrequency Interference*

*PWM: Pulse-Width Modulation*

*PIC: Programmable Interface Controller (PICmicro)*

# **1 Introdução**

Neste trabalho vai ser desenvolvido um sistema de treino para pilotos de parapente, que será um conjunto constituído por uma ferramenta computacional e uma componente de hardware, que fará a interacção com o utilizador.

Este sistema tem como principal componente os motores, que irão fazer com que a cadeira de parapente se movimente, sendo este movimento em função das ordens enviadas pelo utilizador através do computador.

No futuro o sistema poderá ser integrado com um jogo que permitirá simular situações de voo em contexto de instrução ou treino.

## **1.1 Objectivo do Trabalho**

O objectivo principal desta dissertação consiste no desenvolvimento dum sistema de accionamento electromecânico, que fará mover uma cadeira de parapente de acordo com as ordens dadas pelo programa informático. Para além disso, o sistema deverá ter um conjunto de sensores responsáveis por detectar as acções de comando dadas pelo piloto.

## **1.2 Âmbito do Trabalho**

Este trabalho insere-se na disciplina de dissertação do Mestrado em Engenharia Electrotecnia, Sistemas Eléctricos de Energia do Instituto Superior de Engenharia, do Instituto Politécnico do Porto, no 2.º semestre do ano lectivo de 2008/2009.

## **1.3 Enquadramento/Motivação do trabalho**

Actualmente está em fase de arranque no Grupo de Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão um projecto que tem por objectivo o desenvolvimento dum ambiente virtual para treino de pilotos de parapente. O projecto compreende o desenvolvimento duma ferramenta computacional, da responsabilidade dum aluno de doutoramento na área de informática e dum componente de hardware que fará a interface com o utilizador. O presente projecto pretende desenvolver a componente de hardware desse projecto de investigação.

Os aspectos mais inovadores do trabalho prendem-se com a originalidade do sistema que ainda não existe comercialmente apesar da sua viabilidade económica. Para além disso existem alguns problemas técnicos a resolver que exigem investigação e desenvolvimento, nomeadamente a solução mecânica para suporte e movimentação da cadeira.

#### **1.4 Objecto de Estudo**

Neste trabalho será desenvolvido um sistema electromecânico que será integrado num sistema de treino de piloto de parapente.

É objecto de estudo o comportamento físico da estrutura que se irá conceber e construir e que suportará o utilizador.

É também objecto de estudo o tipo de motores que irão fazer a movimentação do conjunto cadeira/piloto. O estudo recairá em especial sobre os tipos de MPP, motores passo-a-passo, características dinâmicas e de funcionamento e métodos de controlo.

Por fim serão objecto de estudo algumas linguagens e programação e protocolos de comunicação, por exemplo porto USB, *Universal Serial Bus*, que permite a interacção do utilizador com o restante sistema.

#### **1.5 Organização da Tese**

Este documento está dividido em 8 capítulos.

No primeiro capítulo, é feita a apresentação do trabalho realizado, são definidos os objectivos, apresentada a motivação do trabalho e desenvolvidos outros temas respeitantes à apresentação do trabalho

No segundo capítulo, é apresentado o estado da arte actual relativo aos simuladores em particular os de parapente e seu desenvolvimento. É feita também uma apresentação sobre MPP e sistemas de controlo.

No terceiro capítulo, é apresentado o estudo da estrutura descrevendo-se o processo de construção desta.

O quarto capítulo, apresenta o estudo físico da estrutura que permite a sustentação e movimentação do utilizador.

O quinto capítulo, apresenta o motor que foi utilizado e suas características, seguindo-se o detalhe do restante sistema de controlo, respectivas particularidades, assim como o esquema de ligação. Finaliza-se com a exposição sobre os sensores de mão, com especial atenção para o seu esquema de ligações e funcionamento.

O sexto capítulo, apresenta alguns dos programas informáticos desenvolvidos para controlar os motores, método de utilização e possibilidades de funcionamento. São ainda apresentadas diferentes plataformas de programação e técnicas de controlo.

No sétimo capítulo, é feita a apresentação da simulação em *Matlab<sup>TM</sup>*, *Simulink* do sistema em estudo, expondo-se em primeiro lugar o sistema numa forma global seguindo-se a particularização de cada bloco. Por fim apresentam-se os resultados de uma forma crítica quanto à aproximação à realidade.

Finalmente, no oitavo capítulo, é analisado o cumprimento dos objectivos. São também propostos desenvolvimentos futuros do trabalho, com vista à melhoria de algumas opções apresentadas e estudo de novas escolhas, que conduzam a uma melhor adequação deste tipo de simulador à realidade e aplicabilidade.

## 2 Estado da arte

Este capítulo, estado da arte, inicia-se com uma breve apresentação sobre os sistemas mais usados, tipos, técnicas e tecnologias de simulação, apresenta-se, também, algumas das mais recentes novidades.

Finaliza-se com uma abordagem ao tema motores de passo-a-passo; tipos de arquitectura, funcionamento, sistemas de controlo e tipos de *drive*.

### 2.1 Simuladores, abordagem geral

A característica comum aos simuladores consiste na reprodução operacional o mais fiel possível duma actividade real. Para se obter uma simulação é necessária uma combinação de ciência, tecnologia e arte para criar uma realidade artificial com o propósito de pesquisa, treino ou diversão, figura 2-1, do seu utilizador. Sendo que existem vários níveis de abstracção e de envolvimento humano numa simulação.



Figura 2-1 Máquinas de jogos electrónicos, “simuladores do povo” [1]

De seguida, são apresentadas algumas das aplicações mais comuns de simuladores.

#### 2.1.1 Simuladores de condução

Os simuladores, ilustrados nas figuras seguintes, permitem o treino de condutores. São constituídos por parte da carroçaria do veículo onde são acoplados um conjunto de ecrãs, onde mediante um *software* informático são apresentadas as imagens que simulam as condições de condução.



Figura 2-2 Simulador de treino de condução, tipo 1 [2]

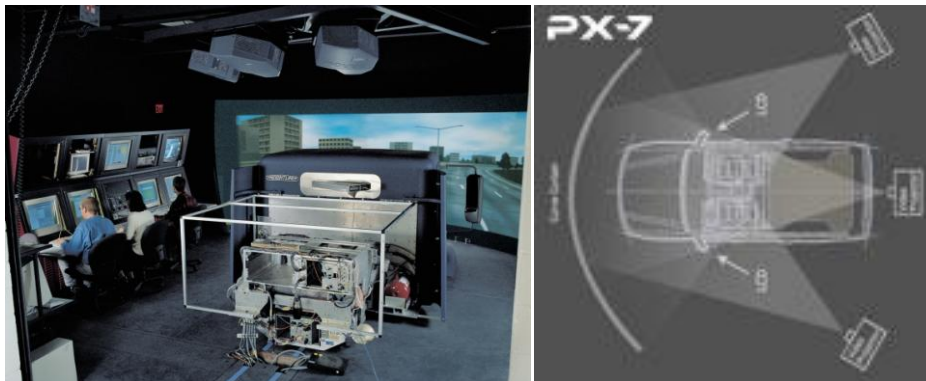


Figura 2-3 Simulador de treino de condução, tipo 2 [2]

A figura anterior mostra um outro tipo de simuladores de treino de condução. Neste caso, a imagem principal é projectada num painel colocado em frente à carroçaria do veículo.

Tal como os simuladores anteriores integram partes dos veículos e requerem algum espaço. Os simuladores apresentados seguidamente não incluem partes metálicas dos veículos, sendo apenas constituídos pelo local de condução, com os principais elementos integrantes da condução, como travão de mão, pedais, volante e maneta da caixa de velocidade. A parte informática, software informático, que simula as condições de condução, é mostrada em três ecrãs do tipo LCD, *Liquid Crystal Display*.



Figura 2-4 Simulador de treino de condução, tipo 3 [2] [3]

Os simuladores anteriores são principalmente electrónicos e informáticos pois não têm equipamentos electromecânicos, motores ou tubos pneumáticos, que façam a simulação do comportamento do veículo, como por exemplo a reacção da suspensão, o comportamento em curva, entre outros, figuras 2-2, 2-3, 2-4.



Figura 2-5 Simulador de treino de condução para veículos pesados [2] [3]

Para finalizar, apresentam-se simuladores electromecânicos, figura 2-5, que são simuladores constituídos por parte da carroçaria do veículo, um conjunto de sistemas hidráulicos e um programa informático, que simula as condições da estrada, recebe as ordens do condutor a partir do habitáculo do veículo e controla os sistemas hidráulicos.

Os equipamentos anteriores são simuladores fundamentalmente para ensino e treino do utilizador.

Os simuladores, representados na figura 2-6 são equipamentos que podem ser utilizados para treino de pilotos ou como diversão muito cara. São simuladores electromecânicos, tal como os anteriores, constituídos fundamentalmente pela carroçaria de um Fórmula 1, um sistema hidráulico e um sistema informático que corre um programa informático que controla o simulador.



Figura 2-6 Simulador de fórmula 1 [4]

Para finalizar esta secção sobre simuladores de veículos de quatro rodas, apontam-se algumas soluções mais arrojadas e inovadoras neste ramo.



Figura 2-7 Simulador de fórmula 1 como tecnologia hexagonal de sistemas hidráulicos [5]



Figura 2-8 Simulador como tecnologia hexagonal de tubos hidráulicos [6]

Sistema electromecânico, constituído por uma estrutura metálica onde se encontra o habitáculo para o utilizador e que é movimentado por um sistema de seis sistemas hidráulicos posicionados estrategicamente e um sistema informático que corre um programa informático que controla todo o simulador, como mostra as figuras 2-7, 2-8.



Figura 2-9 Simulador *Force Dynamics 301 ultimate* [7]

O simulador, ilustrado na figura 2-9, é uma das versões mais recentes de simuladores e tal como os simuladores prévios são electromecânicos e utilizam os mesmos sistemas dos precedentes.

Simuladores de veículos de duas rodas, motociclos e velocípedes, são equipamentos electromecânicos constituídos pelos sistemas já referidos anteriormente, figuras 2-10 e 2-11.



Figura 2-10 Simulador de velocípedes



Figura 2-11 Simulador de motociclos [8]

Estes simuladores podem ter várias funcionalidades, tais como ensino da condução. Podendo, também, fazer parte integrante de jogos informáticos que permitam a sua integração, figuras 2-10, 2-11. [3] [5] [8]

### 2.1.2 Simuladores de desportos

Este tipo de simuladores é bastante procurado pelo público em geral. O funcionamento destes assenta genericamente no mesmo tipo de funcionamento dos sistemas já referidos.

Simuladores de golfe para interior, constituídos por videoprojector, um ecrã, um sensor de chão e tacos de golfe, como mostram as figuras seguintes.



Figura 2-12 Simulador virtual de golfe interior [9] [10]

Os simuladores seguintes são os mais simples e muito idênticos em tecnologia à que é utilizada na consola de jogos *Wii* da *Nintendo*. Constituídos por uma televisão, consola de jogos, comando(s) apropriado(s) para desporto e receptor do(s) comando(s), figuras 2-13, 2-14.



Figura 2-13 Simuladores de desportos (*bowling*, *basebol*, *pesca* e *ténis*) [8]

A figura 2-14 exemplifica um simulador de tiro.



Figura 2-14 Simulador de tiro [8]

Em seguida apresentam-se duas versões de simulador de esqui.

Uma primeira versão mais pequena, mas bastante engenhosa, é um equipamento electromecânico bastante pequeno e aparentemente realista, figura 2-15.

Na figura 2-16 mostra-se uma simulação mais profissional de simulação de esqui olímpico.



Figura 2-15 Simulador de esqui “doméstico” [11]



Figura 2-16 Simulador de esqui olímpico [12]

Os simuladores de hipismo, baseados nos sistemas dos touros mecânicos ou pranchas de *surf* mecânicas, são constituídos genericamente por uma parte informática e uma outra parte mecânica, figura 2-17. [8] [9] [11]



Figura 2-17 Simulador hípico [8]

### 2.1.3 Simuladores na área da medicina

Estes simuladores são equipamentos que permitem o ensino e treino de pessoal médico recorrendo às mais avançadas tecnologias, sendo equipamentos médicos em desenvolvimento e ainda bastante caros. São bastante importantes para o ensino da medicina e abrangem grande parte das áreas médicas, como por exemplo os simuladores apresentados nas duas imagens seguintes. [13] [14] [15]



Figura 2-18 Simulador electrónico de nascimento [13]



Figura 2-19 Simulador dum paciente cardíaco [15]

### 2.1.4 Simuladores de voo

Os simuladores de voo desempenham um papel fundamental no treino, melhoramento e manutenção das habilidades de pilotos e tripulações, mas também desempenham um papel muito importante na concepção e no projecto de novas aeronaves e na avaliação de novos sistemas aeronáuticos. São sistemas que integram sistemas informáticos, sistemas mecânicos e sistemas electrónicos, como se pode ver nas imagens seguintes. [16]



Figura 2-20 Simulator 747-400 [17]



Figura 2-21 Simulador profissional de helicópteros Fyit [18]



Figura 2-22 Simulador de combate aéreo SX02 [19]

Poder-se-ia ainda referir que existem simuladores dedicados à indústria de armamento e à NASA, *National Aeronautics and Space Administration*, para treino e preparação dos astronautas para viagens espaciais. [3] [10] [17] [18]

Recorde-se que, existem os mais diversos tipos de simuladores e que são aplicados nas várias áreas da sociedade.

## 2.2 Simuladores de voo em parapente

Uma vertente dos simuladores de voo são os simuladores de parapente e paramotor. São essencialmente simuladores electromecânicos e é sobre estes que o estudo recai neste trabalho, sendo de salientar três exemplos:

1. Um sistema de simulação completo, com uma componente informática e outra mecânica, que foi desenvolvido por Dr. Paul Chapman e James Ward, do Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Hull em Inglaterra e Ian Currer, *Northern Paragliding*, empresa do ramo do parapente e a BHPA, *British Hang Gliding Association*. [19] [20]

2. Simulador desenvolvido por um grupo de praticantes de paramotor na Alemanha. [21]

3. Simulador de paramotor desenvolvido por Mark Deseck, entusiasta de paramotor. [22]

Estes simuladores serão apresentados com mais detalhe mais adiante.

### 2.2.1 Simuladores de parapente, generalidades

Existe um grande número de simuladores que apresentam somente funcionalidades básicas, pois a sua estrutura permite apenas simular a sensação de suspensão ou a sensação de curvar, como se pode ver na figura seguinte.



Figura 2-23 Simuladores básicos [23] [24] [25] [26]

As imagens anteriores apresentam simuladores de parapente de construção relativamente fácil. Alguns deles foram utilizados como ferramenta de ensino de parapente e paramotor. Podem ajudar a simular a fase de desembarque, controlo direccional, curvas planas e íngremes, entrada em viragem, mudança de peso, entre outras acções existentes no parapente.

São genericamente estruturas metálicas de simples construção, não utilizando nenhum sistema de accionamento.

São simuladores um pouco diferentes do que estamos a desenvolver, mas é necessário ter a noção da sua existência pois são importantes principalmente devido à sua estrutura. [23] [24] [25] [26]

### 2.2.2 Simulador SMAAP

O simulador apresentado seguidamente é um equipamento desenvolvido por uma empresa que se dedica ao ensino de pilotos de parapente e asa-delta com o nome SMAAP. [27]

Trata-se um equipamento hidráulico, como se vê nas imagens, que permite produzir cinco movimentos em espaço aberto: descolagem, aterragem, deslocamento lateral, curvas e mudanças de peso.



Figura 2-24 Simulador hidráulico da SMAPP [27]

Este simulador é interessante pelas tecnologias que utiliza pois é um sistema hidráulico com comando manual. O sistema é controlado pelo instrutor que vai posicionando o sistema e o instruindo tem que procurar o equilíbrio, como se pode ver nas figuras anteriores. [27]

### 2.2.3 Simulador de paramotor alemão

Este é um simulador de paramotor desenvolvido por praticantes desta modalidade e é um bom caso de estudo, pois é um sistema electromecânico e apresenta pormenores construtivos que podem ser relevantes para o trabalho a realizar.

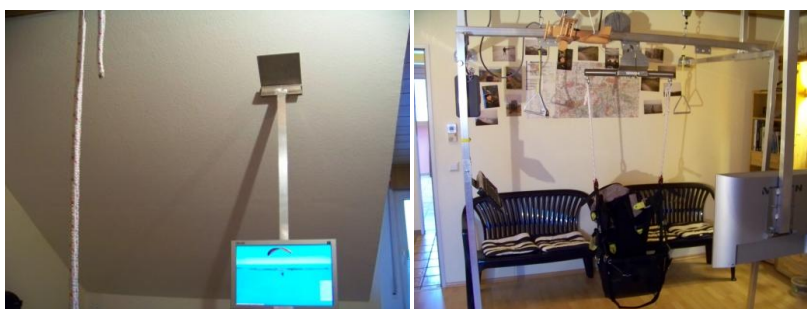


Figura 2-25 Simulador de paramotor alemão [21]

Como mostra a figura anterior, trata-se de um sistema electromecânico integrado com um simulador informático, possui um conjunto de botões e sensores que permitem a comunicação do utilizador com o simulador informático. Tem ainda uma estrutura em alumínio que permite o movimento da cadeira e integra os sistemas electrónicos para comunicação com o simulador informático, figura 2-25, 2-26.



Figura 2-26 Simulador de paramotor alemão, pormenores dos sensores [21]

Este equipamento tem vários sensores que comunicam com o simulador informático:

- Botões *On/Off*, que permitem o controlo do paramotor;
- Botões *On/Off*, que funcionam como fins de curso; permitem saber a posição da cadeira;
- *Linear Wire Potentiometer*, que permite quantificar a intensidade com que se puxam os freios;
- Sensores angulares; que permitem saber em que posição está a cadeira.

Como ilustra a figura anterior.

Como já foi referido anteriormente, é uma estrutura em alumínio constituída por várias partes soldadas entre elas e fixas à estrutura da casa que permite sustentar toda a estrutura e o peso do utilizador. [21]

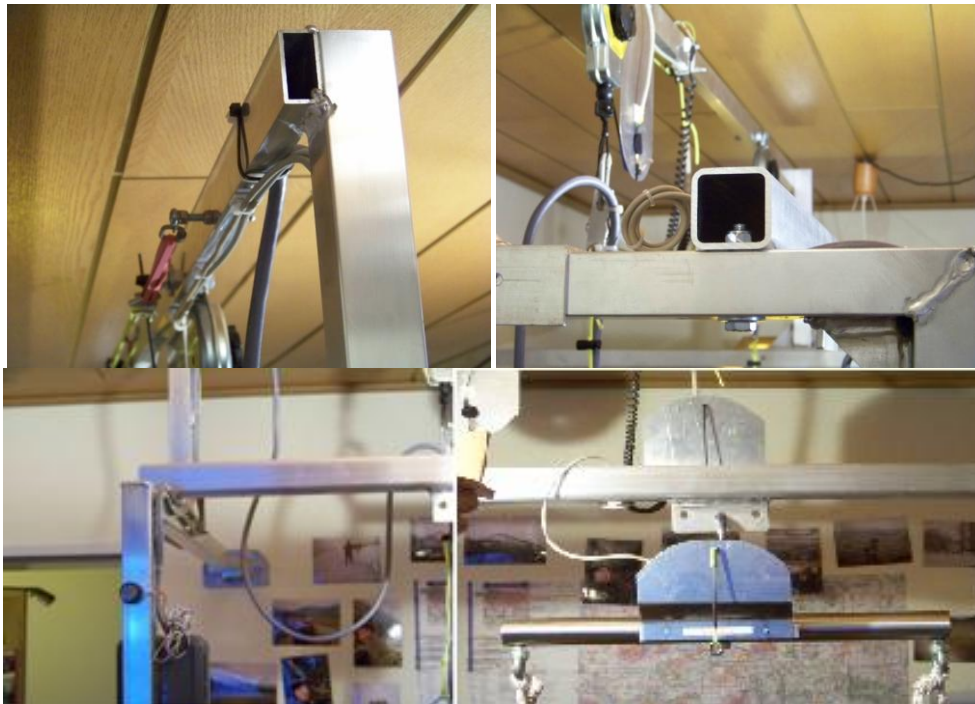


Figura 2-27 Simulador de paramotor alemão, pormenores estruturais [21]

#### 2.2.4 Simulador de paramotor desenvolvido por Mark Deseck

Tal como o anterior, este simulador é igualmente um simulador de paramotor, mas tem alguns pormenores bastante importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Como se pode ver pelas imagens seguintes, este simulador possui uma estrutura de PVC, *Policloreto de Vinilo*, para suportar a cadeira de voo, sendo que esta

estrutura pode ser construída em alumínio, ferro, aço ou mesmo madeira sendo de desmontagem rápida e transportável.



Figura 2-28 Estrutura do simulador, desenvolvido por Mark Deseck [22]

As imagens seguintes apresentam a caixa onde se encontra o equipamento que permite a interacção do utilizador com o simulador informático.

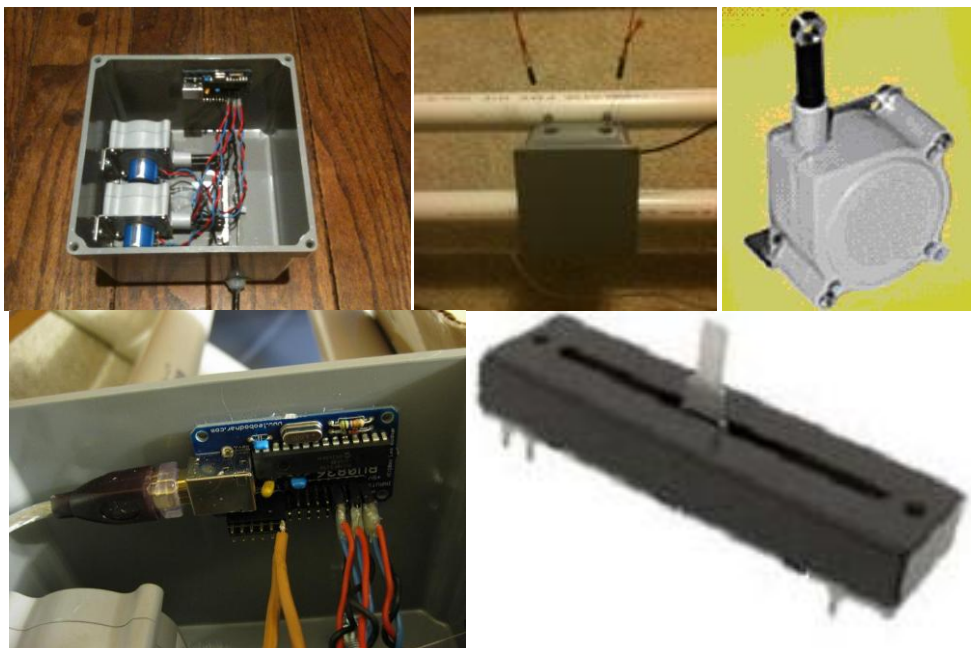


Figura 2-29 Electrónica do simulador, desenvolvido por Mark Deseck [22]

Na parte superior da figura 2-29 mostra-se o aspecto interior e exterior da caixa onde estão:

- Travão esquerdo e direito, para simular as entradas esquerda e direita do freio, que está ligado ao potenciómetro linear de fio. Quanto maior a quantidade de fio puxado maior será a intensidade do freio.
- Um acelerador de mão, para simular a aceleração do motor, que está ligado ao potenciómetro deslizante linear, que se liga a um travão de bicicleta que ao ser puxado arrasta um cabo de aço e faz deslizar o potenciómetro. Isto

permite quantificar a aceleração que o utilizador pede ao motor e, também, permite ligar e desligar o motor;

- A placa controladora USB converte os sinais dos equipamentos descritos anteriormente em sinais utilizáveis pelo simulador informático. Este dispositivo simples simplifica muito as comunicações entre as suas entradas físicas e seu software simulador de voo.

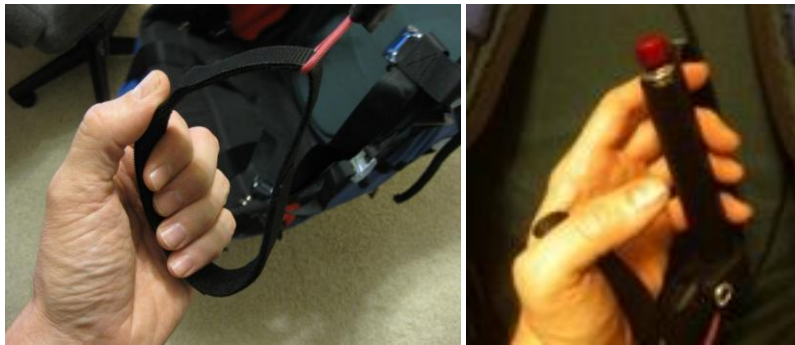


Figura 2-30 Acelerador e travão do simulador, desenvolvido por Mark Deseck [22]

Na figura anterior mostra-se o freio, que vai estar ligado ao potenciómetro linear de fio, que se encontra dentro da caixa controladora e que passa por uma roldana. Mostra-se, também, à direita, o acelerador do motor com um botão *On/Off*, estando este ligado à caixa controladora. [22]

### 2.2.5 Simulador da Active Fly

Este simulador foi desenvolvido por um engenheiro aeroespacial, Ulrich Ruger, para o Comité Europeu de Treino e Segurança em Parapente e Asa-Delta.

