

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Motorização de um Elevador de Transferência de Pessoas

Diogo Filipe da Costa Machado

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: António José de Pina Martins

Co-orientador: Henrique Gonçalves

31 de julho de 2020

Resumo

Esta dissertação foi desenvolvida num contexto empresarial para a *Invacare*, empresa esta que possui uma linha de produtos que visa auxiliar pessoas com mobilidade reduzida. Dentro destes dispositivos médicos havia a necessidade em tornar ergonómico o manuseamento do elevador de transferência, numa perspetiva de motorizar o seu movimento, reduzindo assim os esforços e aumentando o conforto durante a utilização.

Numa fase inicial, para desenvolver esta ideia, foi analisada a estrutura do elevador e as características correspondentes aos diversos modelos da gama *Birdie Evo*, de forma a aumentar o conhecimento sobre o produto em questão. Simultaneamente, foi realizado um estudo referente à ergonomia no trabalho e sobre possíveis tecnologias a serem implementadas, nomeadamente motores elétricos e sensores de força.

Posteriormente, com a necessidade de perceber o modo de atuação do elevador de transferência com as respetivas soluções, recorreu-se à ferramenta de simulação *SimTwo*. Através do desenvolvimento e controlo de dois modelos de simulação, foi possível selecionar aquele que mais se enquadra na visão inicial e desejada do produto final.

De forma a transpôr o que foi simulado para um elevador real, idealizou-se quais os componentes eletrónicos a utilizar, as suas especificações, a maneira como iriam ser implementados no elevador de transferência e o modo de interação entre estes, considerando sempre o aspeto ergonómico, de segurança, estético e monetário do produto final.

Este trabalho de investigação e pesquisa do mercado culminou na compra e chegada destes materiais, através dos quais se desenvolveu um modelo base, representativo da versão simplificada daquilo que seria o sistema final. Este modelo revelou-se eficiente e funcional concluindo-se que, possivelmente, a implementação deste sistema no elevador de transferência da *Invacare* seria um sucesso.

Abstract

This document was developed in a business context with Invacare, a company with several products that are meant to help people with reduced mobility. Within these medical devices there was a need to make the handling of the transfer lift ergonomic, which involved motorizing its movement, in order to reduce efforts and increase comfort while using it.

At first, to develop this idea, the structure of the lift and the characteristics of the various models of the Birdie Evo were analyzed, to increase the knowledge about this product. Simultaneously, it was realized a study about ergonomics and possible technologies to be implemented on the transfer lift, namely electric motors and force sensors.

Afterwards, with the need to perceive how the lift would operate with the respective solutions, the SimTwo simulation tool was used. Through development and control of two simulation models, it was possible to select the one that fits the most on the final product view.

In order to transpose what was simulated to a real transfer lift, it was idealized which electronic devices were supposed to be used, their specifications, the way they would be implemented and how would they interact between them, always considering the ergonomic aspect, safety, aesthetic and monetary value of the final product.

This work of investigation and market research concluded in the purchase and arrival of these materials, through which a base model was developed, representative of the simplified version of what would be the final system. This model proved to be efficient and functional, concluding that, possibly, the implementation of this system on the Invacare transfer lift would be a success.

Agradecimentos

Durante o desenvolvimento deste projeto diversas pessoas contribuíram para o seu sucesso e, de uma forma geral, gostaria de agradecer a todos por me ajudarem a concluir esta dissertação.

De uma maneira direcionada, em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha família, nomeadamente a minha mãe Paula Costa e o meu pai António Machado, por serem o meu pilar, por me apoiarem incondicionalmente e por me permitirem alcançar esta nova fase da minha vida com sucesso.

Gostaria de agradecer vivamente aos meus orientadores Prof. Dr. António José de Pina Martins e Engenheiro Henrique Gonçalves, por toda a disponibilidade, orientação, dedicação, conhecimento transmitido e predisposição para me ajudarem sempre que eu necessitava. Agradeço pela incansável paciência de ambos e as horas perdidas em conversas e discussões relativas ao projeto.

Gostaria também de agradecer ao Prof. Dr. Paulo José Cerqueira Gomes da Costa por me auxiliar numa parte essencial desta dissertação, a simulação.

Por último, gostaria de agradecer à minha namorada Renata Sousa, pelo carinho, preocupação e auxílio nos momentos mais difíceis.