Este sistema permite aos pilotos a prática de voo activo e lidar com situações perigosas em parapente, na segurança dum simulador. O piloto senta-se numa cadeira de parapente, que está suspensa num quadro metálico, juntamente com os comandos.

Aquando da apresentação deste simulador, este teve um *feedback* bastante positivo de grande parte dos agentes de segurança e de formação europeus. [26] [28]



Figura 2-31 Simulador da *Active Fly* [26] [28]

### 2.2.6 *Simulador parapente comercial*

Este último simulador em estudo, é um simulador desenvolvido por três entidades inglesas: Departamento de ciências da computação, da Universidade de Hull; a empresa *Northern Paragliding* e BHPA Sendo apresentado na *Sport and Aviation Show*, a 2 e 3 de Dezembro de 2006, onde foram dadas opiniões de melhoramento voltou à universidade, após a exposição, para melhorias. Em Março de 2007 foi dada à BHPA a versão final que entraria em comercialização, existindo vários preços para este simulador, dependendo da versão e dos extras que forem comprados.

Foi um projecto chefiado por várias pessoas, entre elas, Dr. Paul Chapman e James Ward, Departamento de ciência da computação, e Ian Curren, *Northern Paragliding* representados na figura seguinte.



Figura 2-32 Responsáveis pelo projecto inglês [29]

Este simulador é utilizado como instrumento de formação em vários ramos da aviação. Em escolas alemãs usam o simulador informático do sistema para ensinar algumas tarefas, como o de aproximações a pequenos campos em montanhas de elevada altitude. [29] [30]



Figura 2-33 Aspecto final do simulador [29]

## 2.3 Motores

O motor eléctrico é uma máquina eléctrica destinada a transformar energia eléctrica, aplicada aos seus terminais, em energia mecânica rotativa, disponibilizada no eixo, apresentando um vasto leque de características estruturais, eléctricas e funcionais.

A aplicação a desenvolver poder-se-á caracterizar como um periférico baseado em tecnologia CNC, *Computer Numeric Control*, sendo necessário fazer o controlo de posição e variação de velocidade do processo. É uma aplicação de baixa potência, pelo que poderão ser aplicados motores como MPP ou servomotores.

Para além de factores de índole técnica, existem outros factores determinantes na selecção dum tipo de motor para uma determinada aplicação. Por exemplo, é comum a opção por uma determinada tecnologia por ser essa acerca da qual se dispõe de maior *know-how*. A grande variedade de factores, assim como os diferentes pesos que cada um deles pode ter para cada aplicação, torna difícil sistematizar o processo de selecção.

Frequentemente um dos factores passíveis de classificação é a potência da aplicação. Não quer isto dizer que a potência, por si só, seja factor de escolha, mas sim que existe um determinado padrão associado às aplicações de accionamento, com controlo de posição que permite a classificação pela potência em jogo

Em resumo, para aplicações de baixa potência em que seja necessário controlo de posição utiliza-se maioritariamente MPP sendo igualmente possível a utilização de servomotores. As razões residem na baixa complexidade do sistema de

controlo aliada a um bom desempenho e baixo custo. Algumas excepções são aplicações nas quais, para além do controlo de posição, é necessário um controlo de velocidade muito rigoroso e em que, por exemplo, as vibrações não são desejáveis.

A partir duma determinada de potência, o peso do custo do sistema de controlo no sistema de accionamento é menor, pelo que começam a surgir aplicações baseadas noutro tipo de motores, como por exemplo em motores de corrente contínua.

Mais recentemente, têm surgido no mercado aplicações baseadas em motores de indução. Estas aplicações tiram partido das vantagens deste motor em termos de fiabilidade, manutenção e baixo custo para que, mesmo com um sistema de controlo mais complexo e caro, seja possível competir com soluções baseadas noutro tipo de motores. Note-se, no entanto, que as *performances* em termos de controlo de posição dificilmente conseguem igualar as soluções baseadas em motores de passo.

Para finalizar, apresentam-se as vantagens e desvantagens do motor de passo em relação aos outros tipos de motores anteriormente mencionados.

***Vantagens:***

- Controlo de velocidade e posição simples;
- Boa resposta à aceleração e desaceleração e aos comandos de passos;
- Precisão no posicionamento, (conseguem-se precisões de 3 a 5% do ângulo de passo);
- Os erros de posicionamento não são cumulativos;
- Bom funcionamento em baixa velocidade e elevado binário sem necessidade de engrenagens reductoras;
- Elevado binário de retenção quando alimentado;
- Alguns tipos de motores dispõem de binário mesmo não estando excitados;
- O motor dispõe do binário máximo no arranque;
- Resposta excelente no arranque, paragem e mudança de sentido;
- Dispõe-se de binário máximo a velocidades muito baixas;
- Paragens prolongadas sem danos para o motor;
- Operação em malha aberta, não requer realimentação de controlo normalmente proporcionada por codificadores geradores taquimétricos, entre outros. Evitam, portanto, os problemas vulgarmente encontrados nos sistemas de realimentação, como instabilidade, o que acontece com os servomotores de corrente contínua convencionais;
- Robusto e com pouco desgaste, isto é, manutenção baixa pois não existem escovas nem colectores;

- Boa característica de bloqueio devido às suas características estruturais. No caso dos servomotores é necessário bloqueio.

***Desvantagens:***

- Má relação potência volume, ao invés dos servomotores que apresentam uma boa relação potência volume. Para as mesmas potências os servomotores apresentam um tamanho mais reduzido;
- Os servomotores apresentam um controle mais simples mas com algumas limitações (já referidas anteriormente);
- No caso de sobrecarga, binário exagerado, podem ocorrer erros no posicionamento e o sistema tem de ser reiniciado;
- Em velocidades elevadas, o controle não é fácil;
- Existem problemas de funcionamento, podendo ocorrer ressonância, de difícil resolução. [31] [32] [33]

### *2.3.1 Introdução aos motores de passo-a-passo*

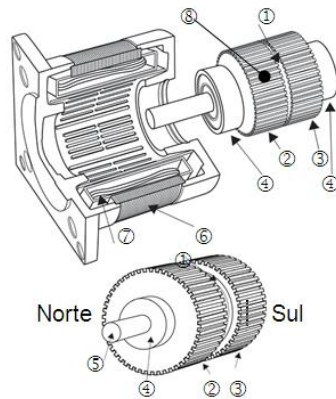
Um MPP, ou simplesmente motor de passo, é um dispositivo electromecânico que converte impulsos eléctricos em movimentos mecânicos discretos do rotor, passos. A sequência dos impulsos aplicados está directamente relacionada com o sentido de rotação do motor, isto é, ângulo de rotação, sendo a velocidade proporcional à frequência dos impulsos. Por fim, a duração do movimento depende do número de impulsos aplicados. [31]

### *2.3.2 Aplicações dos motores de passo-a-passo*

O MPP pode ser uma boa escolha sempre que se necessite de controlar o ângulo de rotação, posição e a velocidade sem grandes exigências em termos de binário. Algumas aplicações são:

- Mecanismos de impressão em *plotters*, *fax*, impressoras, etc.;
- Mecanismos de controle de cabeças dos discos rígidos e leitores de disquetes;
- Equipamento médico;
- Braços robotizados;
- Máquinas de controle numérico (CNC).

### 2.3.3 Constituição básica



#### Legenda

- ① Ímã Permanente
- ② Sistema de Engrenagens 1
- ③ Sistema de Engrenagens 2
- ④ Rolamento de esferas
- ⑤ Veio
- ⑥ Estator
- ⑦ Bobina
- ⑧ Rotor

Figura 2-34 Constituição básica de um MPP [34]

O MPP, assim como a generalidade dos restantes motores, pode ser dividido em duas partes distintas rotor e estator. O rotor consiste no eixo móvel e o estator na carcaça na qual este se sustenta.

Para uma melhor compreensão do funcionamento deste tipo de motor, convém ter em atenção as três características fundamentais deste tipo de aparelho electromecânico:

- O rotor, eixo girante, está acoplado a um ímã permanente;
- O estator possui um determinado número de bobinas ortogonais, que pode variar dependendo do tipo ou configuração do motor, que geram um campo magnético girante. Num motor unipolar, a corrente só circula num único sentido em cada uma dessas bobinas, isto é, cada uma das bobinas só pode ser polarizada num único sentido;
- O acoplamento entre o estator e o rotor é feito através de um sistema de engrenagens, de modo a aumentar a precisão do motor diminuindo os ângulos e oscilações dos passos;

### 2.3.4 Funcionamento básico

Ao circular corrente por uma bobina, um enrolamento de fio de cobre, pelas *Leis de Maxwell* fica evidente a criação de um campo magnético intenso ao longo do eixo da bobina, o qual será proporcional ao valor da corrente aplicada e ao número de espiras do enrolamento.

Cada uma das bobinas do motor, que pode ser accionada individualmente, gera um campo magnético na sua direcção, como mostra a figura seguinte.

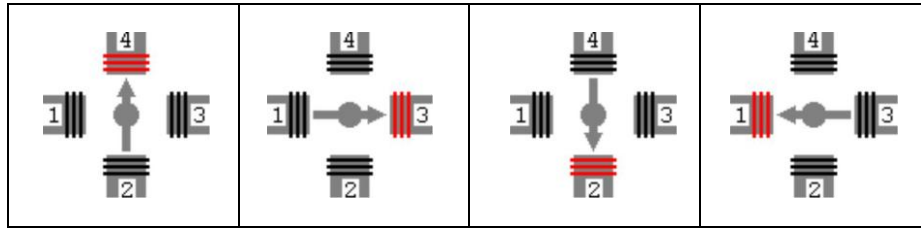


Figura 2-35 Exemplo de funcionamento de um MPP com 4 bobinas [35]

Assim, é possível controlar discretamente a direção e o sentido do campo magnético no estator do MPP

Sendo o rotor um eixo magnetizado, ao ser submetido a um campo magnético sofrerá ação de uma força no sentido do alinhamento do seu campo magnético com o campo externo. Variando a direção do campo no estator varia-se a posição do rotor.

É de referir que diferentemente dos motores de corrente contínua o accionamento de uma bobina do MPP não faz com que o motor gire a uma velocidade constante, mas apenas produz uma força para que o eixo se alinhe em determinada posição.

Dependendo do tipo do motor, a sua precisão pode chegar a centésimos de grau. Grande parte dos MPP encontrados em periféricos de computador tem uma relação de 100 passos por volta, o que dá uma precisão de 3,6 graus com controlo de passo completo, e 1,8 graus com controlo de meio passo. [32] [33] [35]

### 2.3.5 Classificação dos motores de passo-a-passo

De acordo com a estrutura da máquina e princípio de funcionamento podemos classificar os MPP em vários tipos:

- Motores de Relutância Variável;
- Motores de Ímanes Permanentes;
- Motores Híbridos;
- Motores Lineares;
- Motores Electrohidráulicos.

E será seguidamente apresentado de uma forma sumária o tipo de MPP que será utilizado neste trabalho. [31]

## Híbrido

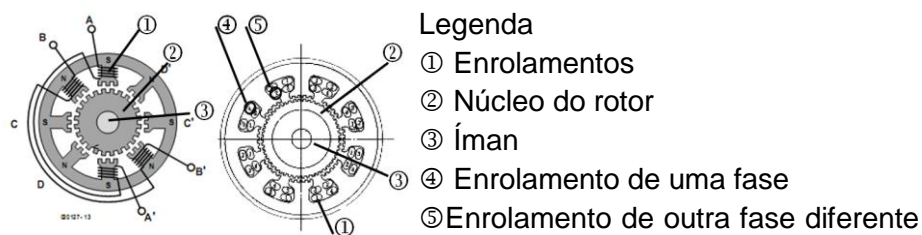


Figura 2-36 Esquema de um MPP do tipo híbrido [33]

Combinando as características dos motores de relutância variável e dos de ímanes permanentes, o motor híbrido tem algumas das características desejáveis de cada um. Este motor é mais caro do que o de ímanes permanentes, mas dispõe de melhor resolução, assim como de melhores características de binário e velocidade.

Têm binário elevado, não apresenta binário estático nulo e podem operar em velocidades de passo altas. Os valores típicos para o número de passo deste tipo de motores variam entre 100 e 400 e apresentam ângulos de passo de 0,9 a 5 graus.

Como se pode ver na figura 2-36, também a estrutura do estator é semelhante à do motor de relutância variável mas os enrolamentos e respectivas ligações são diferentes. No caso do motor de relutância variável, cada pólo é abraçado por um único enrolamento correspondente a uma fase, enquanto no motor híbrido cada pólo encontra-se sob a influência de dois enrolamentos de fases diferentes. Os enrolamentos de cada uma das fases encontram-se segundo um esquema denominado de bifilar, de forma a produzir diferentes polaridades magnéticas conforme a excitação.

Esta estrutura faz com que o campo magnético, gerado pelos enrolamentos do estator, seja heteropolar como se pode ver na figura 2-37.

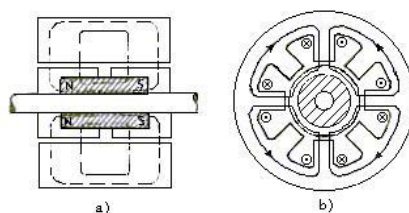


Figura 2-37 Caminhos magnéticos num motor híbrido.  
a) Fluxo devido ao íman do rotor que produz um campo unipolar b) distribuição heteropolar do fluxo devido às correntes do estator [31]

Outra característica do motor híbrido é a estrutura do rotor. Este é constituído por íman cilíndrico, como o da figura 2-37, magnetizado longitudinalmente de forma a criar um campo unipolar representado na figura 2-37 a).

Cada pólo do íman é coberto depois por uma estrutura dentada que difere de

meio passo em relação à estrutura oposta.

A combinação do campo unipolar criado pelo íman com o campo heteropolar, criado pelos enrolamentos do estator, permite melhorar os binários de retenção e dinâmico deste motor, quando comparado com os MPP de relutância variável e de ímanes permanentes. O binário de retenção não é tão significativo como nos motores de ímanes permanentes.

A melhor forma de explicar o funcionamento dum motor híbrido é recorrendo à figura 2-38 que representa a composição dos campos magnéticos nos pólos I e III, sobre influência das fases 1 e 3. Como se pode ver na parte superior da figura 2-38, correspondente à secção sobre o pólo sul do íman permanente, a direcção da corrente nos enrolamentos é tal que o pólo I é sul e o pólo III norte. Desta forma sob o pólo III a direcção do campo electromagnético é a mesma da do campo magnético, pelo que se somam. Por outro lado, o sentido dos campos no pólo I é contrário pelo que estes se anulam. Pelas *Leis de Maxwell* será então gerada uma força da direita para a esquerda que fará o rotor girar no sentido directo.

A mesma análise da composição dos campos nos pólos sobre o pólo norte do íman permanente permite-nos concluir que a força aí gerada terá o mesmo sentido da anterior reforçando o movimento. Após um deslocamento igual a um quarto da distância entre dentes será atingida a posição de equilíbrio sendo necessária uma mudança no sentido das correntes para um novo deslocamento.

Note-se que neste motor a relação entre o número de passos e o número de dentes do rotor é de 4 para 1, contrariamente ao motor de relutância variável que era de 1 para 1. Com este tipo de motor conseguem-se assim ângulos de passo bastante reduzidos.

É também frequente encontrar motores híbridos multi-camada que conseguem binários mais elevados do que os de uma única camada. [31] [33] [35] [36]

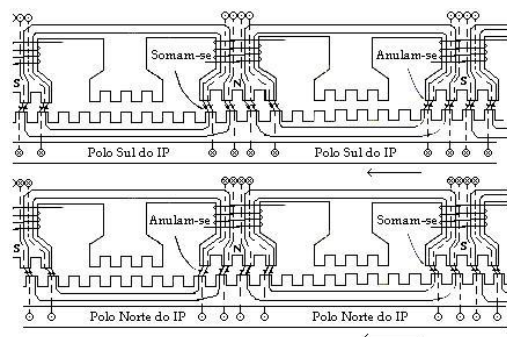


Figura 2-38 Representação dos campos magnéticos num motor híbrido de 4 fases  
Em cima secção sob o pólo sul;  
Em baixo secção sob o pólo norte. [31]

### 2.3.6 Arquitectura e Aspectos Construtivos

Normalmente, este tipo de motores possui duas, três ou cinco fases, com um ou mais enrolamentos de fio de cobre que quando percorridos por corrente eléctrica originam um campo magnético. Podendo ser classificados pelo número de enrolamentos que as fases possuem. Assim existem:

Motores bipolares - este tipo de motor tem um enrolamento por fase;

Motores unipolares - este tipo de motor tem um enrolamento com uma ligação intermédia, ou dois enrolamentos por fase.

Algumas vezes o motor unipolar pode ser referido como “motor de quatro fases” mas na verdade este só tem duas fases.

Podem também existir várias possibilidades de configurações para estes enrolamentos que vão dar origem a vários tipos de ligações. [33] [37] [38]

Número de terminais	Esquema de ligação	Imagem
4 Fios	Bipolar	
5 Fios	Unipolar	
6 Fios	Unipolar Bipolar (Ligação em série)	
8 Fios	Unipolar	
	Bipolar, Ligação em série	
	Bipolar, Ligação em paralelo	

Figura 2-39 Esquema de ligação dos enrolamentos dos MPP [33]

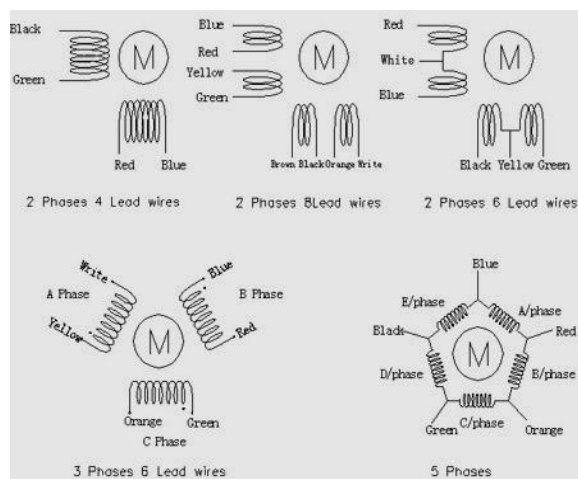


Figura 2-40 Configuração das Fases dos MPP [33]

### 2.3.7 Características dos motores da passo-a-passo

Como em qualquer motor existe um determinado número de características segundo as quais se analisam os motores de passo. Estas características dividem-se em dois grupos, *Características Dinâmicas* e *Características Estáticas*.

As características relacionadas com o comportamento do motor parado denominam-se de **Características Estáticas**.

Na ausência de carga e na posição de equilíbrio, o binário produzido por um MPP é nulo. Na figura 2-41 a posição de equilíbrio corresponde ao ponto *A*. Se posteriormente um binário exterior for aplicado ao veio irá ocorrer um deslocamento angular  $\theta_1$ , para que o binário produzido compense o exterior, ponto *B*. Se o deslocamento for superior a meio passo, o rotor tende para uma nova posição de equilíbrio.

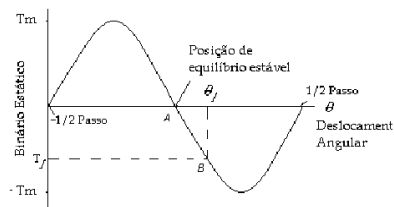


Figura 2-41 Característica  $T/\theta$  [31]

A característica de binário/deslocamento angular do motor apresenta um carácter periódico de período  $\alpha$ , ângulo de passo. Este período depende, como vimos anteriormente, do número de fases e dentes do rotor.

Idealmente, e na ausência de saturação, o máximo binário estático  $T_M$  varia com o quadrado da corrente, para motores de relutância, e linearmente com a corrente para motores híbridos ou de íman permanente. Contudo para valores de corrente próximos do nominal ocorre a saturação tendo como consequência que aumentos na corrente tenham pouco efeito no binário.

Se aproximarmos a curva da característica do binário a uma sinusóide então:

$$T = -T_M \times \sin(N_r \times \theta) \quad (2-1)$$

Sendo  $N_r$  o número de dentes rotóricos e o binário pedido  $T_l$ , então o rotor afasta-se  $\theta$  e da posição de equilíbrio ideal.

$$\theta_e = \frac{1}{N_r} \times \arcsen\left(-\frac{T_l}{T_M}\right) \quad (2-2)$$

Para minimizar este desvio é necessário aumentar  $T_M$  ou  $N_r$ .

Apesar do valor prático da expressão anterior ser baixo, esta consegue traduzir alguns dos efeitos observados, tal como, o deslocamento angular do rotor para uma determinada carga.

As características que descrevem o funcionamento do motor em movimento contínuo denominam-se de **Características Dinâmicas**.

A figura 2-42 representa as diferentes zonas de funcionamento dum MPP

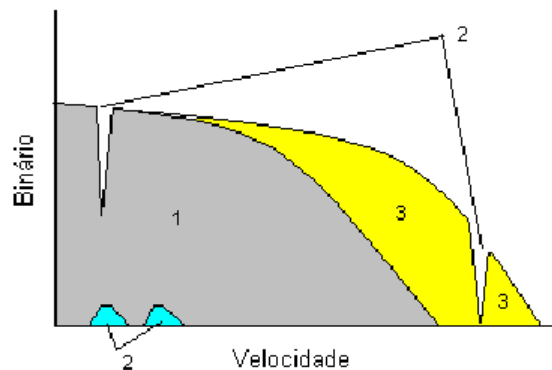


Figura 2-42 Características Dinâmicas dum MPP [31]

Da análise da figura 2-42 é possível identificar 3 zonas distintas de funcionamento do motor. Destas, algumas são zonas de instabilidade, nas quais o motor poderá não funcionar correctamente.

Apesar dos vários estudos realizados não é conhecida nenhuma teoria capaz de quantificar correctamente a influência dos diferentes factores nestas zonas de instabilidade. De seguida iremos analisar cada uma das principais zonas de funcionamento do motor.

- **Zona de Arranque/Paragem, Zona 1;** nesta zona em que as velocidades são baixas o motor consegue parar ou inverter o sentido de rotação, em sincronismo com o comando.
- **Zona de Instabilidades, Zona 2;** nestas zonas o funcionamento do motor não é correcto e deve ser evitado. Só devem ser atravessadas em aceleração ou desaceleração. Qualquer tentativa de funcionamento nesta zona, em regime permanente, conduz a uma resposta errática e à perda de sincronismo. Existem vários tipos de instabilidades que dependem das características do motor, da carga, da sequência e circuito de alimentação, etc.
- **Zona de Sobrevelocidade, Zona 3;** nesta zona o motor atinge as velocidades mais elevadas, sendo contudo impossível parar ou inverter o sentido da rotação sem perda de sincronismo. Esta zona de funcionamento requer cuidados especiais. O motor deve arrancar na zona 1, e a sua velocidade ser progressivamente aumentada, acelerando até atingir a zona 3. Quando se pretende parar ou inverter o sentido de rotação do motor, deverá proceder-se à passagem da zona 3 para a 1, desaceleração. Deste modo, qualquer arranque,

paragem ou inversão de sentido é feito na zona 1 onde há a garantia de sincronismo com o comando.

A forma de cada uma das zonas anteriores depende não só do tipo de motor e suas características mas também do circuito de alimentação e modo de excitação.

Nas figuras seguintes é possível observar a variação de algumas das zonas anteriores com alguns factores.

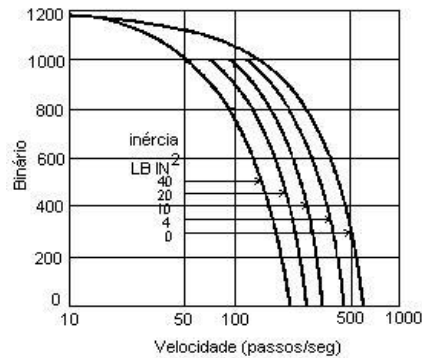


Figura 2-43 Variação da Zona de Arranque/Paragem com a inércia da carga [31]

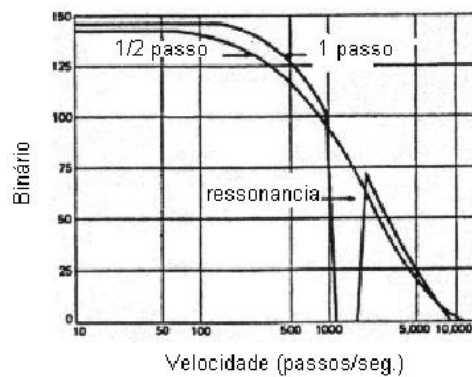


Figura 2-44 Zona de sobrevelocidade para seqüências de alimentação de meio passo e 1 passo. [31]

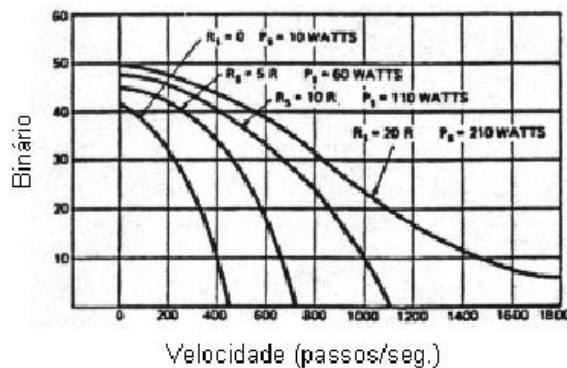


Figura 2-45 Zona de sobrevelocidade para vários circuitos de alimentação [31]

## **Instabilidades**

Como referido anteriormente, um dos principais problemas dos MPP consiste nas instabilidades. Apesar dos estudos desenvolvidos acerca deste problema os resultados práticos não são satisfatórios. Por um lado existem alguns tipos de instabilidades cujo conhecimento não é suficiente, por outro, mesmo para aquelas que se conhecem razoavelmente, o número de parâmetros que contribuem para o seu aparecimento é de tal forma elevado que se torna difícil o seu controlo.

Considerando a natureza dos fenómenos associados às instabilidades é possível a sua classificação em três tipos distintos:

- Ressonância;
- Ressonância Sub-Harmónica;
- Instabilidade Paramétrica.

Ressonância é o termo usado para um fenómeno que pode ocorrer a frequências de impulso múltiplas da frequência de oscilação natural do motor. Este é o fenómeno mais frequente e de mais fácil caracterização. A sua origem deve-se ao carácter oscilatório da resposta do motor a um único impulso.

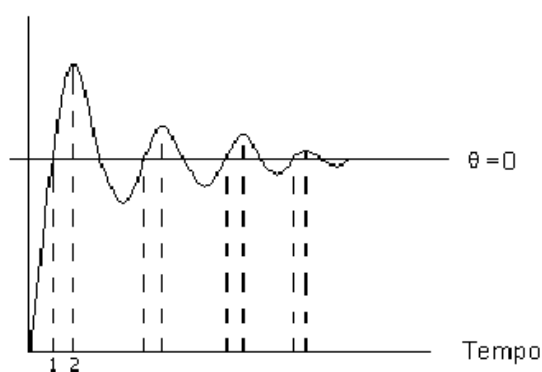


Figura 2-46 Resposta impulsional dum MPP [31]

A figura anterior representa a resposta do motor a um impulso. A oscilação do rotor em torno do ponto de equilíbrio deve-se à energia cinética acumulada durante o movimento. Esta energia será tanto maior quanto maior for a massa do rotor, assim como a sua velocidade. No instante  $t=0$  aquando do impulso a energia cinética é nula. O mesmo não se pode dizer entre o instante  $t=1$  e  $t=2$ , nem para todos os outros períodos de tempo delimitados pelo tracejado. Se durante estes períodos for dado um novo impulso, a condição inicial será de energia não nula, pelo que a amplitude das próximas oscilações será maior. Se o valor da amplitude for suficiente pode originar a perda de passo e portanto um mau funcionamento do motor.

Como referido anteriormente, para sabermos as frequências para as quais pode ocorrer ressonância necessitamos de saber qual a frequência de oscilação natural do motor. Esta pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$F_0 = \frac{\sqrt{\frac{K \times T_H}{J_T}}}{i \times \pi} \quad (2-3)$$

No qual  $J_T$  corresponde ao momento de inércia do motor mais carga,  $J_T = J_R + J_L, \text{kgm}^2$ ,  $T_H$ , Nm, ao binário de retenção,  $i$  ao nível de corrente e  $K$  ao número de impulsos por volta.

O problema da ressonância pode ser resolvido operando o motor com frequências abaixo de  $F_0$ . Torna-se então desejável aumentar  $F_0$  alterando o modo de excitação, número de impulsos por volta, ou a inércia do motor.

Para além da ressonância existe outro fenómeno denominado de Ressonância Sub-Harmónica. Este fenómeno ocorre normalmente para o modo de alimentação de meio passo e para frequências duplas das frequências para as quais ocorre a ressonância.

Por fim o ultimo fenómeno denomina-se de Instabilidade Paramétrica. Este ocorre normalmente para frequências muito elevadas, quando o motor funciona como motor síncrono. [31]

### 2.3.8 Regimes de funcionamento

Há três modos de excitação vulgarmente utilizados que são: passo normal, meio-passo, e micropasso.

Na operação de passo normal, o motor usa o ângulo de passo normal, por exemplo: um motor de 200 passos/revolução em passo normal anda em passos de 1,8 graus, enquanto em operação de meio-passo, operam com passos de 0,9 graus.

No caso do trabalho a desenvolver o motor vai funcionar em micropasso. Assim apresenta-se de uma forma resumida este tipo de funcionamento.

#### **Micropasso, Micro-Step**

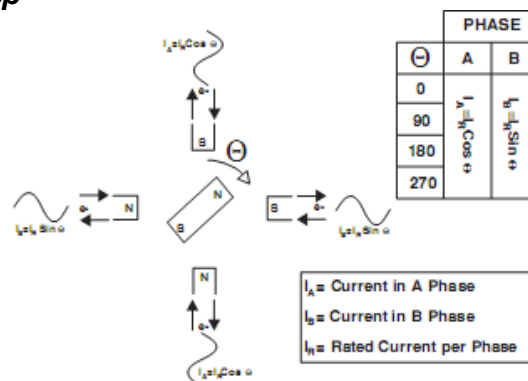


Figura 2-47 Esquema e cálculos para funcionamento em regime micropasso [31]

No modo de micropasso, o ângulo de passo natural de um motor pode ser dividido em muitos ângulos menores. Por exemplo, um motor com  $1,8^\circ$  tem 200 passos/revolução. Com o modo micropasso divisor de 10, ele passaria a ter passos de  $0,18^\circ$  e 2000 passos/revolução. Tipicamente, modos de micropasso variam de divisor de 10 a divisor de 256, 51 200 passos/revolução para um MPP de  $1,8^\circ$ . Os micropassos são produzidos proporcionando corrente nas duas bobinas de acordo com o seno e coseno. Este modo só é usado onde é necessário movimento "macio" ou maior resolução.

A geração do fluxo nos outros regimes de funcionamento é feita recorrendo a dois níveis de corrente, nomeadamente 0 e  $I_{on}$ . Estes dois níveis combinados em duas fases permitirão, no modo de meio-passo, aumentar o número de passo para o dobro.

Relembrando, se excitarmos a fase A seguida da fase B obtemos duas posições distintas do rotor, se excitarmos a fase A e a B simultaneamente uma posição intermédia é alcançada. Se agora for possível operar com mais níveis de corrente, a combinação dos mesmos em duas fases simultaneamente, permite outras tantas posições intermédias do rotor. Este é o princípio do micropasso.

Por outras palavras, no modo de micropasso é possível aumentar o número de passos por variação dos níveis de corrente de excitação de duas fases em simultâneo.

Quanto maior for o número de níveis de corrente utilizado, maior será o número de passos. Na figura 2-48 é possível visualizar a onda de corrente de alimentação de uma fase do motor alimentado em micropasso.

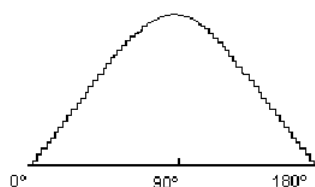


Figura 2-48 Forma de onda da corrente numa fase no modo micropasso [31]

### ***Vantagens e Desvantagens do micropasso***

Em muitas aplicações o micropasso pode ser usado para melhorar significativamente o desempenho global dos sistemas baseados em motores de passo, diminuindo simultaneamente a sua complexidade e preço. Basicamente o micropasso pode ser usado para resolver os problemas de ruído e ressonância, e aumentar a resolução e precisão de passo.

Nos pontos seguintes vamos apresentar algumas destas vantagens.

***Diminuição da Ressonância;*** embora seja difícil prever com segurança as frequências para as quais pode ocorrer a ressonância, sabe-se que estas se localizam

próximo de múltiplos ou submúltiplos da frequência de oscilação. Nestes pontos o funcionamento do motor é instável, sendo frequente a perda de passos, assim como o aumento dos níveis de ruído e vibração. Um dos principais factores para a ressonância corresponde ao carácter pulsatório do fluxo transmitido para o rotor. A energia transferida para o rotor, no pior caso, sem atrito, é dada pela expressão  $\frac{4 \times T_H}{n} \times 1 - \cos(f_e)$ , sendo  $f_e$  igual a  $45^\circ$  para o modo de excitação de meio-passo e  $90^\circ$  para passo completo. Como se pode ver, quanto menor for o ângulo de passo eléctrico  $f_e$ , menor será a energia transmitida para o rotor. No caso do micropasso o ângulo pode ser tão pequeno como  $2,8^\circ$ , pelo que, a energia transferida para o rotor é apenas 0,1% da energia transmitida em passo completo. Com níveis de energia tão baixos a ressonância praticamente não ocorre;

**Extensão da gama de frequências de alimentação;** quando alimentado com baixas frequências, no modo de passo-único ou meio-passo, o movimento do MPP torna-se descontínuo aumentando significativamente o ruído e as vibrações. Com o micropasso é possível estender até frequências próximas de 0 Hz o funcionamento sem ruído. Como vimos anteriormente com ângulos de passo 32 vezes inferiores em micropasso, a energia transferida para o rotor é apenas 0,1% da que seria em passo completo. Estes níveis de energia são absorvidos muito mais rapidamente pelo motor, diminuindo assim as vibrações e ruídos;

**“Caixa de velocidades” electrónica;** em certas aplicações são necessários ângulos de passo bastante reduzidos. Nestes casos o uso do micropasso pode ser vantajoso relativamente a outras soluções, como por exemplo a inclusão de um sistema de desmultiplicação mecânica;

**Melhoria da precisão de passo;** como foi referido anteriormente, a posição de paragem do rotor pode não ser a desejada. Se a precisão for um factor determinante é possível compensar o desvio excitando uma das fases com um determinado nível de corrente.

Apesar das vantagens deste modo, a sua implementação pode ser bastante complexa. Por outro lado o preço é elevado quando comparado com a implementação dum sistema para meio-passo ou passo-completo. Por estas razões este modo só é utilizado quando as especificações da aplicação o exigem, nomeadamente por serem necessários ângulos de passo reduzidos, grande precisão, ou funcionamento sem ruído em toda a gama de velocidades. [31] [33] [36] [37]

## 2.4 Sistema de controlo e Tipos de *Drive*

Na aplicação que se irá desenvolver, será necessário fazer o controlo de posição e será feita variação de velocidade, para isso será necessário um sistema de controlo, que se inicia no computador e vai acabar no motor. Neste ponto apresentar-se-á o sistema de controlo genérico para os motores de passo e as diversas tecnologias para as *drive*.

### 2.4.1 Sistemas de controlo

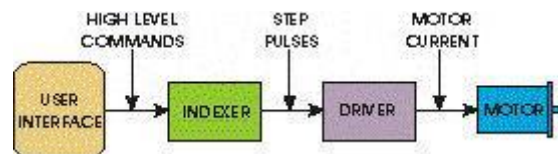


Figura 2-49 Sistema de controlo genérico para um motor de passo [37]

Como mostra a figura anterior, o sistema de controlo de motores de passo é composto por um conjunto equipamentos, que são:

**Interface com o utilizador:** permite a “comunicação” entre a pessoa e o motor, esta interface com o utilizador, que pode ser um programa informático, isto é, um computador, PLC, *Programmable Logic Control*, por exemplo, que envia comandos de alto nível para o controlador, se existir, ou comandos de baixo nível para a *drive*.

**Controlador:** traduz os sinais anteriores, em sinais de passo *step* e sinais de direcção que são enviados para a *drive*. É de referir que nem todos os sistemas necessitam de controlador. Este equipamento é mais utilizado quando as aplicações requerem funções como aceleração, desaceleração, distâncias, etc.

**Amplificador:** recebe os sinais de baixo nível, que podem advir do controlador ou da Interface com o utilizador, e alimenta as bobinas do motor;

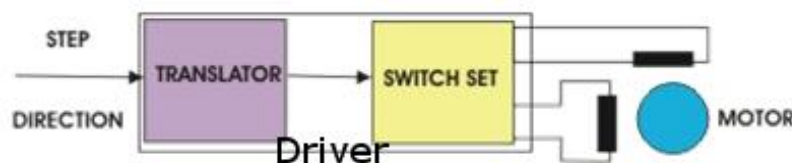


Figura 2-50 Sistemas de blocos de uma *drive* amplificador [37]

Como se pode ver na figura anterior, a *drive* ainda pode ser dividida em:

**Translator:** converte os sinais de passo *Step* e de direcção, que podem vir do *indexer* ou da interface com o utilizador, em impulsos eléctricos adequados ao motor;

**Switch Set:** sistema que alimenta as bobinas do motor. É este sistema que diferencia as *drive*, isto é, existem várias técnicas de funcionamento da *Switch Set*.

**Motor:** é o equipamento que vai realizar o movimento, isto é, equipamento electromagnético que converte os sinais que chegam às suas bobinas e o transforma em movimento.

#### 2.4.2 Tipos de Drive

São as *drive* o “cérebro” deste sistema e são constituídas por circuitos de electrónica de potência. Estes equipamentos electrónicos permitem o funcionamento contínuo e adequado dos motores, para isso têm de executar duas tarefas fundamentais:

1. Mudar a direcção de fluxo magnético na bobina, controlando a direcção e/ou caminho da corrente, isto é, mudar de circuito por onde passa a corrente;
2. Controlar e limitar a amplitude da corrente que passa nas bobinas, garantindo tempos de crescimento e decréscimo de corrente, tão curto quanto possível, para obtenção de um funcionamento ideal.

Existem genericamente dois tipos de tecnologias que são aplicadas nas *drive*. A principal diferença é a maneira como esta electrifica as bobinas do motor. [33] [35]

#### **Controlo da direcção do fluxo magnético**

Para um funcionamento contínuo do motor de passo é necessário trocar o sentido, do fluxo magnético nas bobinas independentemente de qual seja a bobina a ser actuada. Esta troca, é feita mudando o sentido da corrente e pode ser realizada por duas técnicas diferentes, usando uma *drive* unipolar ou bipolar, conforme a alimentação do motor seja unipolar ou bipolar.

### Controlo Bipolar, Bipolar Drive

Este tipo de controlo é capaz de gerar um fluxo de corrente através dos enrolamentos em dois sentidos. Como neste caso os enrolamentos das bobinas não possuem uma ligação intermédia, que permita inverter a corrente serão necessários quatro interruptores, transístores comutadores, por exemplo, para cada enrolamento, como mostra a figura 2-51. [33] [34] [39]



Figura 2-51 Excitação bipolar [39]

### Controlo Unipolar, Unipolar drive

Este tipo de controlo é capaz de gerar um fluxo de corrente através dos enrolamentos num só sentido. Neste caso existe uma ligação intermédia, ligação central, do enrolamento da bobina que está sempre ligada ao mesmo potencial, de forma que apenas são necessários dois interruptores para inverter o sentido da corrente, tal como mostra a figura 2-52. Sendo claro que existe sempre metade do enrolamento que não é utilizada. [33] [34] [39]



Figura 2-52 Excitação unipolar [39]

### Controlo da intensidade de corrente

Para limitar a dissipação de energia na resistência do enrolamento da bobina, e controlar o binário, a corrente tem de ser controlada. Existem duas maneiras principais para fazer a limitação da corrente que são *drive* limitadora de corrente *Current-limited drive* ou *Chopper-Drive*. Estas duas técnicas podem ser aplicadas tanto a motores bipolares como motores unipolares.

### Drive de Tensão Constante / L/R Drive / Resistance Limited (RL) Drive

Este tipo de controlo é a tecnologia mais antiga, mas ainda existe em algumas aplicações de baixa potência, pois é simples e barato. Este tipo de controlo apresenta um baixo a moderado desempenho.

Este método basicamente utiliza uma fonte de tensão constante,  $+V_D$ , com valor de tensão superior à tensão nominal do motor e com uma série de resistências *Dropper*, *Dropping Resistor* que são usadas para limitar a corrente, como ilustra a figura 2-53. [33] [34] [36] [37] [38] [41]

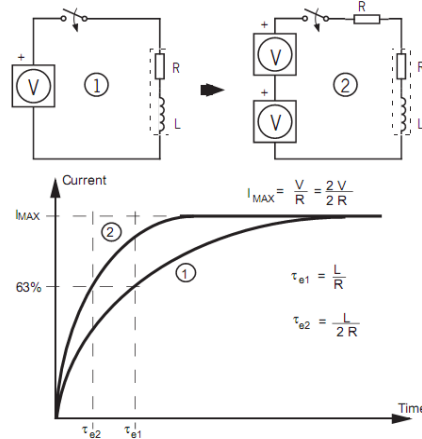


Figura 2-53 Esquema de ligação *L/R Drive* e gráficos da tensão e corrente a esta associado [31]

### Controlo por dupla tensão, Dual Voltage, Bi-level drive

O controlador de dois níveis usa uma tensão alta para obter um rápido aumento da corrente num intervalo de tempo muito curto nas bobinas do motor. Quando o nível de corrente operacional apropriado é alcançado, o controlador desliga a tensão alta e sustenta o nível actual a partir de uma baixa tensão. Enquanto o motor muda de passo, a tensão alta dirige a corrente nas bobinas e provê uma corrente maior do que a exigida para aumentar a taxa de passo. Esta troca de tensão – baixa, alta, baixa... – resulta numa eficiência mais alta com um custo mais baixo que aquele alcançável por *choppers*, outras técnicas de controlo. Esta técnica não causa problemas de aquecimento do motor ou problemas de EMI, *Electromagnetic Interference*, e RFI, *Radiofrequency Interference*, associados com controladores do tipo *chopper*. Esta técnica de controlo de dois níveis pode controlar apenas motores no modo meio-passo ou no modo passo normal.

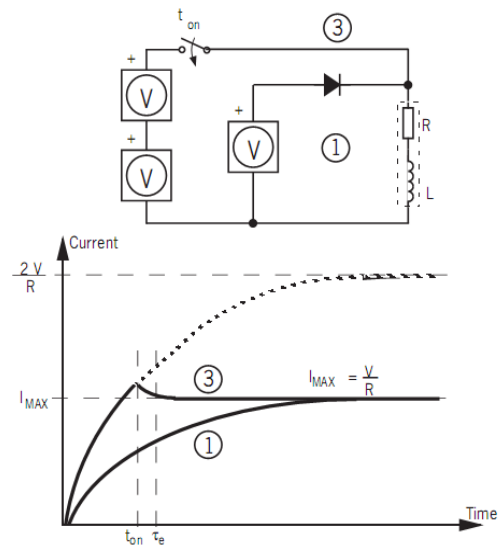


Figura 2-54 Esquema de ligação *BiLevel* e gráficos da tensão e corrente a esta associado [31]

Duma forma mais resumida, neste tipo de controlo é utilizada uma segunda fonte de alimentação,  $+V_1$ , mais elevada do que a tensão normal,  $+V_D$ . Esta fonte de alimentação só é ligada no inicio, quando é necessário um crescimento rápido da corrente, e é desligado quando a intensidade atinge o valor nominal. O inconveniente deste método é o facto de ser necessário ter duas fontes de alimentação. [33] [36] [40] [41]

*Drive de Corrente Constante, Chopper Drive / Pulse-Width Modulation, PWM, Drive*

Os *choppers* são sem dúvida as *drive* mais utilizadas nas aplicações industriais, embora esta seja tipicamente a técnica de controlo mais cara, mas oferece um elevado desempenho e uma alta eficiência.

Este método é ideal tanto para controlar a corrente como para obter bons tempos de crescimento da corrente.

A ideia básica é utilizar uma fonte de tensão, sendo esta tensão

mais elevada do que a tensão nominal do motor. Estas usam uma ponte com quatro transístores, díodos recirculantes e um sensor de corrente resistivo, tipicamente 0,1  $\Omega$ . Usam adicionalmente um conjunto de transístores que permite eliminar duas fontes de alimentação, controlo bi-nível. Fazendo o controlo do *duty cycle* do *chopper*, isto é, fazendo o controlo dos disparos dos transístores da *drive*, obtém-se uma corrente média e uma tensão média apropriada ao motor em causa, em qualquer instante de funcionamento.

Nos *choppers* as bobinas são electrificadas até à corrente máxima e seguidamente voltam a uma intensidade de corrente mais baixa, usando a comutação dos transístores. Isto é, é aplicada uma tensão até que a corrente do enrolamento atinja um determinado limite que é controlado por um sensor. Este sensor, é um sensor de corrente resistivo colocado

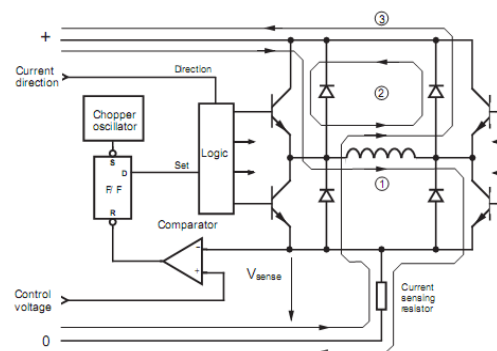


Figura 2-55 Esquema de ligação e de funcionamento de um *chopper* de corrente constante (Ponte H) [31]

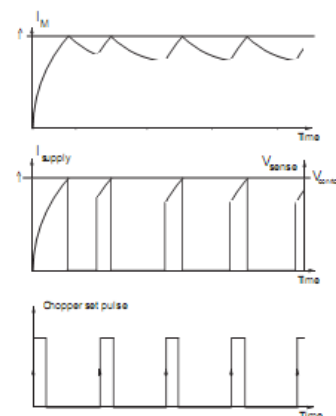


Figura 2-56 Formas de onda de um circuito básico de um *chopper* [31]

em série com o enrolamento do motor, e monitoriza a aumento linear da intensidade da corrente no motor. Quando atingido o valor de corrente desejado, a fonte é então desligada e continua desligada até que a corrente decaia para um valor mais baixo pré-determinado, sendo a corrente no enrolamento mantida pelos díodos. Nessa altura a tensão é reaplicada e assim sucessivamente.

Isto é, numa forma mais simples, os controladores PWM, modelação por largura de impulso, usam uma única fonte de energia de tensão elevada. São igualmente capazes de ajustar a tensão aplicada ao longo do enrolamento para forçar e manter a corrente nominal, sendo esta corrente no motor controlada através de transístores e díodos. A maior vantagem dos *choppers* é a capacidade de controlar motores no modo micropasso. As desvantagens são a produção EMI e RFI e problemas de aquecimento no motor. São na maioria das vezes bipolares. [33] [34] [36] [37] [38] [41]

## 3 Estrutura

Neste capítulo é apresentado, em primeiro lugar, o estudo da estrutura que suportará o utilizador e permitirá a sua movimentação.

Alguns dos requisitos que a estrutura tem de satisfazer:

- Estrutura móvel;
- Estrutura de fácil montagem e desmontagem;
- Ocupação mínima a nível espacial.

Seguidamente apresenta-se uma breve descrição da construção da estrutura e resultado final.

### 3.1 Primeiros estudos

A primeira versão teve uma forma de paralelepípedo, sendo constituída por dois motores, duas roldanas e uma cadeira. No entanto, mostrou alguns problemas, como por exemplo, os motores teriam de ter um binário bastante elevado para movimentar o conjunto cadeira/utilizador e apresentava alguma dificuldade em simular o movimento de pêndulo.

Tentou-se colmatar o problema do binário dos motores com “mecanismos de transmissão de potência mecânica”. Estes mecanismos permitem desmultiplicar a força sendo exemplo um sistema de engrenagens ou roldanas. Estes mecanismos não eram muito fiáveis nem práticos para transportar. Assim sendo acrescentaram-se duas traves à parte superior da estrutura, cruzadas em diagonal, sustentando-se assim o peso do utilizador. Esta alteração permitiu realizar movimentos numa direcção, por exemplo lateral, com um só motor libertando o outro para se fazer movimentar o utilizador noutra direcção, profundidade.



Figura 3-1 Primeiros estudos

Como já foi referido, pretende-se uma estrutura móvel com fácil montagem e desmontagem. Tendo este facto em atenção, surgiu a ideia de utilizar a estrutura dum baloiço de criança com algumas alterações que permitissem sustentar o utilizador e realizar as movimentações pretendidas. Essas alterações serão descritas mais adiante.

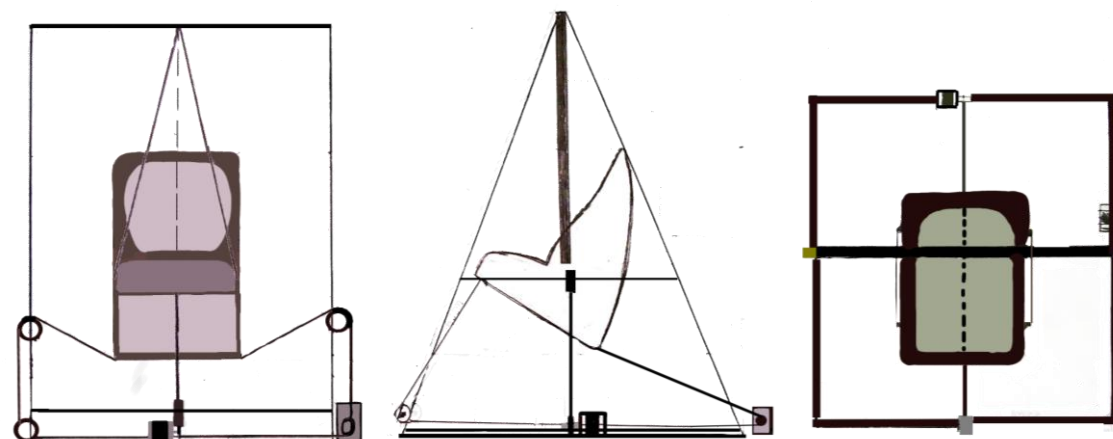


Figura 3-2 Estudo pré-final, situação de equilíbrio

A movimentação da cadeira é assegurada por dois motores. Um dos motores é responsável pelo movimento em profundidade e o outro pelo movimento lateral.

Para o movimento lateral usa-se um cordel fixo nos lados da cadeira, que passa por três roldanas fixando-se numa polia solidária com o veio do motor, motor 1. A figura seguinte mostra como a cadeira se comporta num caso extremo de movimentação lateral.

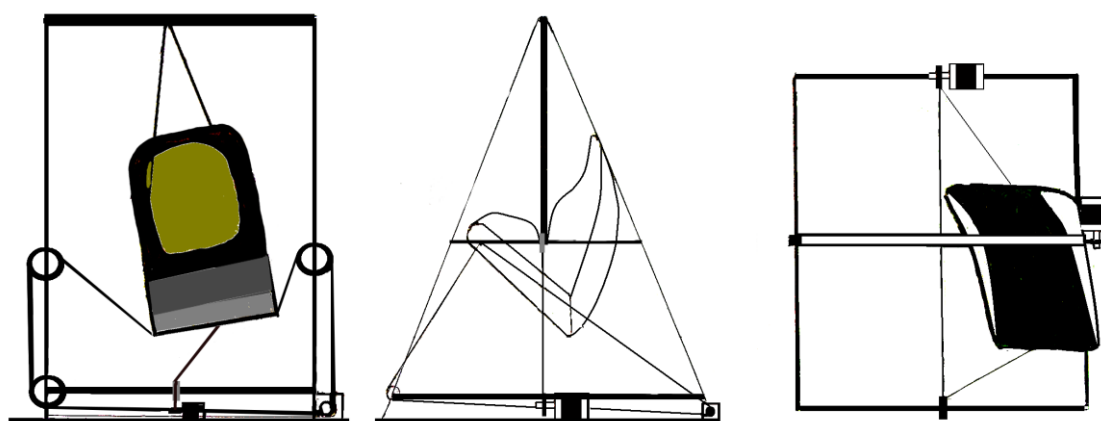


Figura 3-3 Estudo pré-final, movimentação lateral

Para o movimento em profundidade utiliza-se um cordel fixo por baixo da cadeira mais descaído para a parte posterior desta. Este passa por uma roldana

fixando-se numa polia solidária com o veio do motor, motor 2. A figura seguinte mostra como a cadeira se comportaria num caso extremo de movimentação em profundidade.

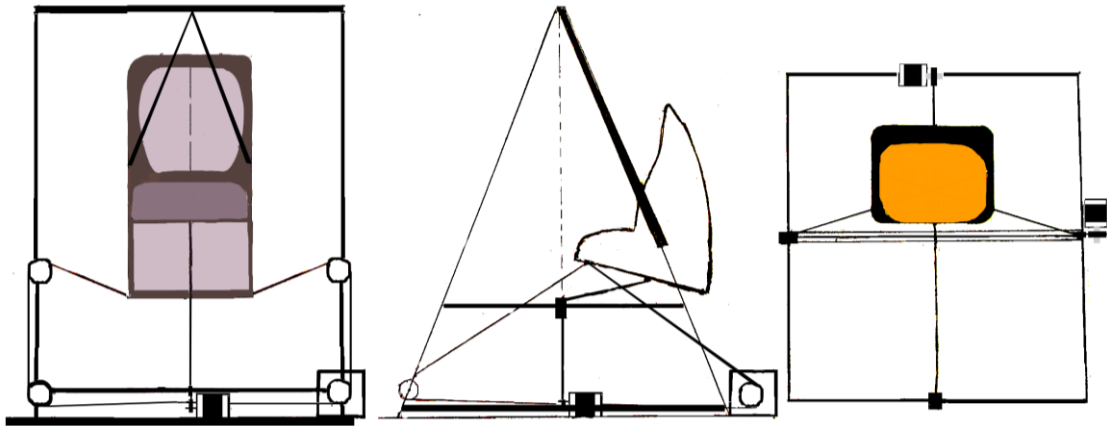


Figura 3-4 Estudo pré-final, movimentação em profundidade

É de referir que a estrutura apresentada nestes quatro últimos parágrafos é muito similar à estrutura final, tanto em termos estruturais como de funcionamento. Por este motivo a apresentação da estrutura final vai ser muito breve.

Assim sendo, nesta estrutura final o processo para promover o movimento lateral é semelhante ao que já foi descrito. A figura seguinte mostra o comportamento da cadeira num caso extremo de movimentação lateral, A e C;

Para o movimento em profundidade o processo é semelhante ao que já foi descrito. A figura seguinte mostra como a cadeira se comportaria num caso extremo de movimentação em profundidade, B e C.

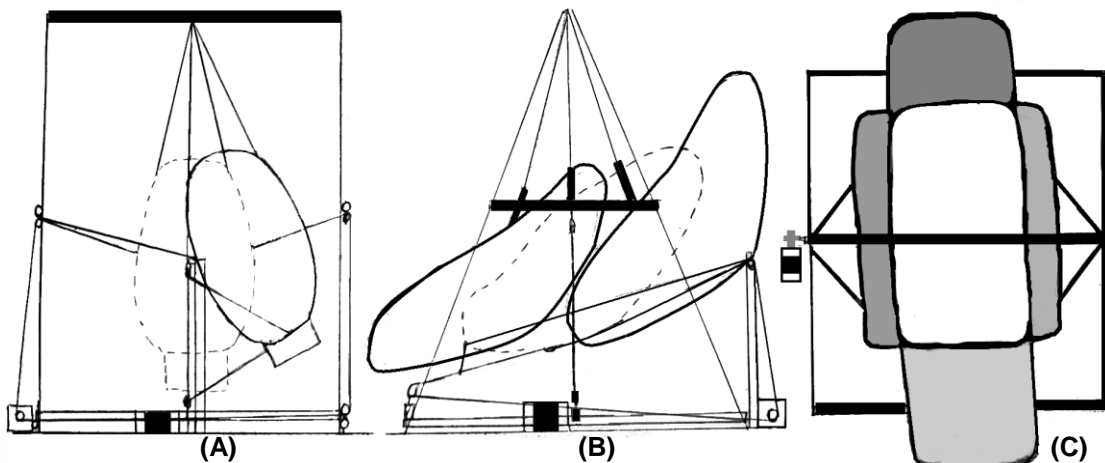


Figura 3-5 Estrutura final e respectivas movimentações.

### 3.2 Construção

Neste ponto faz-se a exposição das várias fases de construção da estrutura e a apresentação do resultado final.

#### **Base**

A base para a estrutura foi um baloiço de criança. (Altura: 150 cm, Profundidade: 120 cm, Largura: 110 cm)



Figura 3-6 Estrutura base

#### **Construção**

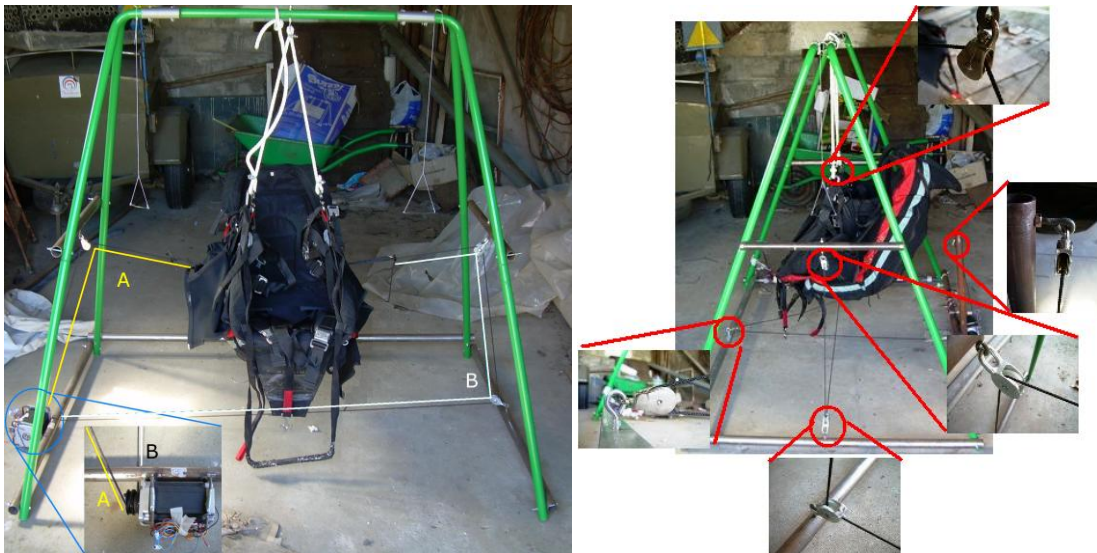


Figura 3-7 Fases de Construção

Primeira fase; o reforço da estrutura, partes inferior e intermédia da estrutura;

Segunda fase; colocação das roldanas e seus apoios nas partes inferior e intermédia da estrutura. Soldaram-se, também, os apoios para os motores, parte lateral esquerda e traseira.

Terceira fase: Colocação da cadeira; tendo o cuidado de permitir uma fácil entrada e saída do utilizador, seguida das ligações da cadeira aos motores.

Última fase: Ligação da instalação eléctrica; esta fase divide-se em colocação e ligação dos motores e colocação e ligação dos sensores de mão.



Figura 3-8 Estrutura Final

## 4 Física

Para o dimensionamento do motor é indispensável determinar o binário necessário para fazer movimentar o conjunto cadeira/piloto, sendo, para isso, necessário calcular variáveis como pesos, tensões, inércias entre outras variáveis físicas.

Assim sendo, apresentam-se os estudos para a estrutura que será implementada, determinando-se as fórmulas físicas que descrevem os movimentos suportados por esta, seguido da determinação dos seus respectivos valores.

Para finalizar, determina-se o binário do motor para diferentes situações.

### 4.1 Formulação física

#### Dimensionamento do motor

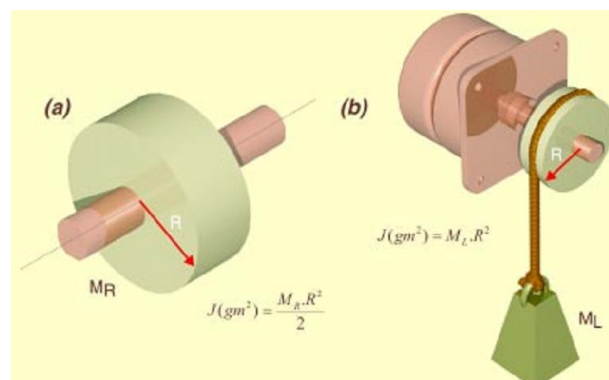


Figura 4-1 Inércias presentes num motor [42]

Quando se escolhe um motor, no caso deste trabalho um MPP, para uma dada aplicação electromecânica este deve desenvolver um binário que consiga vencer a inércia do rotor e da carga mecânica ao qual está ligado. A equação básica para o binário ( $T$ ) é dada por:

$$T = F \times R \quad (4-1)$$

Onde  $T$  é o binário em newton metro, Nm,  $F$  é a força em newton, N, e  $R$  é o raio em metros, m. A equação 4-1 acima pode ser interpretada como um braço de raio  $R$  ligado numa extremidade a um eixo de motor e na outra a uma massa  $M$  que serve de carga a ser erguida.

Por outro lado, o binário necessário para acelerar uma determinada carga inercial é dado por:

$$T = J \times \alpha \quad (4-2)$$

Onde  $J$  é o momento de inércia em kilogramas metro quadrado,  $\text{kgm}^2$ , e  $\alpha$  é a aceleração angular em radianos por segundo ao quadrado,  $\text{rad/s}^2$ .

Momento de inércia das roldanas e polias, normalmente esta informação é fornecida pelo fabricante, mas a roldanas usadas neste trabalho não eram fornecidas com essa informação, devido a esse facto será necessário a seguinte fórmula para calcular as inércias.

$$J = \frac{1}{2} \times m \times r^2 \quad (4-3)$$

Onde  $m$  é a massa kilogramas, kg, e  $r$  é o raio em metros, m.

Será necessário também calcular o momento de inércia do conjunto cadeira/piloto sendo para este efeito utilizada a seguinte fórmula:

$$J = m \times r^2 \quad (4-4)$$

Onde  $m$  é a massa kilogramas, kg, e  $r$  é o raio em metros, m. [42] [43] [44] [45]

## Estrutura

Começando pelo esquema de forças presentes no sistema que está em estudo.

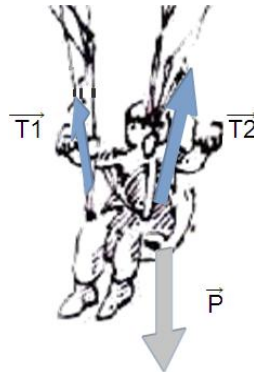


Figura 4-2 Esquema de forças numa cadeira de parapente em suspensão

$$P \Rightarrow F_{\text{peso}} = m_{\text{piloto}} + m_{\text{cadeira}} \times \vec{g} \quad (4-5)$$

Considerando a figura seguinte:

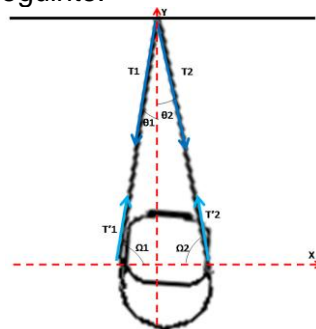


Figura 4-3 Esquema de forças numa cadeira de parapente em suspensão

## Movimentação lateral

### Estática

Neste caso, o peso será suportado pelos dois fios identificados como  $L_1$  e  $L_2$ . Aqui, os fios de amarração lateral encontram-se na eminência de entrar em movimentação, sendo que, nesta situação de equilíbrio, não exercem qualquer tipo de força sobre o conjunto cadeira/utilizador, figura seguinte.

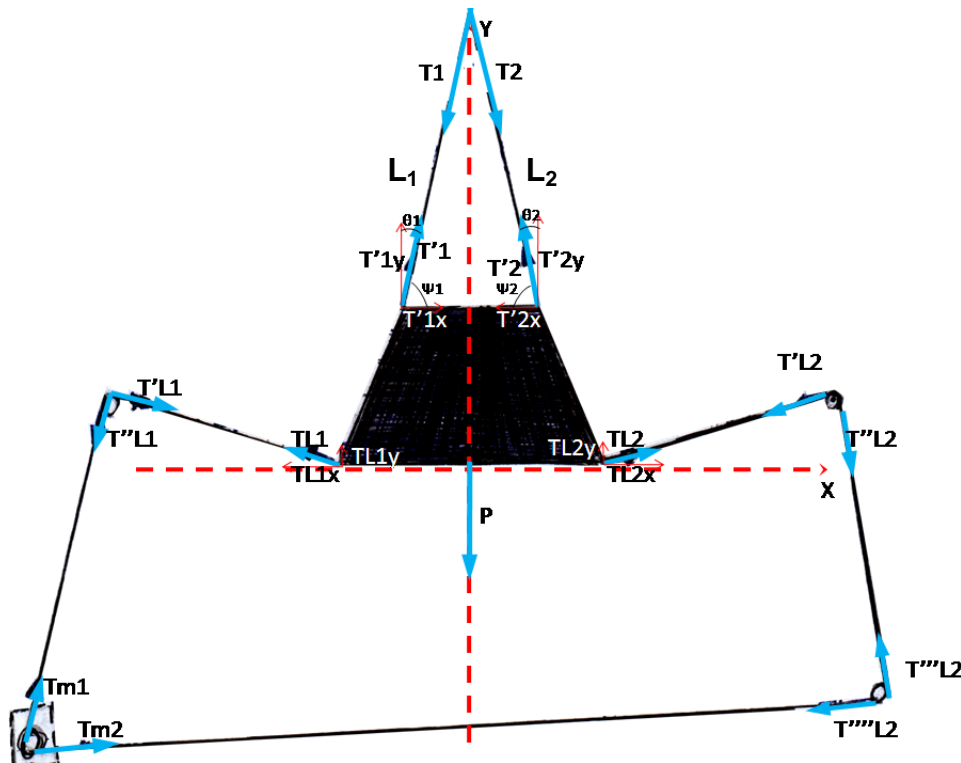


Figura 4-4 Física, movimento lateral, situação de equilíbrio

O somatório das forças tem que ser nulo:

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \quad (4-6)$$

$$\vec{T}_1 + \vec{T}_2 + \vec{T}_{l1} + \vec{T}_{l2} + \vec{P} = 0 \quad (4-7)$$

O somatório do momento das forças tem que ser nulo:

$$\sum \vec{M}_0(\vec{F}) = \vec{0} \quad (4-8)$$

$$\vec{M}_0(\vec{T}_1) + \vec{M}_0(\vec{T}_2) + \vec{M}_0(\vec{T}_{l1}) + \vec{M}_0(\vec{T}_{l2}) + \vec{M}_0(\vec{P}) = 0 \quad (4-9)$$

Nesta situação, situação de equilíbrio, representada na figura anterior, as tensões  $T_{l1}$ ,  $T_{l2}$  são nulas e não existirá momento das forças, pois o conjunto está parado e em equilíbrio:

$$\begin{cases} \vec{T}_{1y} + \vec{T}_{2y} = \vec{P} \\ \vec{T}_{1x} - \vec{T}_{2x} = 0 \end{cases} \quad (4-10)$$

$$\begin{cases} \vec{T}_1 \cos(\theta_1) + \vec{T}_2 \cos(\theta_2) = \vec{P} \\ \vec{T}_1 \cos(\psi_1) - \vec{T}_2 \cos(\psi_2) = 0 \end{cases} \quad (4-11)$$

### Em movimento

Seguidamente, apresenta-se, um esquema de forças genérico, onde se mostra as forças existentes no sistema quando este está em movimentação lateral, figura 4-5.

Para o cálculo das forças neste sistema, ter-se-á de ter em consideração, as apreciações tidas no exemplo anterior:

- O somatório das forças tem que ser nulo;
- O somatório do momento das forças tem que ser nulo.

Dever-se-á ter em atenção algumas particularidades que estão associadas à estrutura:

Para este cálculo as roldanas são consideradas fixas, embora na realidade não o sejam;

O peso é suportado maioritariamente pelos fios  $L_1$  e  $L_2$ ;

O fio de amarração do lado esquerdo ou direito da figura seguinte deixa de estar em tensão, logo o fio do lado contrário entra em movimentação, respectivamente. Assim sendo, o sistema terá três tensões.

Seguidamente apresenta-se uma figura com um esquema de forças detalhado para esta situação.

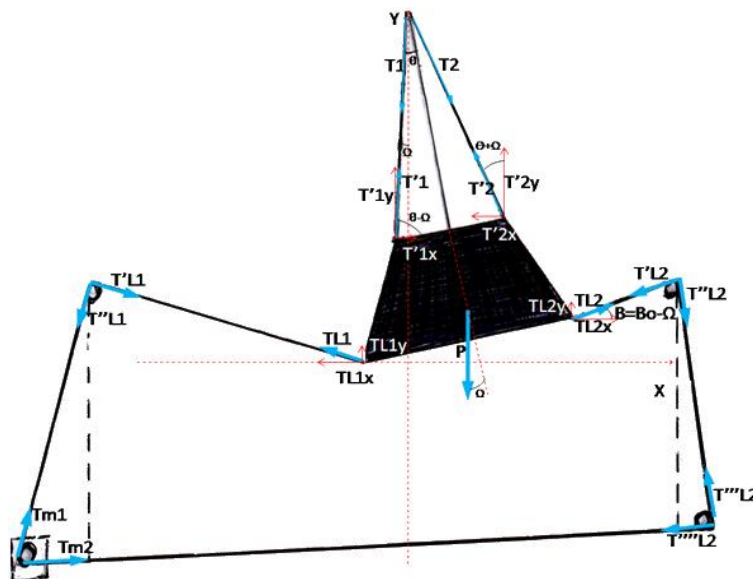


Figura 4-5 Física, movimento lateral, situação de movimento

O sistema de equações que descreve o sistema anterior.

$$\begin{cases} \vec{T}_{1x} - \vec{T}_{2x} + \vec{T}_{l2x} = \vec{0} \\ \vec{T}_{1y} + \vec{T}_{2y} + \vec{T}_{l2y} = \vec{P} \\ \beta_o = \beta + \Omega \\ -\vec{P} \times L \times \cos(\theta) \times \text{sen}(\Omega) + \vec{T}_{l2} \times L \times \text{sen}(\beta + 90 - \theta) = 0 \end{cases} \quad (4-12)$$

$$\begin{cases} \vec{T}_1 \text{sen}(\theta - \Omega) - \vec{T}_2 \text{sen}(\theta + \Omega) + \vec{T}_{l2x} \cos(\beta) = \vec{0} \\ \vec{T}_1 \cos(\theta - \Omega) - \vec{T}_2 \cos(\theta + \Omega) + \vec{T}_{l2x} \text{sen}(\beta) = \vec{P} \\ \beta = \beta_o - \Omega \\ -\vec{P} \times L \times \cos(\theta) \times \text{sen}(\Omega) + \vec{T}_{l2x} \times L \times \text{sen}(\beta + 90 - \theta) = 0 \end{cases} \quad (4-13)$$

### Movimentação em profundidade

Neste ponto apresenta-se o estudo físico relativo à movimentação em profundidade.

#### Em estática

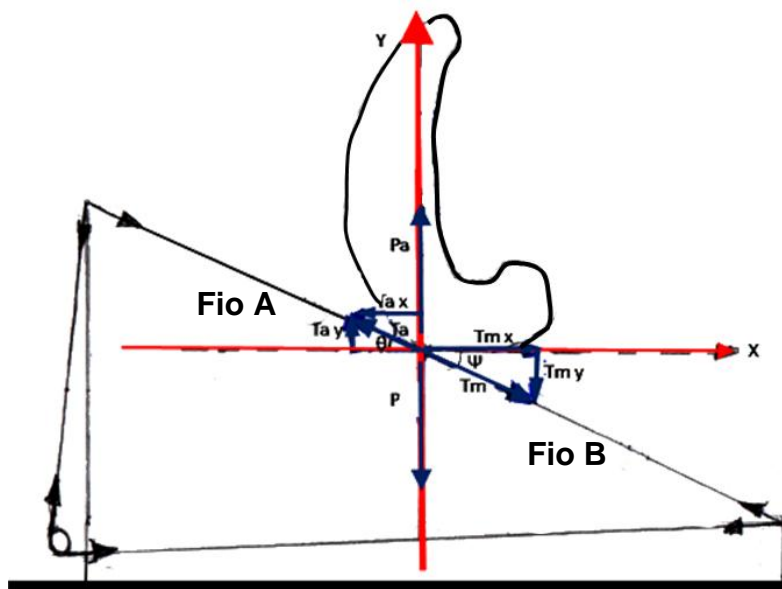


Figura 4-6 Física, movimento em profundidade, situação de estática

Nesta situação, o fio A e o fio B estão esticados na eminência de provocar a movimentação da cadeira/utilizador, estes fios não suportam o peso, mas provocam a movimentação da cadeira/utilizador, tensões assinaladas com  $T_a$  e  $T_m$ .

O peso estará suportado em fios que estão colocados sobre o eixo do  $yy$ , isto é, a força exercida pelo utilizador,  $P_p$  é suportada pelos fios de sustentação,  $P_a$ .

Seguidamente apresentam-se as fórmulas genéricas que descrevem o esquema anterior.

$$\vec{T}_a - \vec{T}_m = 0 \quad \&\& \quad \vec{P}_a = \vec{P}_p \quad (4-14)$$

$$\begin{cases} \vec{T}_{ay} - \vec{T}_{my} + \vec{P}_a - \vec{P}_p = 0 \\ \vec{T}_{ax} - \vec{T}_{mx} = 0 \end{cases} \quad (4-15)$$

$$\begin{cases} \vec{T}_a \text{sen}(\theta) = \vec{T}_m \text{sen}(\psi) \\ \vec{T}_a \text{cos}(\theta) = \vec{T}_m \text{cos}(\psi) \end{cases} \quad (4-16)$$

Como já foi referido anteriormente, os fios A e B estão em eminência de mover a cadeira/utilizador. Assim sendo, na situação estacionária e em equilíbrio, figura anterior, os fios não exercem qualquer tipo de força mantendo-se a cadeira imóvel.

**Para ângulos positivos**

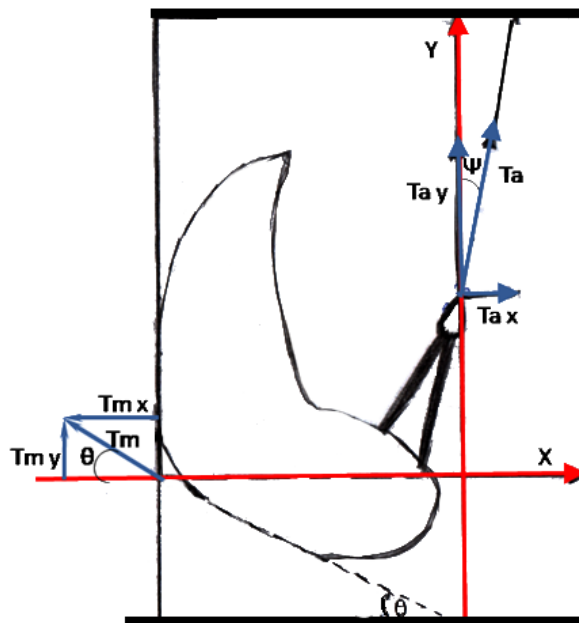


Figura 4-7 Física, movimento em profundidade, movimentação para trás

A figura anterior, mostra o esquema de forças quando a cadeira/utilizador se encontra em desequilíbrio, na situação de movimentação para a retaguarda.

Seguidamente apresentam-se as fórmulas genéricas que descrevem o esquema anterior.

$$\begin{cases} \vec{T}_{Ay} + \vec{T}_{My} = \vec{P} \\ \vec{T}_{Ax} - \vec{T}_{Mx} = 0 \end{cases} \quad (4-17)$$

$$\begin{cases} \vec{T}_A \text{cos}(\psi) + \vec{T}_B \text{sen}(\theta) = \vec{P} \\ \vec{T}_A \text{sen}(\psi) - \vec{T}_B \text{cos}(\theta) = 0 \end{cases} \quad (4-18)$$

### Para ângulos negativos

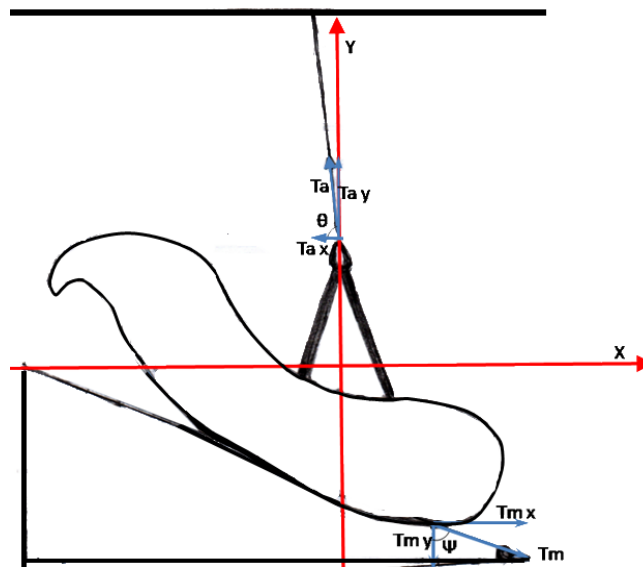


Figura 4-8 Física, movimento em profundidade, movimentação para trás

A figura anterior, mostra o esquema de forças quando a cadeira/utilizador se encontra em desequilíbrio, na situação de movimentação para a frente.

Seguidamente apresentam-se as fórmulas genéricas que descrevem o esquema anterior. [42] [43] [44] [45]

$$\begin{cases} \vec{T}_{Ay} - \vec{T}_{My} = \vec{P} \\ \vec{T}_{Ax} - \vec{T}_{Mx} = 0 \end{cases} \quad (4-19)$$

$$\begin{cases} \vec{T}_A \text{sen}(\theta) - \vec{T}_M \text{cos}(\psi) = \vec{P} \\ \vec{T}_A \text{cos}(\theta) - \vec{T}_M \text{sen}(\psi) = 0 \end{cases} \quad (4-20)$$

## 4.2 Valores obtidos

### Força desenvolvida pelo motor

O motor a utilizar tem um binário de 12 Nm. Segundo a equação 4-1 e sabendo que a polia que está solidária com o veio do motor tem 0,03 m de raio, temos que o fio que nela enrola promove uma força de 400 N.

### Peso do conjunto cadeira/pessoa

Cálculo do peso do conjunto cadeira/pessoa, considerando os seguintes valores:

Massa da cadeira aproximadamente 5 kg;

Massa da pessoa aproximadamente 120 kg.

Pela equação 4-5:

$$P \Rightarrow \vec{F}_{\text{peso}} = 1225,75 \text{ N}$$

### **Movimentação lateral**

#### **Estática**

Pela figura 4-5:

Para um  $\theta_1$  igual  $\theta_2$  com um valor aproximadamente de  $11^\circ$ , ângulo que é feito entre o fio de sustentação e a vertical;

Para um  $\psi_1$  igual  $\psi_2$  com um valor aproximadamente de  $79^\circ$ , ângulo que é feito entre o fio de sustentação e a horizontal, isto é, resultado de  $90^\circ - 11^\circ$ , pela equação 4-11, temos:

$$\begin{cases} \vec{T}_1 = 624 \text{ N} \\ \vec{T}_2 = 624 \text{ N} \end{cases} \text{ ou } \begin{cases} \vec{T}_1 = 64 \text{ kgf} \\ \vec{T}_2 = 64 \text{ kgf} \end{cases}$$

Nota: Os valores dos ângulos foram obtidos a partir de mediações na estrutura.

#### **Em movimento**

Devido à estrutura de sustentação, o ângulo  $\Omega$  estará compreendido entre  $0^\circ$  e  $11^\circ$ , tendo estes valores sido obtidos experimentalmente, partir da movimentação da cadeira. Ângulo  $0^\circ$ , situação da cadeira ao centro da estrutura e ângulo  $11^\circ$ , situação em completo desequilíbrio, isto é, a cadeira encontra-se completamente “encostada” a um dos lados da estrutura, figura 4-5.

Pela equação 4-13 e para  $\Omega = 11^\circ$ , a situação mais desfavorável as tensões apresentam os seguintes valores;

$$T_1 = 646,87 \text{ N}; T_2 = 624,35 \text{ N}; e T_{ix} = 233,88 \text{ N} \quad \text{Com o } x=1 \text{ ou } x=2$$

Binário da carga, pela equação 4-1;

Para uma força de 233,88 N e um raio da roldana de 0,03 m:

$$\tau_{ix} = 7,02 \text{ Nm} \quad \text{Com o } x=1 \text{ ou } x=2$$

Momento de inércia das roldanas, partindo da equação 4-3;

Os valores obtidos foram na ordem de  $4 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$ , não sendo utilizados nos cálculos.

Momento inércia do motor;

$$J_{\text{Motor}} = 4 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

Momento de inércia da massa, partindo da equação 4-4;

$$J_{\text{Massa}} = 0,1125 \text{ kgm}^2$$

Momento inércia total;

$$J_{\text{total}} = 0,1125 \text{ kgm}^2$$

Binário resistente;

Na roldana onde enrola o fio e que tem um raio de 0,03 m e a aceleração é no máximo de  $0,4 \text{ m/s}^2$  terá um valor de  $13,3 \text{ rad/s}^2$ . Partindo da equação 4-2:

$$\tau_R = 1,51 \text{ Nm}$$

Binário total;

$$\tau_{TT} = \tau_T + \tau_R \quad \tau_{TT} = 8,53 \text{ Nm}$$

A força exercida no fio que enrola na polia solidária com o veio do motor;

$$\tau_{TT} = T_{lx} \times R_a \quad T_{lx} = 284,21 \text{ N} \quad \text{Com o } x=1 \text{ ou } x=2$$

A força máxima desenvolvida na polia solidária com veio do motor é de 400 N e a força necessária para movimentar um dos lados do sistema é de 284,21 N, logo este sistema de motor e roldanas permite movimentar o conjunto cadeira/piloto.

### ***Movimentação em profundidade***

#### ***Para ângulos positivos***

Devido à estrutura de sustentação, o ângulo  $\psi$  estará compreendido entre  $0^\circ$  a  $15^\circ$ , tendo estes valores sido obtidos experimentalmente, a partir da movimentação da cadeira. Ângulo  $0^\circ$ , situação da cadeira no centro da estrutura e ângulo  $15^\circ$ , situação em completo desequilíbrio, isto é, a cadeira encontra-se completamente “encostada” à parte traseira da estrutura, figura 4-7.

Pela equação 4-18 e para  $\psi=15^\circ$ , a situação mais desfavorável as tensões apresentam os seguintes valores;  $T_A=1121,53,18 \text{ N}$  e  $T_M=322,99 \text{ N}$

Binário da carga, pela equação 4-1;

Para uma força de 322,99 N e um raio da roldana de 0,03 m:

$$\tau_M = 9,67 \text{ Nm}$$

Momento de inércia das roldanas, partindo da equação 4-3;

Os valores obtidos foram na ordem de  $2 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$ , não sendo utilizados nos cálculos.

Momento de inércia da massa, partindo da equação 4-4;

$$J_{\text{Massa}} = 0,1125 \text{ kgm}^2$$

Momento inércia total;

$$J_{\text{total}} = 0,1125 \text{ kgm}^2$$

Binário resistente;

A roldana onde enrola o fio tem um raio de 0,03 m e a aceleração é no máximo de  $0,4 \text{ m/s}^2$  terá um valor de  $13,3 \text{ rad/s}^2$ . Partindo da equação 4-2:

$$\tau_R = 1,51 \text{ Nm}$$

Binário total;

$$\tau_{TT} = \tau_T + \tau_R \quad \tau_{TT} = 11,20 \text{ Nm}$$

A força exercida no fio que enrola na polia solidária com o veio do motor;

$$\tau_{TT} = T_M \times R_a \quad T_M = 373,17 \text{ N}$$

A força máxima desenvolvida na polia solidária com veio do motor é de 400 N e a força necessária para movimentar um dos lados do sistema é de 373,17 N, logo este sistema de motor e roldanas permite movimentar o conjunto cadeira/piloto.

#### ***Para ângulos negativos***

Devido à estrutura de sustentação, o ângulo  $\theta$  estará compreendido entre  $0^\circ$  a  $15^\circ$ , tendo estes valores sido obtidos experimentalmente, a partir da movimentação da cadeira. Ângulo  $0^\circ$ , situação da cadeira ao centro da estrutura e ângulo  $15^\circ$ , situação em completo desequilíbrio, isto é, a cadeira encontra-se completamente “encostada” à parte frontal da estrutura, figura 4-8.

Pela equação 4-20 e para  $\theta=80^\circ$ ; a situação mais desfavorável as tensões apresentam os seguintes valores;  $T_A = 1339,31 \text{ N}$  e  $T_M = 250,83 \text{ N}$

Binário da carga, pela equação 4-1;

Para uma força de 250,83 N e um raio da roldana de 0,03 m:

$$\tau_M = 7,53 \text{ Nm}$$

Momento de inércia das roldanas, partindo da equação 4-3;

Os valores obtidos foram da ordem de  $2 \times 10^{-7} \text{ kgm}^2$ , não sendo utilizados nos cálculos.

Momento de inércia do motor;

$$J_{Motor} = 4 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

Momento de inércia da massa, partindo da equação 4-4;

$$J_{Massa} = 0,1125 \text{ kgm}^2$$

Momento inércia total;

$$J_{total} = 0,1125 \text{ kgm}^2$$

Binário resistente;

A roldana onde enrola o fio tem um raio de 0,03 m e a aceleração é no máximo de  $0,4 \text{ m/s}^2$  terá um valor de  $13,3 \text{ rad/s}^2$ . Partindo da equação 4-2

$$\tau_R = 1,51 \text{ Nm}$$

Binário total para;

$$\tau_{TT} = \tau_T + \tau_R \quad \tau_{TT} = 9,03 \text{ Nm}$$

A força exercida no fio que enrola na polia solidária com o veio do motor;

$$\tau_{TT} = T_M \times R_a \quad T_M = 301,01 \text{ N}$$

A força máxima desenvolvida na polia solidária com veio do motor é de 400 N e a força necessária para movimentar um dos lados do sistema é de 301,01 N, logo este sistema de motor e roldanas permite movimentar o conjunto cadeira/piloto.

## 5 Motor e Sistema de Controlo

Neste capítulo é apresentado o motor e restante sistema de controlo, *drive*, fonte de alimentação e porto de comunicação, assim como algumas das suas características. Apresentam-se, também, os esquemas de ligação deste sistema.

Para finalizar este capítulo será abordado o tema dos sensores de mão, em especial o seu esquema de ligações, que permite o controlo lateral do conjunto cadeira/piloto.

### 5.1 Escolha do motor

O motor escolhido para este trabalho foi um motor de passo que se pode ver na figura 5-1.



Figura 5-1 MPP FL86STH156-4208A-H

Este motor utilizado é um MPP do tipo híbrido que segue a regras *NEMA 34*. Este motor tem duas fases com possibilidade de ligação em bipolar série, bipolar paralelo e unipolar.

### 5.2 Método de controlo dos motores

O sistema utilizado para fazer a elevação do conjunto cadeira/pessoa é o apresentado na figura abaixo:

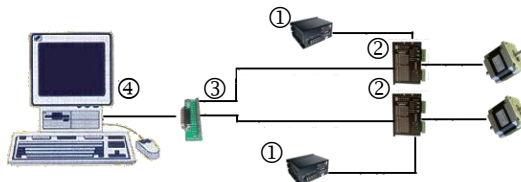


Figura 5-2 Sistema de controlo para elevação do conjunto cadeira/pessoa.

Na figura anterior apresenta-se todo o sistema que permite fazer a movimentação do conjunto cadeira/pessoa, contudo neste capítulo só se abordará os

aspectos relacionados com a *drive*, ②, fonte, ①, placa de comunicação com porto paralelo, ③.

Com o equipamento utilizado, apresentado seguidamente, e com a interface com o utilizador desenvolvida, não irá ser necessário o *indexer* pois os sinais que são enviados para a *drive* já são de sinais de passo *Step*, de sentido e activação.



Figura 5-3 Cabo de ligação computador placa de comunicação

Continuando na placa de comunicação com porto paralelo, ③, este equipamento permite ligar as saídas do porto paralelo aos *drive*.

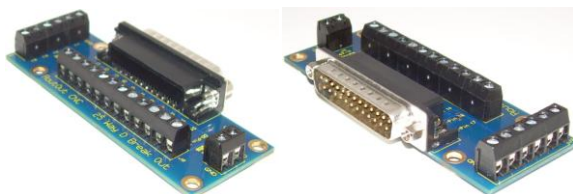


Figura 5-4 Porto de comunicação

*Drive*, ②, recebe os sinais do equipamento anterior e alimenta as bobinas do motor de acordo com esses sinais. Fornece uma corrente máxima de 7,8 A e uma tensão de saída nominal de 68 V, possibilitando várias resoluções no que se refere ao número de passos por volta.



Figura 5-5 *Drive* MSD 980

É de referir que esta *drive* permite o controlo do MPP em regime de micropasso, depois de devidamente programada.

Finalizando com a fonte de alimentação ①, este equipamento alimenta a *drive*. Tem uma potência de saída superior a 300 W e uma tensão de saída de 68 V.



Figura 5-6 Fonte de alimentação; PS705

### 5.3 Circuito Final

A figura abaixo ilustra o circuito final:

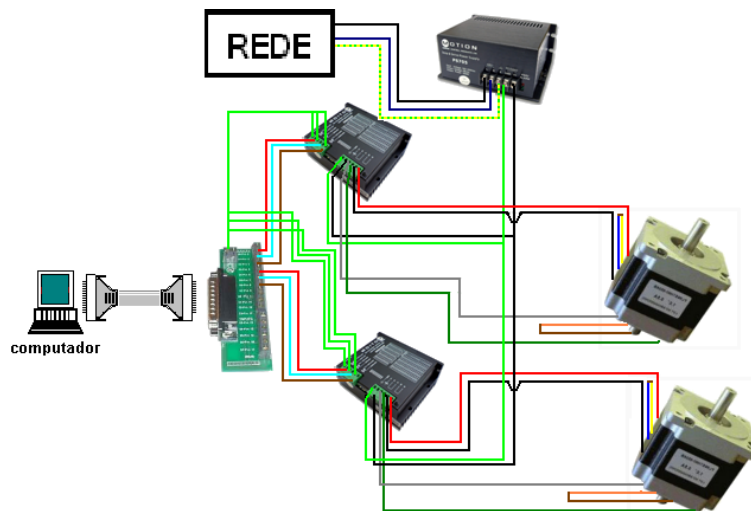


Figura 5-7 Circuito de controlo implementado.

Este circuito é constituído por dois motores, duas *drive*, uma fonte de alimentação, uma placa de comunicação e um cabo macho-fêmea de 25 pinos.

Foi utilizada apenas uma fonte de alimentação pois esta é capaz de alimentar as duas *drive* sem se danificar. Cada motor requer uma corrente máxima de 3 A, tendo em atenção a ligação das bobinas, bipolar em série. Sendo que no total os dois motores requerem uma corrente máxima de 6 A e como a fonte alimentação tem uma capacidade de 7 A uma só fonte serve para alimentar tudo circuito.

Nas *drive* existe um conjunto de *switchs* que devem estar posicionados de seguinte forma:

- SW1: OFF, define a corrente de pico como sendo de 3,5 A;
- SW2: ON, define a corrente de pico como sendo de 3,5 A;
- SW3: ON, define a corrente de pico como sendo de 3,5 A.
- SW4: ON, define a corrente de pausa como sendo a mesma da corrente dinâmica, pico;

- SW5: ON, define o número de passos por volta, neste caso 400;
- SW6: ON, define o número de passos por volta, neste caso 400;
- SW7: ON, define o número de passos por volta, neste caso 400;
- SW8: ON, define o número de passos por volta, neste caso 400.

## 5.4 Sensores de mão

O porto paralelo tem várias entradas e saídas, assim como a placa de comunicação. Aproveitando estas possibilidades da placa de comunicação, surgiu a ideia de desenvolver um par de interruptores *ON/OFF* integrados na própria estrutura.

Assim sendo foram colocados dois interruptores *ON/OFF* na parte superior da estrutura, sendo o seu esquema de ligação semelhante ao da figura 5-8.

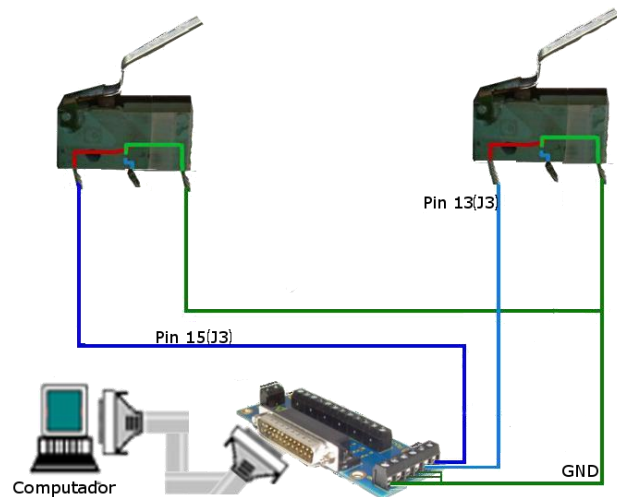


Figura 5-8 Esquema de ligações dos sensores

A função destes dois sensores é fornecer ao programa de comando a indicação do accionamento ou não dos freios do parapente não sendo possível um ajuste fino dos mesmos, isto é, só permite o accionamento *ON/OFF* dos freios.

## 6 Programas de Comando

Neste capítulo, abordam-se os programas informáticos desenvolvidos para permitir a activação dos motores, variando a posição e a velocidade destes. Foram desenvolvidos programas em duas plataformas de programação *Basic* e *C++*, sendo apresentadas, também, várias técnicas de controlo, por teclado, por *joystick*, por exemplo.

### 6.1 Programas de comando

Foram desenvolvidos vários programas de comando em multi-plataformas em *Visual Basic* e em *Visual C++*, sendo desenvolvidas, também, várias técnicas de comando por teclado, por *joystick* e sensores de mão, instalados na estrutura.

São seguidamente apresentadas as três versões mais representativas.

#### 6.1.1 Microsoft Visual C++ 6.0, Comando por teclado

Esta aplicação permite controlar os motores através das setas do teclado.

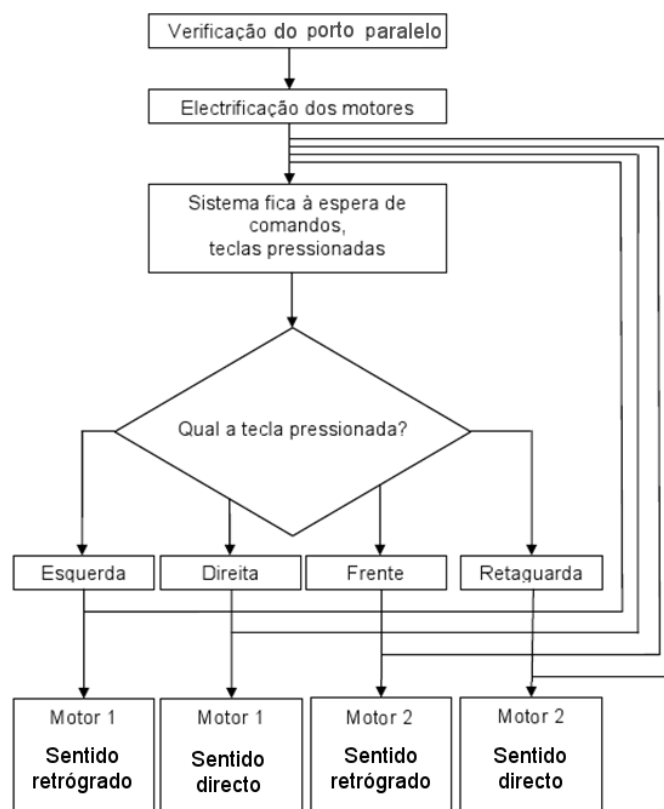


Figura 6-1 Fluxograma geral, MVC++6, Comando pelas teclas do teclado

O programa exposto não permite escolher o número de voltas, nem variar a velocidade, mas existe essa versão já programada.

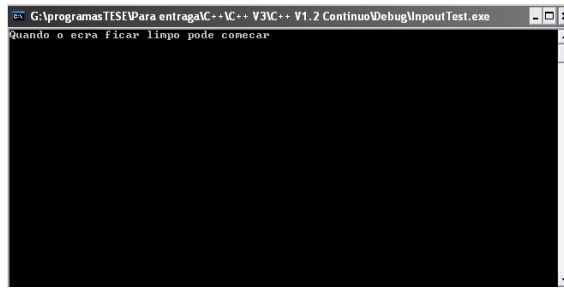


Figura 6-2 Consola MVC++6, Comando pelas teclas do teclado

### 6.1.2 Microsoft Visual Studio 2008 - Comando por sensores na estrutura

Esta aplicação permite o controlo do motor a partir de dois sensores colocados na estrutura. Nesta aplicação basta activar os sensores de mão para os motores iniciarem o seu funcionamento.

Ao contrário das outras aplicações, esta só controla o motor 1 que é o motor que permite o movimento lateral da cadeia.

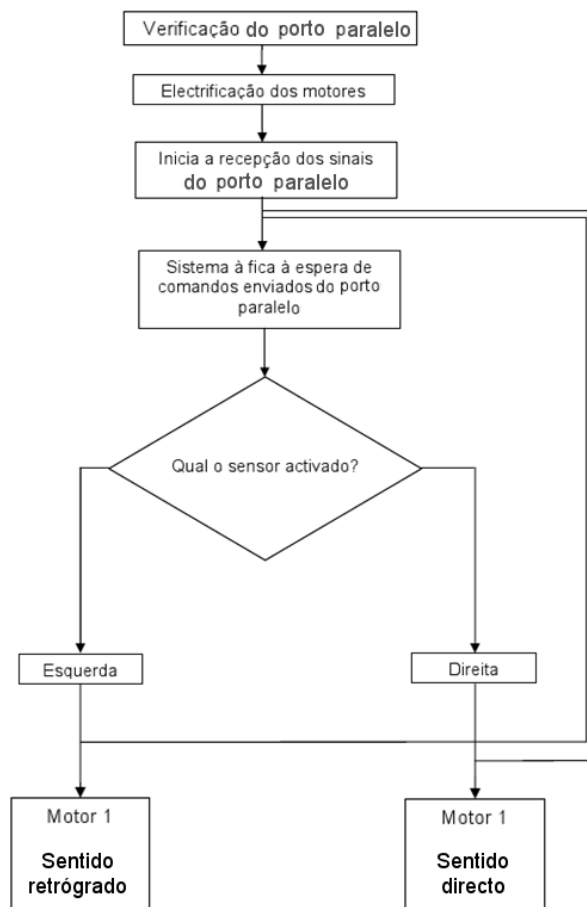


Figura 6-3 Fluxograma geral, MVS2008, Comando pelos sensores de mão

O programa exposto não permite escolher o número de voltas, nem variar a velocidade, mas existe essa versão já programada.

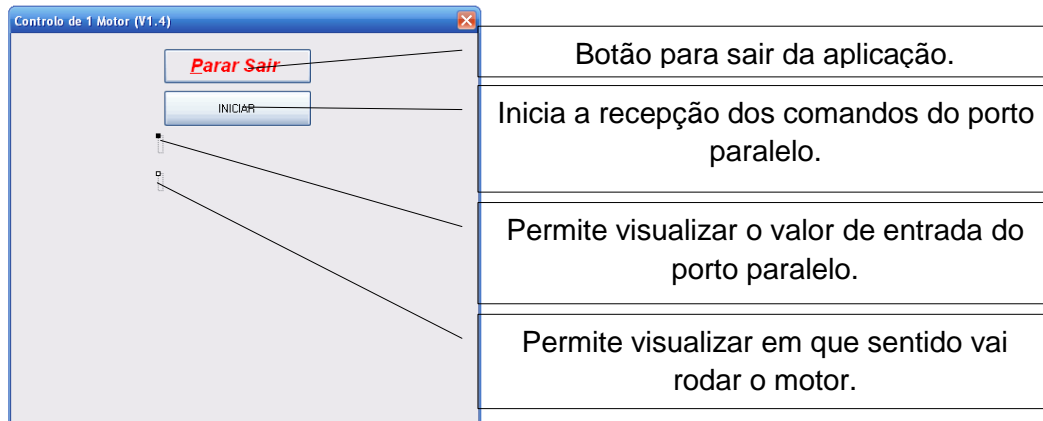


Figura 6-4 Janela principal MVS2008, Comando pelos sensores de mão

### 6.1.3 Microsoft Visual Basic 6.0, Comando por joystick

Para finalizar apresenta-se a aplicação desenvolvida em Microsoft Visual Basic 6.0. Esta versão permite o comando dos motores através de um *joystick*.

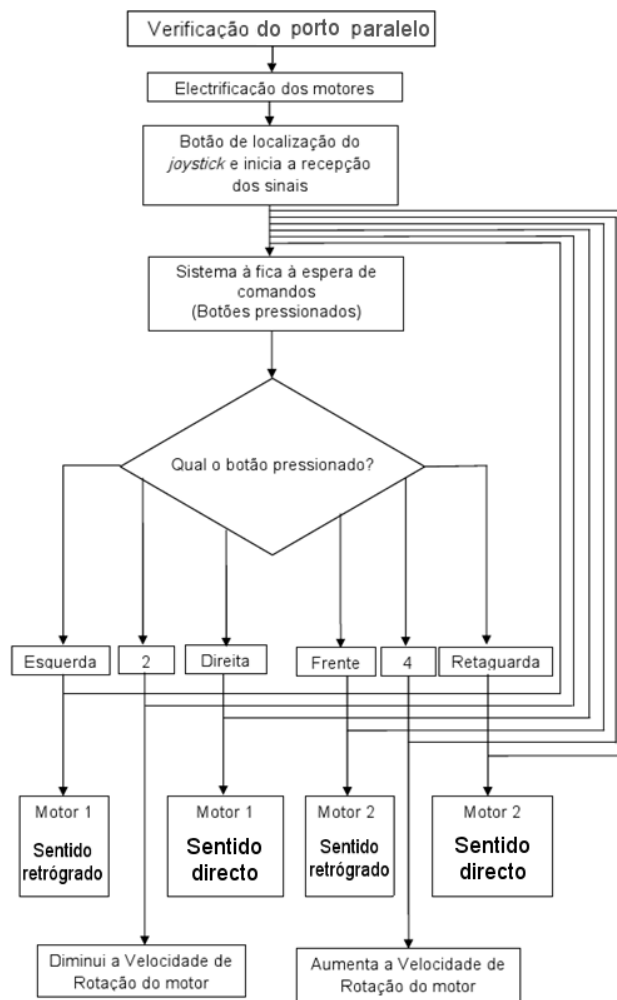


Figura 6-5 Fluxograma geral MVB 6, Comando por joystick

O programa exposto não permite escolher o número de voltas, mas existe essa versão já programada.

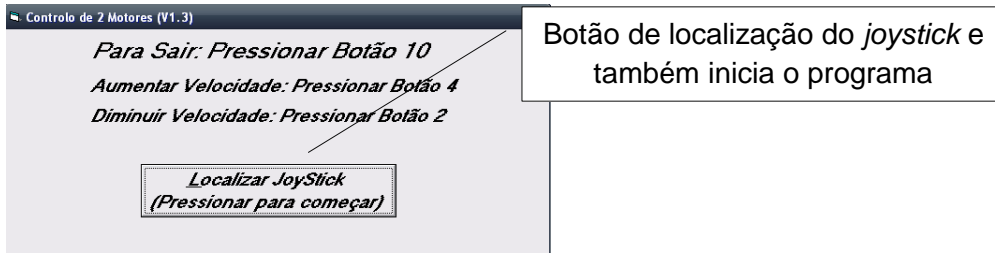


Figura 6-6 Janela Principal; MVB 6, Comando por *joystick*.

Em resumo, os vários programas informáticos permitem a variação de posição e velocidade.

As diversas versões apresentadas permitem:

- Efectuar o controlo através do teclado, joystick e sensores de mão instalados na estrutura;
- Controlar o deslocamento do motor;
- Variação da velocidade. Estes programas permitem a variação de velocidade, isto é, permitem actuar os motores de forma a rodarem mais rapidamente ou mais lentamente mas sem saber a que velocidade o motor está a rodar efectivamente, sendo um ponto a melhorar, para trabalhos futuros, como é referido mais à frente.

De salientar que algumas versões foram desenvolvidas já a pensar na possibilidade de serem integradas em simulador, como é o exemplo da versão de controlo através do *joystick* ou do teclado.

As versões desenvolvidas apresentam alguma versatilidade pois baseiam-se em duas plataformas de programação diferentes sendo possível fazer o controlo de várias formas, no entanto, o controlo de velocidade não foi conseguido em toda a sua plenitude.

## 7 Simulação em Matlab<sup>TM</sup>, Simulink

Neste capítulo apresenta-se a simulação em *MatLab<sup>TM</sup>, Simulink*. Esta permite a visualização gráfica e numérica do comportamento da cadeira.

Para finalizar, comparar-se-ão com os resultados obtidos no capítulo anterior, “Física”, e os resultados aqui obtidos.

### 7.1 Movimentação lateral

Neste subcapítulo apresenta-se a simulação relativa à movimentação lateral. Assim sendo, apresenta-se em primeiro lugar o sistema numa forma genérica. Em seguida, descrevem-se os subsistemas que o constituem, sua composição e por fim os resultados obtidos.

Tendo em atenção o sistema ilustrado na figura A.1, que é possível encontrar na secção A.1 do anexo A, este é constituído por três subsistemas:

O subsistema, mais à esquerda, fornece os ângulos de -11 a +11 simulando o movimento dum pêndulo, a deslocação direita, esquerda, direita,

O subsistema, ao centro, que calcula os valores das tensões dos fios que sustentam o peso do utilizador e do fio que promove o movimento;

O subsistema, mais à direita, calcula as inércias e outras forças de atrito, apresentando, por fim, o força total que o motor terá de fazer mover e o binário dessa força.

O subsistema, mais à esquerda na figura A.1, fornece os ângulos de -11 a +11, simulando a deslocação direita, esquerda, direita, ou seja, simula a movimentação de um pêndulo, como já referido. O funcionamento processa-se com a cadeira inicialmente no centro tendo o seguinte deslocamento:

Centro, direita, centro, esquerda, centro,

Na movimentação anterior, os ângulos evoluem da seguinte forma 0, +11, 0, -11, 0.

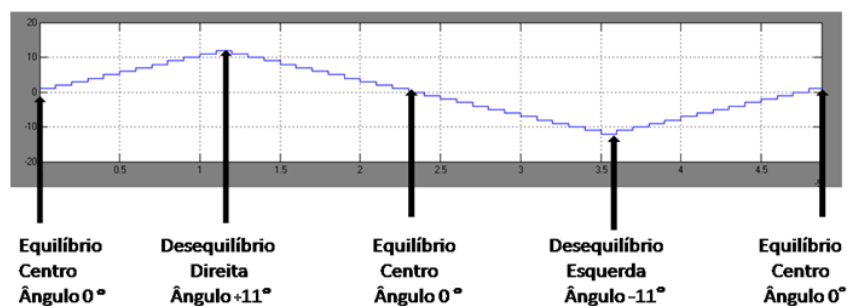


Figura 7-1 Gráfico de oscilação, movimentação lateral

O subsistema seguinte, tensões, ao centro na figura A.1:

Este calcula as tensões e ângulos durante a movimentação. Assim temos  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3 (T_{L2})$ . Em que  $T_1$  e  $T_2$  são os valores das tensões dos fios que suportam o peso do utilizador e tem um valor próximo durante toda a simulação e  $T_3 (T_{L2})$  é o valor da tensão do fio que promove a movimentação da cadeira.

Para calcular os valores anteriores utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\begin{cases} \vec{T}_1 \text{sen}(\theta - \Omega) - \vec{T}_2 \text{sen}(\theta + \Omega) + \vec{T}_3 \text{cos}(\beta) = \vec{0} \\ \vec{T}_1 \text{cos}(\theta - \Omega) - \vec{T}_2 \text{cos}(\theta + \Omega) + \vec{T}_3 \text{sen}(\beta) = \vec{P} \\ \beta = \beta_o - \Omega \\ -P \times L \times \text{cos}(\theta) \times \text{sen}(\Omega) + T_3 \times L \times \text{sen}(\beta + 90 - \theta) = 0 \end{cases}$$

A equação anterior traduz-se em *Simulink* no sistema que está ilustrado na figura A.2, que é possível encontrar na secção A.1 do anexo A.

No que se refere aos valores obtidos são os seguintes:

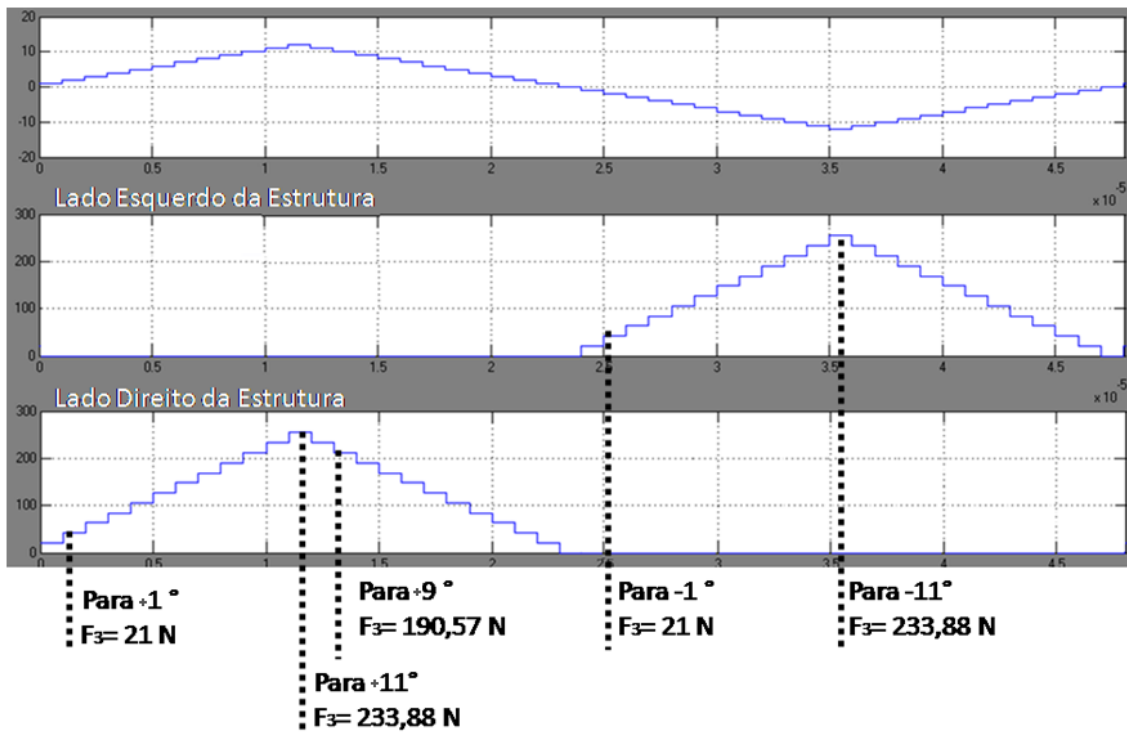


Figura 7-2 Resultados da movimentação lateral, tensões

Como se vê pelo gráfico anterior os valores da simulação são iguais aos resultados obtidos no capítulo “Física”.

O subsistema seguinte, força total, à direita da figura A.1.

Este subsistema permite calcular a força total que é requerida ao motor e o seu binário no início da movimentação. O método de cálculo e as fórmulas foram as utilizadas no capítulo “Física” e traduzem-se em *Simulink* no sistema que está ilustrado

na figura A.3, que é possível encontrar na secção A.1 do anexo A. Seguem-se os resultados obtidos.

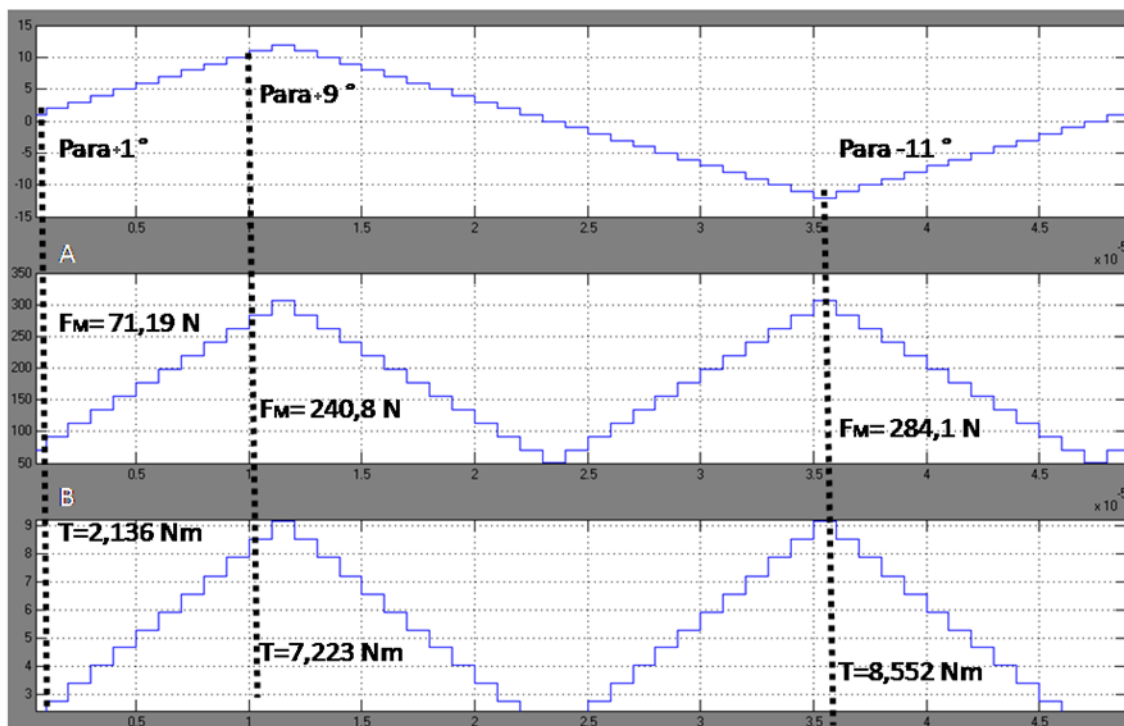


Figura 7-3 Gráfico para a movimentação lateral

A) Força total e B) Binário

Como se vê pelo gráfico anterior, os valores da simulação são iguais aos resultados obtidos no capítulo “Física”.

O gráfico mostra a força que o motor tem que desenvolver para movimentar a cadeira, tendo o seu máximo no ângulo  $+11^\circ$  e  $-11^\circ$  e o seu mínimo quando a cadeira está no centro, ângulo  $0^\circ$ .

Como se vê na figura anterior A), o gráfico mostra a força total requerida para promover a movimentação em profundidade em função do ângulo.

Quando a cadeira se desloca do centro para a esquerda e regressa ao centro é o fio da esquerda que promove a movimentação. A sua tensão aumentará com o aumento do ângulo, de  $0^\circ$  para  $+11^\circ$ , onde atinge o seu valor máximo de, aproximadamente, 234 N e depois diminui novamente até 0, quando chega ao centro. Quando a cadeira se desloca do centro para a direita e regressa ao centro é o fio da direita que promove a movimentação. A sua tensão aumentará com a diminuição do ângulo, de  $0^\circ$  para  $-11^\circ$ , onde tem o seu valor máximo de, aproximadamente, 234 N e diminuindo novamente até 0, quando chega ao centro. Nesta caso o fio da esquerda não tem qualquer tipo de influência neste movimento.

Como se vê na figura anterior B), o gráfico mostra o binário que o motor tem que desenvolver para movimentar a cadeira, atingindo o seu máximo no ângulo +11 e -11 e o seu mínimo quando a cadeira está no centro, ângulo 0.

## 7.2 Movimentação em profundidade

Neste subcapítulo apresenta-se a simulação relativa à movimentação em profundidade. Assim sendo, apresenta-se em primeiro lugar o sistema numa forma genérica. Em seguida descrevem-se os subsistemas que os constituí, a sua composição e por fim os resultados obtidos.

Tendo em atenção o sistema ilustrado na figura A.4, que é possível encontrar na secção A.1 do anexo A, é constituído por seis subsistemas:

O subsistema, mais à esquerda, fornece os ângulos de -15 a +15 simulando a deslocação frente, retaguarda, frente, isto é, simula o movimento dum pêndulo;

Um subsistema que analisa o sinal do ângulo e direcciona-o para o subsistema seguinte;

Dois subsistemas que calculam as tensões que sustentam o peso do utilizador e do fio que promove o movimento  $T_a$  e  $T_m$ ;

E dois subsistemas que calculam as inércias e outras forças de atrito, mostrando por fim a força total que o motor terá de fazer mover e o binário dessa força.

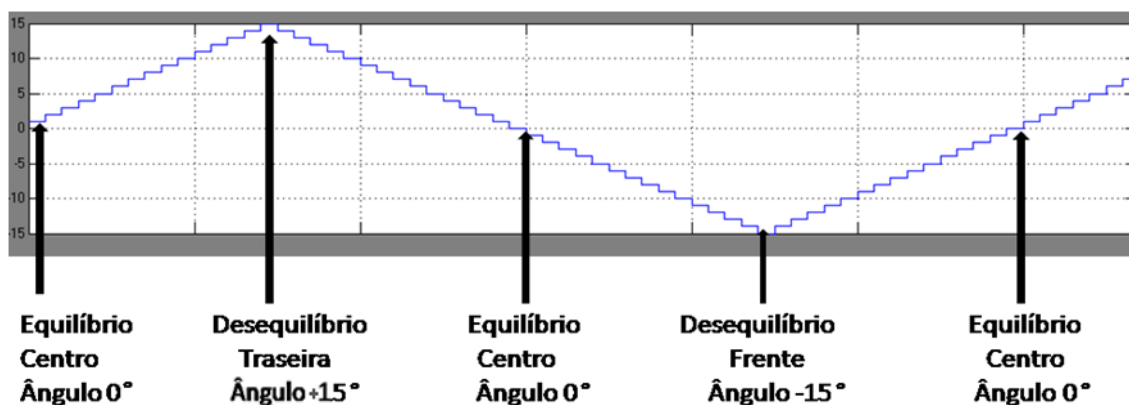


Figura 7-4 Gráfico de oscilação, movimentação em profundidade

O subsistema, mais à esquerda na figura A.4, fornece os ângulos de -15 a +15 simulando a deslocação frente retaguarda, frente, ou seja, simula a movimentação de um pêndulo, como já referido. O funcionamento processa-se com a cadeira inicialmente no centro, tendo o seguinte deslocamento:

Centro, retaguarda, centro, frente, centro.

Na movimentação anterior, os ângulos evoluem da seguinte forma 0, +15, 0, -15, 0.

O subsistema seguinte, calcula os ângulos de  $\gamma$  e  $\theta$ , encontra-se representado na figura A.4 imediatamente a seguir ao bloco anterior.

Este subsistema permite “analisar” o sinal do ângulo de inclinação da cadeira. Desta forma, quando os ângulos são negativos, a tensão está a ser exercida por um lado da estrutura, movimentação para frente. Quando o ângulo for positivo, a tensão está a ser exercida por lado oposto ao anterior, movimentação para a retaguarda. Este bloco coloca à sua saída o ângulo  $\theta$  e o ângulo  $\gamma$  que são os *input* dos próximos subsistemas, figura A.5.

O subsistema seguinte, tensões:

Os subsistemas apresentados ao centro na figura A.4, são os subsistemas que calculam as tensões e ângulos durante a movimentação. Neste caso, estes subsistemas são diferentes, pois o cálculo em movimentação para a frente é diferente do da retaguarda. Calcula  $T_a$ , isto é, o valor da tensão dos fios que sustentam o utilizador e  $T_m$  é o valor da tensão do fio que promove a deslocação da cadeira. Para calcular os valores anteriores utilizaram-se as seguintes fórmulas.

Movimentação com ângulo negativo, “frente”

$$\begin{cases} \overrightarrow{T_A} \sin(\theta) - \overrightarrow{T_M} \cos(\psi) = \vec{P} \\ \overrightarrow{T_A} \cos(\theta) - \overrightarrow{T_M} \sin(\psi) = 0 \end{cases}$$

A equação anterior traduz-se em *Simulink* no sistema que está ilustrado na figura A.6.

Movimentação com ângulo positivo, “retaguarda”

$$\begin{cases} \overrightarrow{T_A} \cos(\psi) + \overrightarrow{T_B} \sin(\theta) = \vec{P} \\ \overrightarrow{T_A} \sin(\psi) - \overrightarrow{T_B} \cos(\theta) = 0 \end{cases}$$

A equação anterior traduz-se em *Simulink* no sistema que está ilustrado na figura A.7.

No que se refere aos valores obtidos são os seguintes:

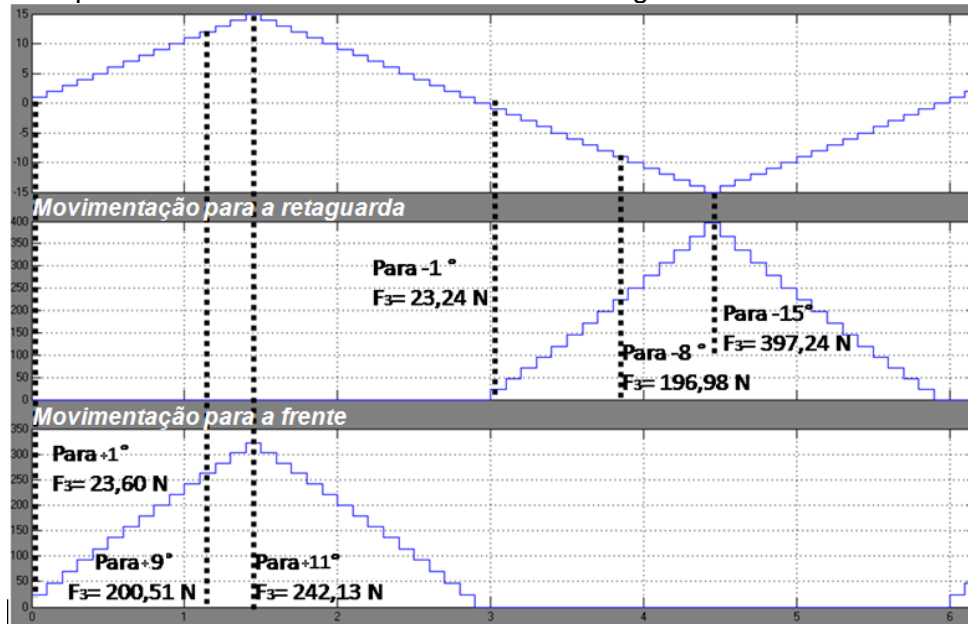


Figura 7-5 Resultados da movimentação em profundidade, tensões

Como se vê pelo gráfico anterior os valores da simulação são iguais aos resultados obtidos no capítulo “Física”.

Subsistemas seguintes, força total, os dois sistemas mais à direita na figura A.4:

Estes subsistemas permitem calcular a força total que é requerida ao motor e o seu binário no início da movimentação. O método de cálculo e as fórmulas foram as utilizadas no capítulo “Física” e traduzem-se em *Simulink* no sistema que está ilustrado na figura A.8, que é possível encontrar na secção A.1 do anexo A. Seguem-se os resultados obtidos:

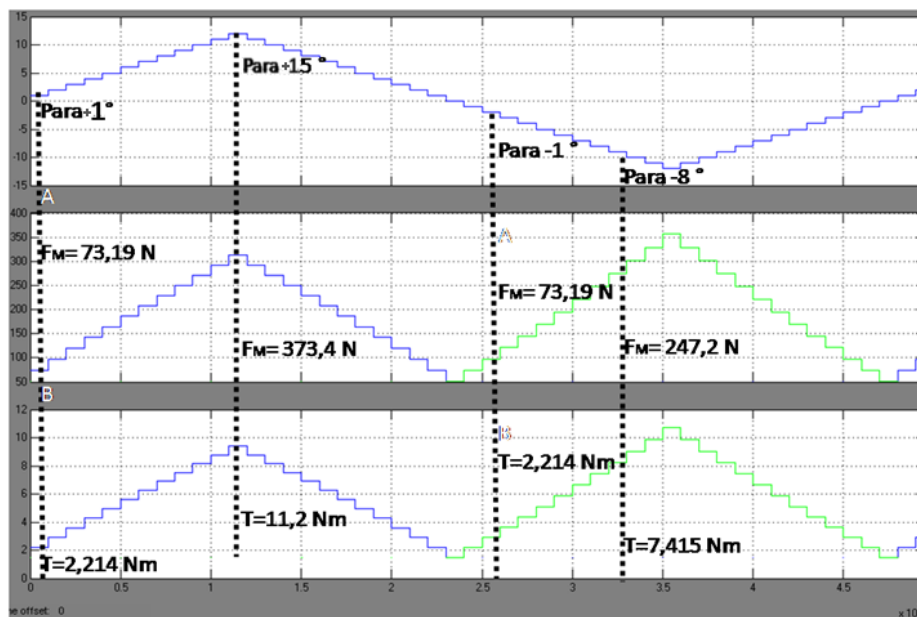


Figura 7-6 Gráfico para a movimentação em profundidade  
A) Força e B) Binário

Como se vê pelo gráfico anterior, os valores da simulação são iguais aos resultados obtidos no capítulo “Física”.

O gráfico mostra a força que o motor tem que desenvolver para movimentar a cadeira, tendo o seu máximo nos ângulos  $+15^\circ$  e  $-15^\circ$  e o seu mínimo quando a cadeira está no centro, ângulo  $0^\circ$ .

Como se vê na figura anterior A), o gráfico mostra a força total requerida para promover a movimentação em profundidade em função do ângulo.

Quando a cadeira se desloca do centro para a frente e regressa ao centro, a tensão no fio vai aumentar com a diminuição do ângulo, de  $0^\circ$  para  $-15^\circ$ , onde atinge o seu valor máximo de aproximadamente 386,8 N e depois diminui novamente até 0, quando chega ao centro.

Quando a cadeira se desloca do centro para a retaguarda e regressa ao centro, a tensão no fio vai aumentar com o aumento do ângulo, de  $0^\circ$  para  $+15^\circ$ , onde tem o seu valor máximo de aproximadamente 373,4 N, diminuindo novamente até 0, quando chega ao centro.

Como se vê na figura anterior B), o gráfico mostra o binário que o motor tem que desenvolver para movimentar a cadeira, tendo o seu máximo no ângulo  $+15^\circ$  e  $-15^\circ$  e o seu mínimo quando a cadeira está no centro, ângulo 0.

Nota: Na figura A.4, encontram-se dois blocos que calculam a força e o binário, mas os blocos são exactamente iguais, só existem dois para facilitar a simulação e visualização dos resultados.

Serão apresentados os gráficos  $B_{arr} = F(P, \Theta)$ , o binário de arranque em função do peso e do ângulo de deslocação, tanto na movimentação lateral como em profundidade.

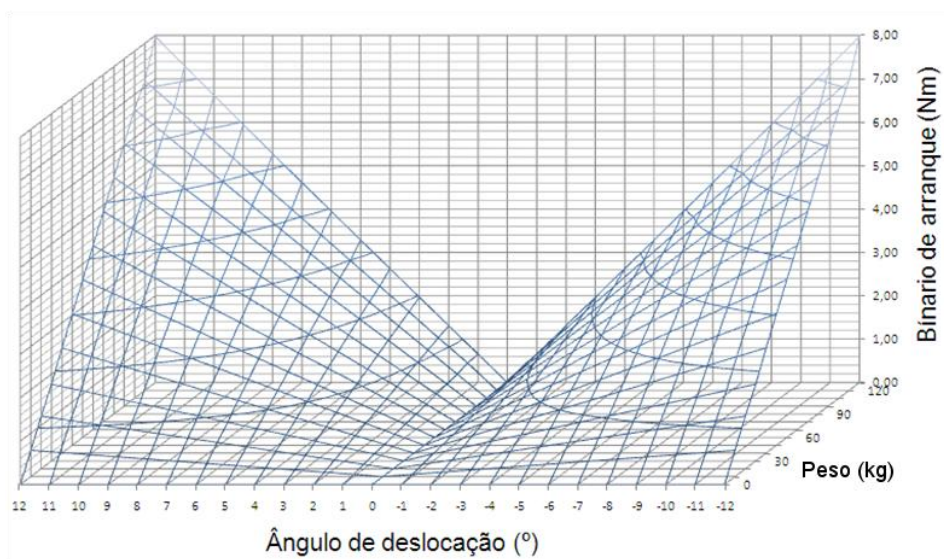


Figura 7-7 Gráfico  $B_{arr} = F(P, \Theta)$ , movimentação lateral

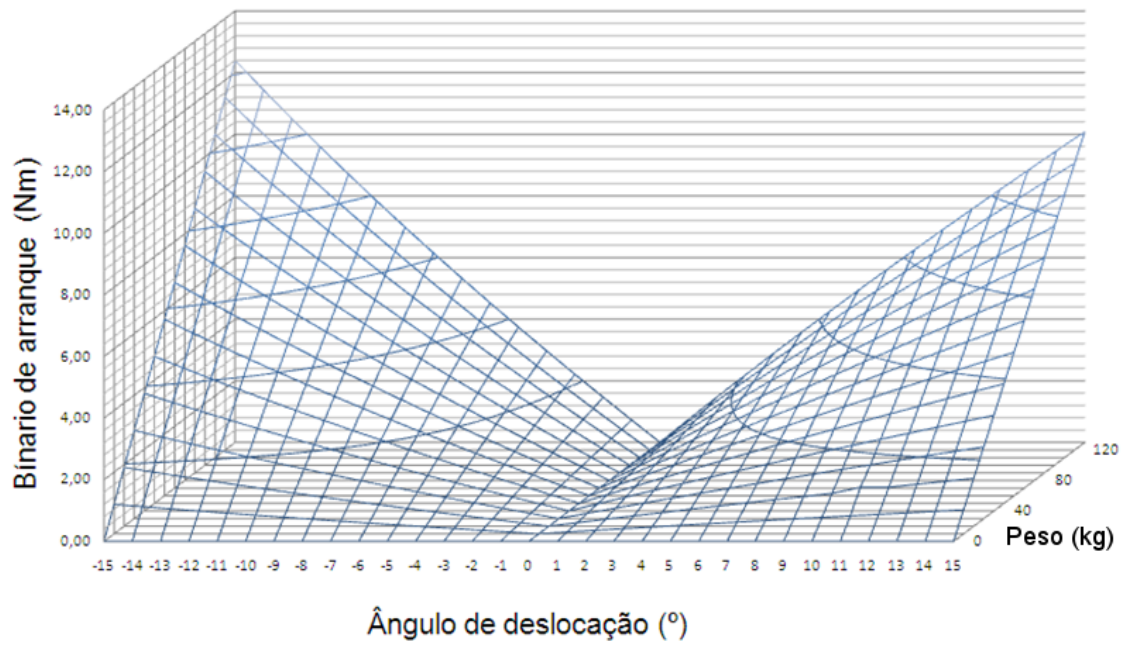


Figura 7-8 Gráfico  $B_{arr} = F(P, \Theta)$ , movimentação em profundidade

## 8 Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo será analisado o trabalho desenvolvido ao nível do cumprimento dos objectivos, sendo feita uma análise de cada um deles, verificando se este foi atingido de forma satisfatória ou não. Caso este não tenha sido cumprido duma forma satisfatória será feita uma análise das respectivas causas e o que deveria ter sido feito de forma a atingi-lo.

Para finalizar, são expostos possíveis aperfeiçoamentos futuros e analisados melhoramentos ao trabalho realizado.

### 8.1 Satisfação dos objectivos

De uma forma geral pode dizer se que todos os objectivos propostos foram alcançados.

No que se refere à estrutura foi desenvolvida uma estrutura que, genericamente, preenche todos os requisitos propostos. É uma estrutura pequena, não ocupando um grande volume. Permite uma fácil montagem e desmontagem, tornando-se numa estrutura portátil e de fácil transporte. No que se refere à simulação do voo de parapente, permite uma aceitável simulação dos movimentos existentes no voo de parapente já que permite simular descolagem, aterragem, deslocações laterais e mudanças de peso.

Relativamente, aos motores que fazem a movimentação do utilizador, verificou-se ser uma escolha adequada, pois permitem a movimentação do utilizador, tendo um binário adequado à sua função, permitindo também uma boa variação de velocidade e um controlo de posição bastante rigoroso.

Quanto aos programas de controlo de posição e variação de velocidade, estes permitem realizar estas duas funcionalidades de uma forma aceitável. Foram ainda desenvolvidos em duas plataformas diferentes, o que permite a integração destes códigos em simuladores informáticos, tendo sido desenvolvidas várias técnicas de comando dos motores, por exemplo por teclado e *joystick*.

Quanto à simulação em *MatLab<sup>TM</sup>*, *Simulink*, esta oferece valores bastante interessantes e próximos dos encontrados no estudo físico da estrutura. Permitem ter uma noção dos valores das tensões e binários de arranque durante a movimentação do utilizador, sendo apresentados gráficos  $B_{arr} = F(P, \Theta)$ , binário de arranque em

função do peso e do ângulo de deslocação, tanto na movimentação lateral como em profundidade.

Permite ainda simular a resposta do sistema com diferentes pesos de utilizador e perceber como o é que o sistema responde a essa alteração.

## 8.2 Trabalhos Futuros

Existem alguns pontos que podem ser melhorados, visto que esta é uma versão inicial do simulador. Assim sendo, aqui apontam-se algumas melhorias que se poderão realizar em trabalhos futuros.

No que se refere à estrutura, movimentação do utilizador, temos dois pormenores que poderão ser melhorados:

- a movimentação para a frente não foi tão bem conseguida como a movimentação para a retaguarda, pois colocar um apoio similar ao traseiro dificultaria a entrada e saída da cadeira por parte do utilizador;
- a movimentação traseira não é 100% funcional, pois os parafusos do ferro onde está soldado o apoio traseiro podem partir com um peso muito elevado, sendo a soldadura uma solução.

Estes dois aperfeiçoamentos não implicam o estudo duma nova forma de movimentação, mas sim a melhoria da existente.

Se se partir para um novo método de sustentação/movimentação é necessário ter em atenção que a cadeira terá de se movimentar em diagonal, de forma a permitir descrever uma circunferência, pois a actual só permite a movimentação em profundidade e lateral individualmente.

No que se refere aos programas informáticos, pode apontar-se uma melhoria significativa. Como foi referido, os programas não permitem um controlo rigoroso da velocidade. Será importante que se desenvolvam ferramentas informáticas a par de ferramentas de hardware que permitam um controlo rigoroso da velocidade. Futuramente pode ser desenvolvido um programa informático em conjugação com um circuito que contenha uma PIC, *Programmable Interface Controller*, ou microprocessador. Um sistema deste tipo é possível ter uma frequência de impulso alargada e rigorosa, devido à existência de um *clock* exterior ao computador, permitindo o controlo fiável da velocidade dos motores.

As melhorias referidas são as mais importantes após uma análise ao trabalho realizado e permitirão tornar o sistema mais funcional e conceptualmente mais interessante.

## ***Referências***

- [1] San Star, Ltd,  
“[http://sanstarltd.en.ec21.com/Driving\\_Racing\\_Machine\\_Coin\\_Operated--2468443\\_2467924.html](http://sanstarltd.en.ec21.com/Driving_Racing_Machine_Coin_Operated--2468443_2467924.html)”, acessado em 10 de 06 de 2010;
- [2] Fater Technologies Pty Ltd, “<http://www.fatertechnology.com/>”, acessado em 10 de 06 de 2010;
- [3] Zen Teconologies Limited, “<http://www.zenteconologieslimited.com>”, acessado em 10 de 06 de 2010;
- [4] Luxury Lanches, “<http://www.luxurylaunches.com/>”, acessado em 10 de 06 de 2010;
- [5] Cruden, “<http://cruden.web01.ezcompany.nl/>”, acessado em 10 de 06 de 2010;
- [6] Hexatech Formula One simulator, “<http://dream-carblog.blogspot.com/2009/11/hexatech-formula-one-simulator-cool.html>”, acessado em 10 de 03 de 2010;
- [7] Force Dynamics 301 ultimate simulator, “<http://gizmoblog.net/force-dynamics-301-ultimate-simulator/>”, acessado em 10 de 06 de 2010;
- [8] World Must be Crazy, Simulator feature make video games more realistic, “<http://worldmustbecrazy.com/simulator-feature-make-video-games-more-realistic>”, acessado em 10 de 06 de 2010;
- [9] High Definition Golf <sup>TM</sup> Simulator “<http://www.hdgolfsimulators.co.uk/>”, acessado em 10 de 06 de 2010;
- [10] Holiday Golf System 4 Indoor Golf Simulator,  
“[http://www.ubergizmo.com/15/archives/2008/05/holiday\\_golf\\_system\\_4\\_indoor\\_golf\\_simulator.html](http://www.ubergizmo.com/15/archives/2008/05/holiday_golf_system_4_indoor_golf_simulator.html)”, acessado em 10 de 06 de 2010;
- [11] Ski Home Simulator is for Career Rockets, “<http://homeboyski.com/2009/01/05/ski-home-simulator-is-for-career-rockets/>”, acessado em 10 de 06 de 2010;

- [12] Skytec Interactive's Olymp is your personal ski slope, "<http://m.bornrich.org/entry/skytec-interactive-s-olymp-is-your-personal-ski-slope/>", acessido em 10 de 06 de 2010;
- [13] Medical Launches, "<http://www.medlaunches.com/>", acessido em 10 de 06 de 2010
- [14] Electronic birth simulators for medical students, "[http://www.medlaunches.com/gadgets/Electronic\\_birth\\_simulators\\_.php](http://www.medlaunches.com/gadgets/Electronic_birth_simulators_.php)", acessido em 18 de 03 de 2010;
- [15] B R Biomedicals Pvt. Ltd., "<http://www.brbiomedicals.com/produts.html>", acessido em 10 de 06 de 2010;
- [16] Matsuura, J. P. (1995). "Aplicação dos simuladores de voo no desenvolvimento e avaliação de aeronaves e periféricos." São José dos Campos, acessido 22 de 12 de 2009;
- [17] Matthew Sheil's 747 Simulator Virtual Flightdeck Project "<http://www.hyway.com.au/747/index.html>", acessido em 18 de 03 de 2010;
- [18] Flyit Simulators, Inc., Professional Simulators, "<http://www.flyit.com/>", acessido em 10 de 06 de 2010;
- [19] SX02 HOTAS Combat Flight Simulator, "<http://www.ballerhouse.com/2008/09/02/sx02-hotas-combat-flight-simulator/>", acessido em 10 de 06 de 2010;
- [20] National Aeronautics and Space Administration, NASA, "<http://www.nasa.gov>", acessido em 18 de 03 de 2010;
- [21] Destroy 24, "<http://destroy24.de/simulator/technik.html>", acessido em 10 de 06 de 2010;
- [22] Powered Paraglider Virtual Reality Simulator, "<http://www.ppgsimulator.com/>", acessido em 10 de 06 de 2010;
- [23] Extreme Sports Café, "[http://www.extremesportscafe.com/paragliding\\_christchurch.html](http://www.extremesportscafe.com/paragliding_christchurch.html)", acessido em 10 de 03 de 2010;
- [24] Travis Jezwinski, "<http://www.circlinghawk.com/travis.html>", acessido em 10 de 06 de 2010;

- [25] Rogue Valley Paragliding LLC,  
“<http://www.roguevalleyparagliding.com/Lessons/paragliding%20simulator.JPG>”,  
acedido em 10 de 06 de 2010;
- [26] Cross Country, International Free Flying magazine, New paraglider flight simulator,  
<http://www.xcmag.com/2008/07/new-paraglider-flight-simulator/>”, acedido em 10 de 03  
de 2010;
- [27] Mechanical system of learning paragliding & hand gliding, SMAAP,  
“<http://www.smaap.com>”, acedido em 18 de 03 de 2010;
- [28] Deutschlands Beliebteste Flugschule, Active Fly, “<http://www.flugcenter-wasserkuppe.de>”, acedido em 10 de 06 de 2010;
- [29] Universidade de Hull, “<http://www2.hull.ac.uk/news/news-archive/2006-news-archive/december/paragliding.aspx>”, acedido em 10 de 06 de 2010;
- [30] Northern Paragliding, Paragliding VR Simulator is Born, “<http://www.northern-paragliding.com/northern-news/index.php>”, acedido em 18 de 03 de 2010;
- [31] Gomes, Engº Nuno. “Introdução aos Motores de Passo-a-Passo.” Porto, 07 de 2009, acedido 8 de 06 de 2009;
- [32] Fuentes, Prof. M. Engº Rodrigo Cardozo. Apostila da Automação Industrial. Santa Maria - RS, 2005, [www.ufsm.br/fuentes](http://www.ufsm.br/fuentes), acedido 31 de 03 de 2009;
- [33] Constandinou, Timothy G. “Stepper Motors Uncovered (1).” Elektor Electronics , 11 de 2003, Páginas 36 - 40, acedido em 11 de 06 de 2009;
- [34] NMB Techonologies Corporation. “MOTOR ENGINEERING.” De NMB Techonologies Corporation, 79- 89, “[www.nmbtc.com](http://www.nmbtc.com)”, 2009, acedido em 11 de 06 de 2009;
- [35] Controlo de Motores de Passo Unipolares de 4 Fases de Ímanes Permanestes (5 ou 6 Fios). [br.geocities.com/gedaepage/Doc/MP\\_5fios.htm](http://br.geocities.com/gedaepage/Doc/MP_5fios.htm), acedido em 11 de 06 de 2009;
- [36] Motores de Passo. [br.geocities.com/CollegePark/8863/motorde\\_passo.htm](http://br.geocities.com/CollegePark/8863/motorde_passo.htm), acedido em 18 de 05 de 2009;
- [37] Advanced Micro Systems, Inc. Step Motors Reference Guide. 2008 de 06 de 11. <http://www.ams2000.com/pdf/step101.pdf>, acedido em 2009 de 06 de 17;

- [38] Paker, Motion & Controlo. "Stepping Motor Drives." In Drive Technologies, de Motion & Controlo Paker, Páginas A23 - A28. 2008, acessado em 12 de 05 de 2009;
- [39] "HSI Stepper Motor Theory." In haydon switch & instrument motors / theory (cat. ref. 16), Pag.1- 14. 2009;  
[http://eceserv0.ece.wisc.edu/~morrow/ECE315/HSI\\_Stepper\\_Motor\\_Theory.pdf](http://eceserv0.ece.wisc.edu/~morrow/ECE315/HSI_Stepper_Motor_Theory.pdf) ,  
acessado em 24 de 03 de 2009;
- [40] Shinano Kenshi Corporation. "Stepper Motor Opearion and Theory." In Stepper Motor, de Shinano Kenshi Corporation, 35- 40. Shinano Kenshi Corporation, 2009, [www.shinano.com](http://www.shinano.com) , acessado em 12 de 04 de 2009;
- [41] Eriksson, Fredrik "Industrial Circuits Application Note. Drive circuit basics.", Páginas 1 – 7, 1998, acessado em 03 de 04 de 2009;
- [42] Filho, Sebastião G. dos Santos (fevereiro de 2002). "Controle de mesa xy, Utilizando motor de passo. Mecatrônica Atual nº 2", pp. 28-35, acessado 10 de 06 de 2010;
- [43] JVL Industri Elektrtronik A/S, "Formulas and Units (Transmission technical calculations – Main Formulas)", <http://www.jvl.dk/files/pdf/la011gb.pdf>, Dinamarca, acessado 10 de 06 de 2010;
- [44] Santos, Luiz Claudio. Forças. Brasil, 9 de Julho de 2009;
- [45] Associação, Professores. "Estruturas e Forças"  
[RevistaZoom.com.br/Educadores/?conteudo=formacao\\_conceitostecnologicos.asp](http://RevistaZoom.com.br/Educadores/?conteudo=formacao_conceitostecnologicos.asp),  
acessado em 29 de 06 de 2009;
- [46] Portas do computador, Electrónica e Informática, "<http://www.rogercom.com>",  
acessado em 18de 03 de 2010;
- [47] Electrónica e Informática "<http://www.tugatronica.com/>", acessado em 18 de 05 de 2010;
- [48] Porta Paralela em C/C++, "<http://zz2kzq.site90.com/CursoHtml/Modulo01>",  
acessado em 29 de 06 de 2009;
- [49] Tecnologia USB, Universal Serial Bus, "<http://www.infowester.com> ", acessado em 29 de 06 de 2009;

- [50] USB História, tecnologia e aplicação,  
“[http://www.gta.ufrj.br/grad/07\\_1/wusb/index.html](http://www.gta.ufrj.br/grad/07_1/wusb/index.html)”, acessido em 29 de 06 de 2009;
- [51] USB, “[http://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_Serial\\_Bus](http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus)”, acessido em 22 de 12 de 2009;
- [52] USB, “[http://pt.wikipedia.org/wiki/USB\\_Flashdisk](http://pt.wikipedia.org/wiki/USB_Flashdisk)”, acessido em 22 de 12 de 2009;
- [53] Assis, Eng.º Pedro, Comunicação de Dados Técnica de Comunicação de Dados CDADO-127, I.S.E.P., Outubro 09, acessido 27 de 12 de 2009;
- [54] Linguagem de programação - Wikipédia, a enciclopédia livre, <http://pt.wikipedia.org/wiki/>, acessido 24 de 12 de 2009;
- [55] Manso, António Manuel Rodrigues “Introdução aos computadores e programação”, Escola Superior de Tecnologia de Tomar, Departamento de Engenharia Informática, acessido 24 de 12 de 2009;
- [56] Bajuelos, António L.; “Tipologia das Linguagens de Programação”, Departamento de Matemática Universidade de Aveiro, acessido 24 de 12 de 2009;
- [57] “Introdução à Programação (VBA)”, acessido 22 de 12 de 2009;
- [58] Willrich. Prof. Roberto; “Capítulo 4: Linguagens de Programação”, acessido 23 de 12 de 2009;
- [59] Torres, José Manuel; “Apontamentos de Programação em Visual Basic 2004/2005”, Universidade Fernando Pessoa, acessido 22 de 12 de 2009;
- [60] De Jalón, Javier García, José Ignacio Rodríguez, e Alfonso Brazález.; “Aprenda Visual Basic 6.0, como si estuviera en primero”. San Sebastián, Agosto 1999, acessido 22 de 12 de 2009;
- [61] “Microsoft Visual Basic, Estruturas, Tratamento e Organização de Dados”, Escola Secundária de Emídio Navarro 2001/2002, acessido 22 de 12 de 2009;
- [62] Said, Prof. Ricardo; “Fundamentos do Visual Basic”, acessido 22 de 12 de 2009;
- [63] “Apostila de C++ - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP”, “<http://www.dee.feis.unesp.br/graduacao/disciplinas/langcpp/index.php>”, acessido 24 de 12 de 2009;
- [64] “Linguagem C”, SENAC - Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial - Curso de Programação em C, Florianópolis, 2003, acessido 22 de 12 de 2009;

## ***Anexo A***



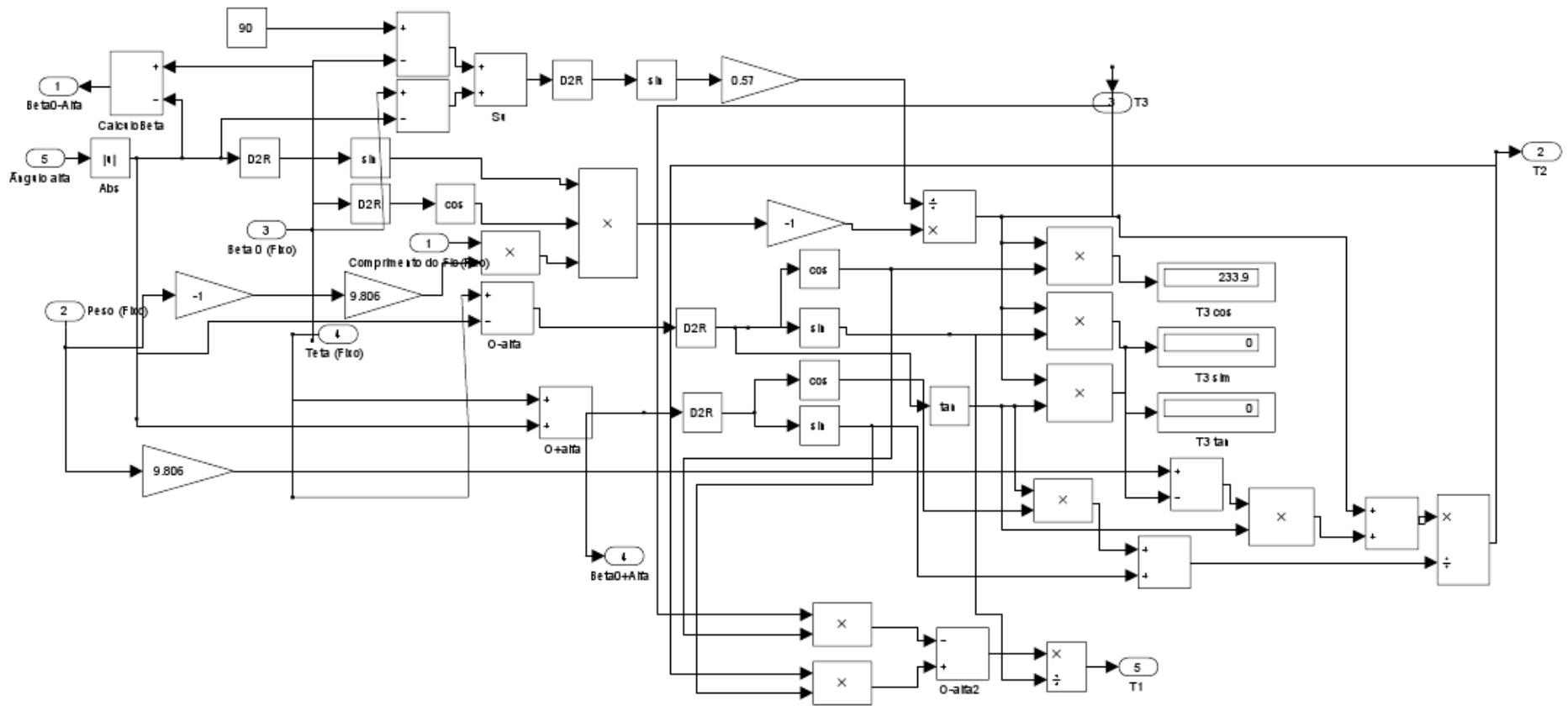


Figura A.2 Movimentação lateral, tensões, método de cálculo

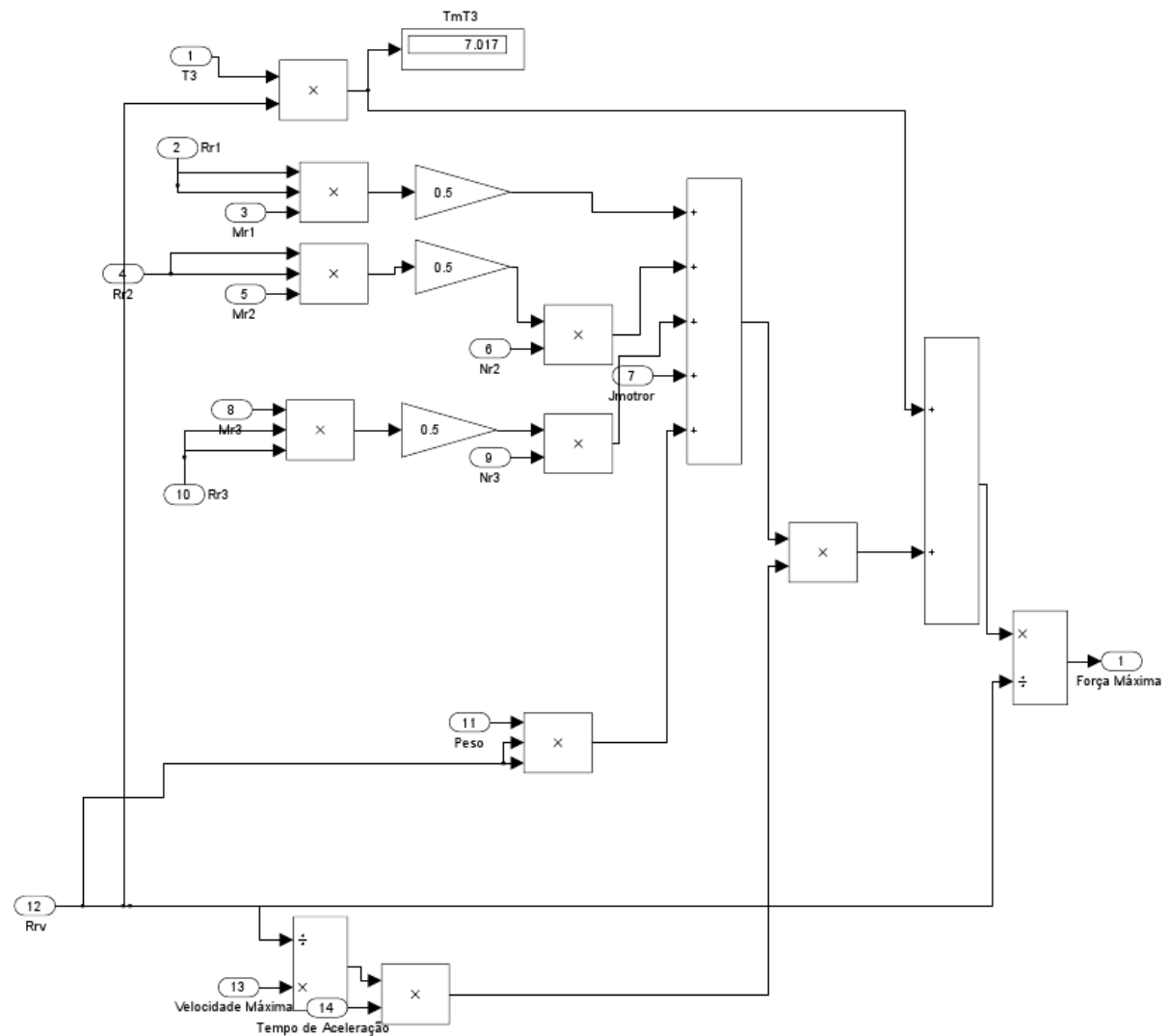


Figura A.3 Movimentação lateral, força no veio, método de cálculo

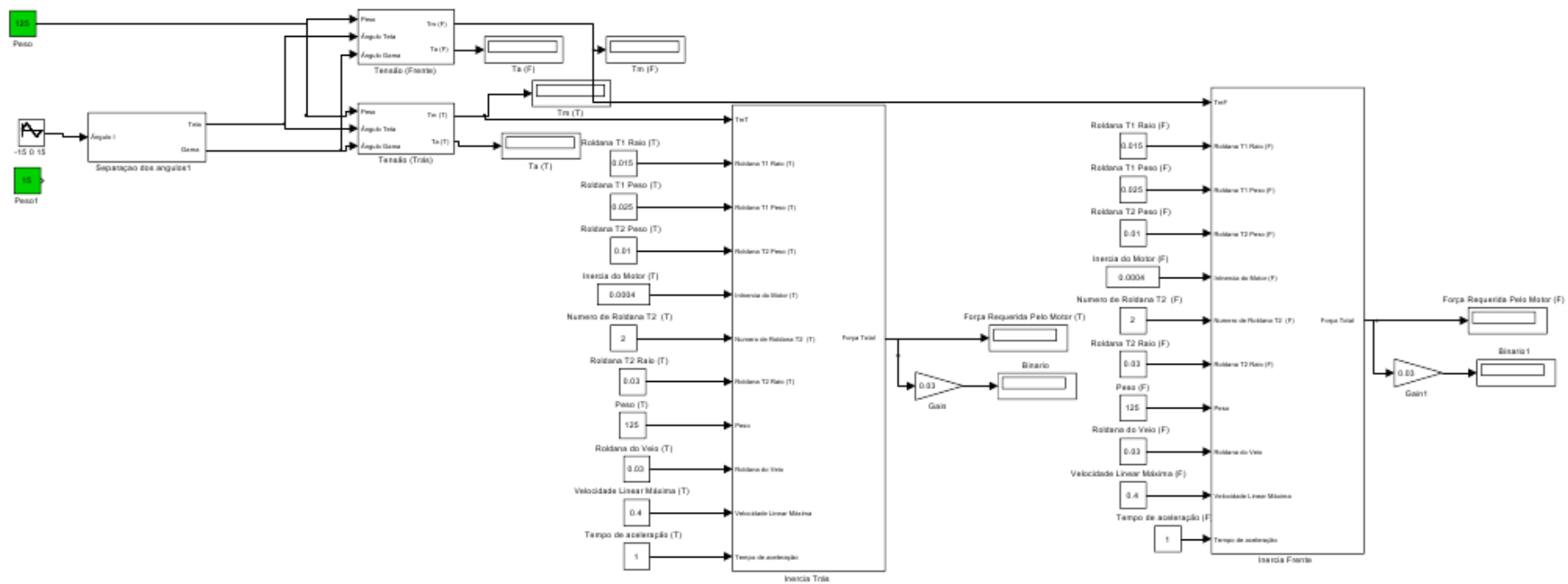


Figura A.4 Movimentação em profundidade, esquema geral

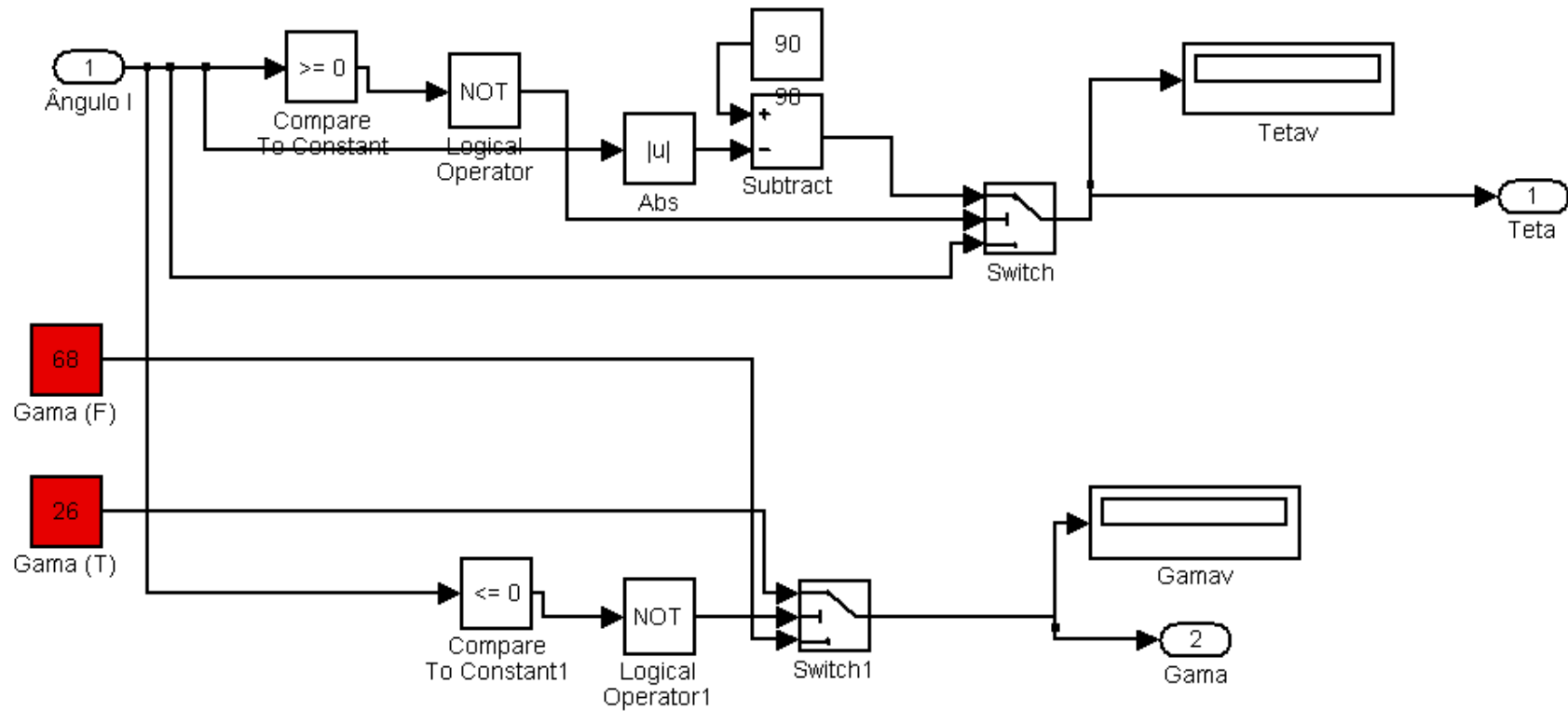


Figura A.5 Movimentação em profundidade, identificação dos ângulos

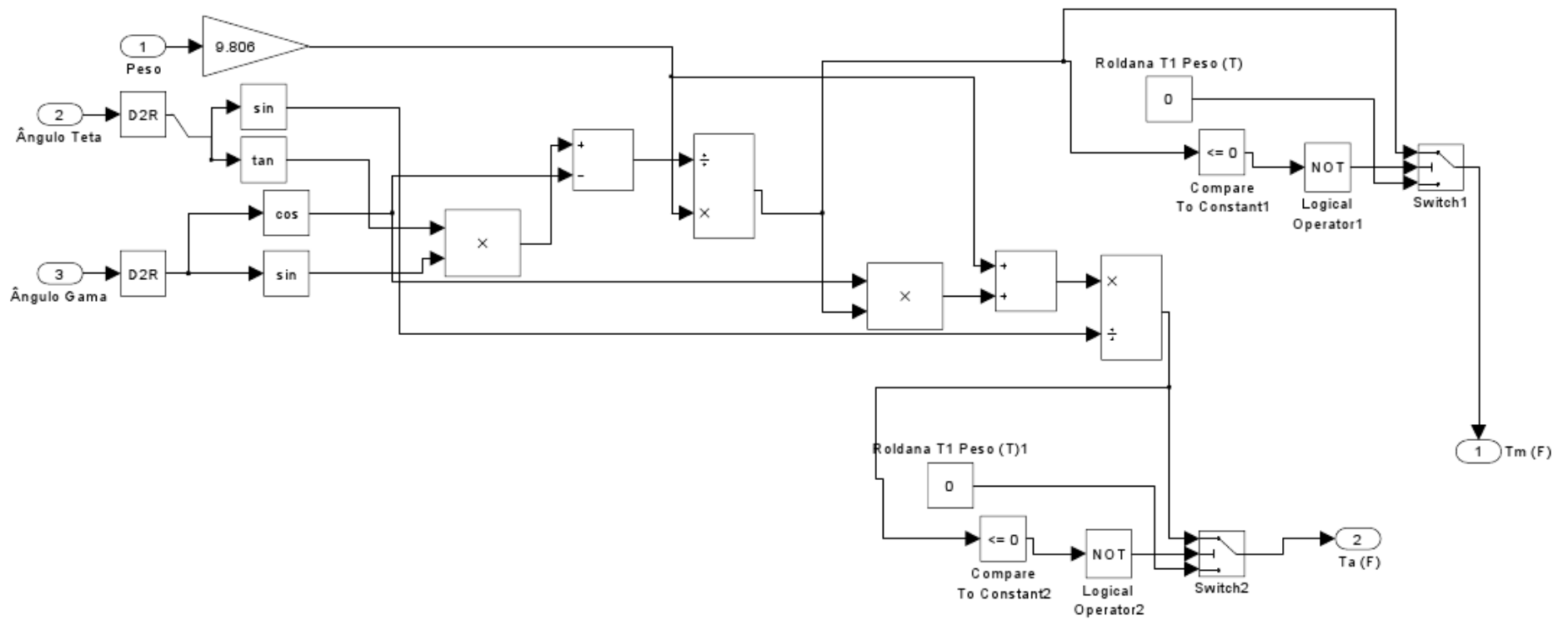


Figura A.6 Movimentação em profundidade, tensões, ângulo negativo, método de cálculo

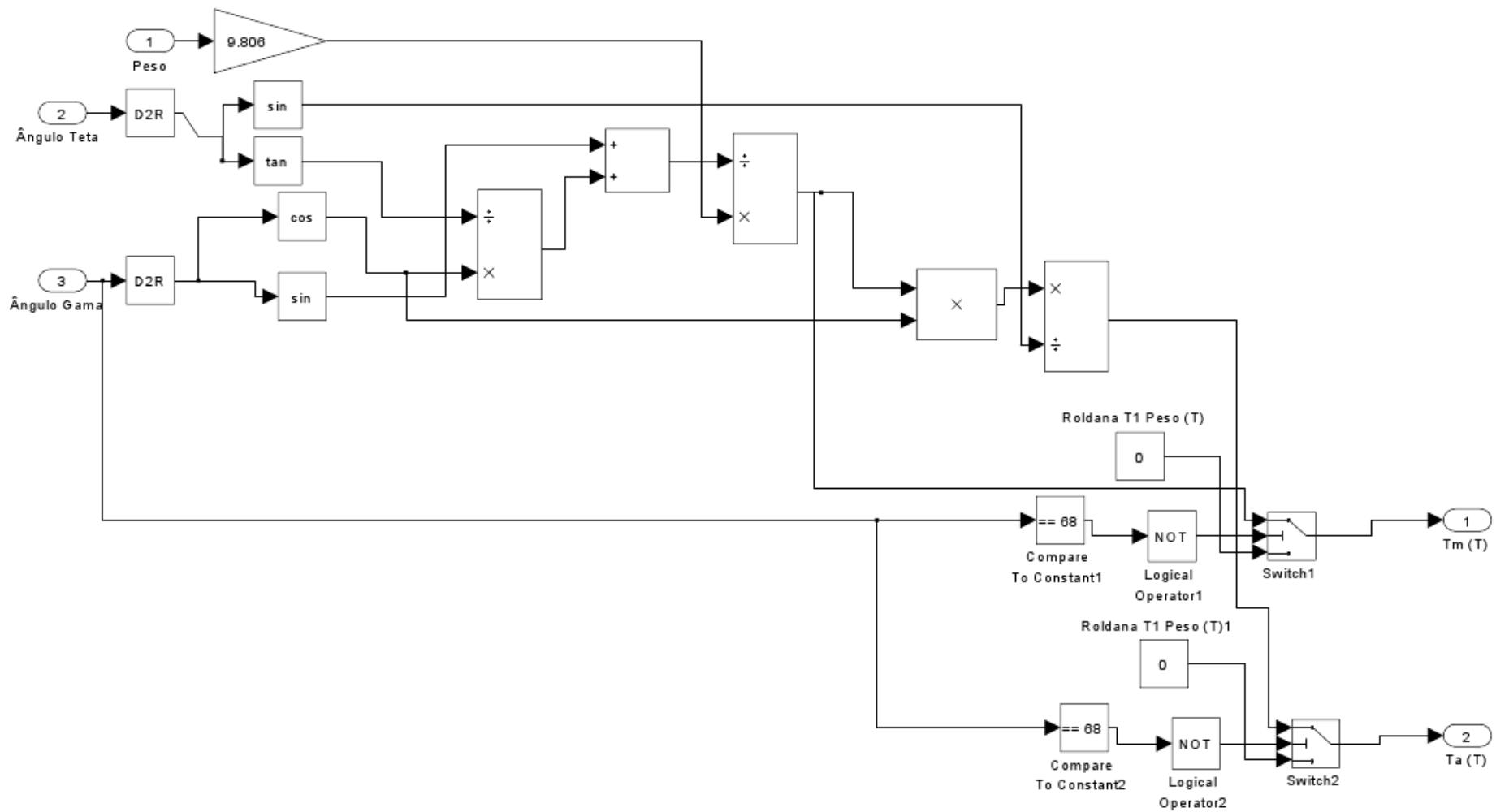


Figura A.7 Movimentação em profundidade, tensões, ângulo positivo, método de cálculo

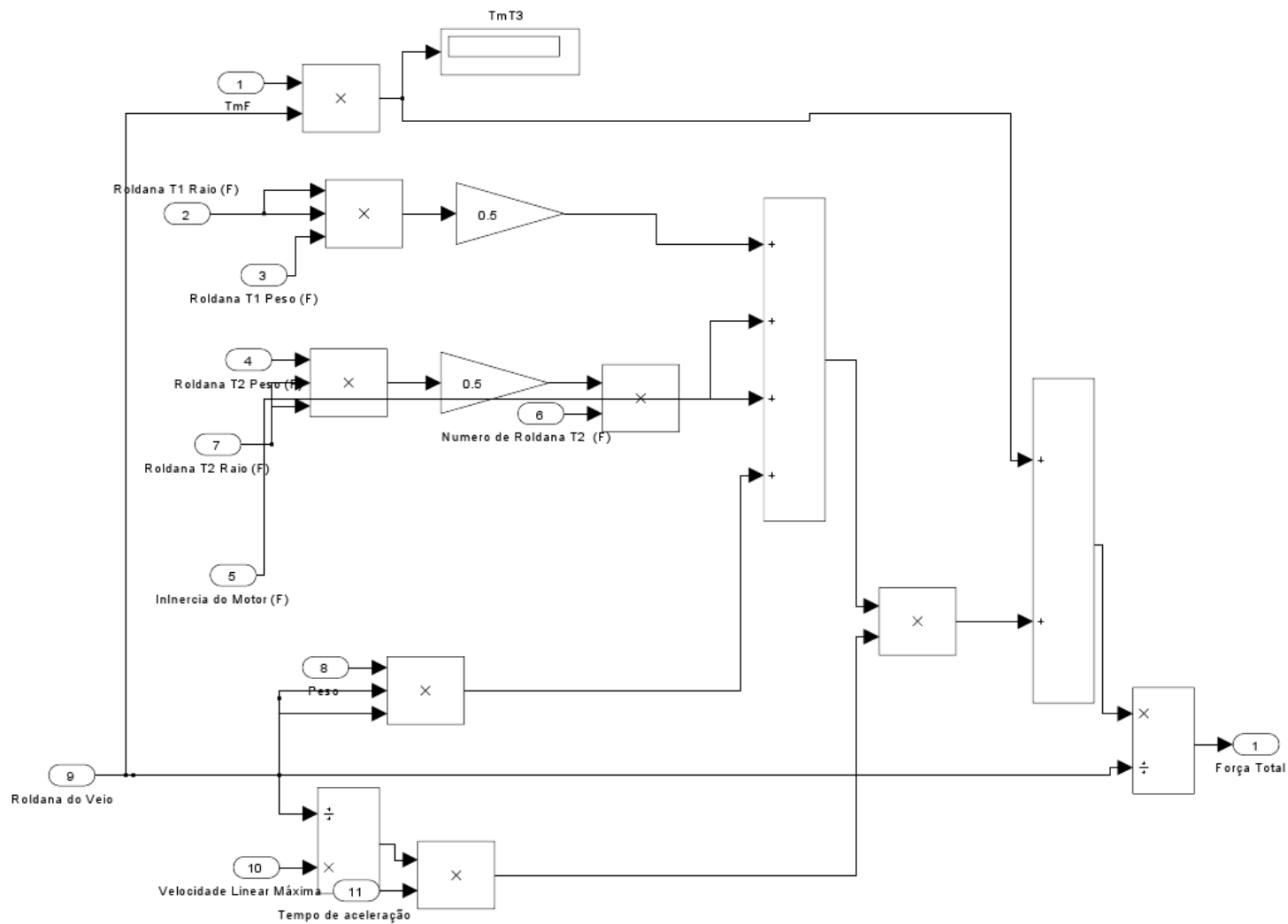


Figura A.8 Movimentação em profundidade, força no veio, método de cálculo