*“Pedras no caminho? Guardo todas,
um dia vou construir um castelo”*

Fernando Pessoa

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Elevador de Transferência	3
2.1	Revisão Bibliográfica	3
2.2	Família <i>Birdie Evo</i>	4
2.3	Características dos diferentes modelos	5
2.4	Ergonomia no trabalho	6
2.4.1	Importância de um <i>design</i> ergonómico	7
2.4.2	Impacto da inovação de um sistema de sensores na Ergonomia	8
2.5	Conclusões	8
3	Wheel Hub Motor	9
3.1	Constituição dos motores BLDC	9
3.1.1	Estator	10
3.1.2	Rotor	10
3.2	<i>Back Electromotive Force</i>	12
3.3	Sensores de posição	13
3.3.1	Sensores de <i>Hall</i>	13
3.3.2	<i>Encoders</i>	14
3.4	Controlo de motores BLDC	15
3.4.1	Controlo de um ciclo e redução do torque <i>ripple</i>	15
3.4.2	<i>Sensorless Control</i>	16
3.5	Sensores de força	17
3.5.1	<i>Strain Gauge</i>	17
3.5.2	Elemento <i>Spring</i>	18
3.5.3	Sinal Obtido	19
3.6	Conclusões	19
4	Modelo de Simulação no SimTwo	21
4.1	Introdução ao SimTwo	21
4.2	Configuração do ambiente	24
4.3	Estruturas de simulação	24
4.4	Modelos Simulados	26
4.4.1	Constituição do primeiro modelo	27
4.4.2	Constituição do segundo modelo	28

4.5	Controlo	29
4.6	Conclusão	30
5	Especificações e Mercado	31
5.1	Especificações dos motores	32
5.2	Procura de materiais	33
5.2.1	Motores	33
5.2.2	Sensores	34
5.2.3	Drivers	34
5.3	Conclusão	35
6	Resultados Experimentais	37
6.1	Conclusão	39
7	Conclusões	41
7.1	Trabalhos futuros	42
	Referências	43

Lista de Figuras

2.1	Elevador de transferência da Invacare	5
2.2	Figura representativa de desconforto no local de trabalho	7
3.1	Interior de um motor usado no projeto.	10
3.2	Curvas de desmagnetização	12
3.3	<i>Back-EMF</i> trapezoidal	12
3.4	<i>Back-EMF</i> sinusoidal	13
3.5	Sensor de <i>Hall</i> : tensão de saída	14
3.6	<i>Encoder</i> incremental e absoluto, respectivamente	14
3.7	Comutações elétricas	15
3.8	Material submetido a forças de tração	18
3.9	Ponte de Wheatstone	19
4.1	Captura da janela <i>Sheets</i>	21
4.2	Captura da janela <i>Chart</i>	22
4.3	Captura da janela <i>Config</i>	22
4.4	Captura das janelas <i>Code Editor</i> e <i>XML Scene Editor</i> , respectivamente	23
4.5	Ambiente de visualização 3D com os modelos desenvolvidos	26
4.6	Solução principal demonstrada no ambiente visualização 3D	27
4.7	Solução secundária demonstrada no ambiente visualização 3D	29
6.1	Circuito implementado. Legenda: 1-Entrada das fases do motor, 2- Entrada do sensor de <i>Hall</i> , 3- Alimentação de 12V a 28V da <i>Driver</i> representada a vermelho, 4- Alimentação do Arduino, 5- Sensor de Orientação MPU6050, 6- Amplificador diferencial HX711, 7-Conexão da célula de carga com o HX711	37
6.2	Sistema implementado	38
6.3	Sinal de tensão em cada fase do motor	38
6.4	Sinal de tensão e corrente da mesma fase	39
6.5	Forma de onda relativa à tensão fornecida pelos sensores de <i>Hall</i> em cada fase e corrente de fase representada através do <i>Channel 4</i>	39

Lista de Tabelas

2.1	Tabela de medidas relacionadas com os diferentes modelos da família <i>Birdie Evo</i>	5
2.2	Tabela referente a características como Massa e Bateria	6
4.1	Tipos de articulações	28

Abreviaturas e Símbolos

5DPO	Grupo de Futebol Robótico da FEUP
BLDC	Brushless Direct Current
CSP	Central Suspension Point
DC	Direct Current
EMF	Electromotive force
HDD	Hard disk drive
ID	Identificador
PCB	Printed Circuit Board
PI	Proporcional, integral
RPM	Rotações por minuto
SGx	Strain Gauges x
SI	Sistema Internacional
SPI	Serial Peripheral Interface
SmCo5	Samarium Cobalt Magnet
XML	Extensible Markup Language
A	Ampere
a	Aceleração
α_H	Desfasamento
β	Ângulo entre o vetor B e a superfície do elemento Hall
B	Densidade de fluxo magnético
d	Diâmetro
dW_e	Energia incremental num sistema
dW_{loss}	Perdas energéticas
dW_m	Energia no espaçamento de ar
dW_{mech}	Energia mecânica de saída
ϵ_{eu}	Deformação longitudinal
ϵ_t	Deformação transversal

F	Força
F_f	Força de fricção
I	Corrente
K_g	kilograma
K_H	Constante de Hall
K_E	Constante Armature
m	Metros
mm	Milímetros
m_x	Fase x
N	Newton
N_e	Número de espiras de uma bobina
p	Pares de polos
P	Potência
r	Raio
rad	Radianos
s	Segundos
T	Torque
T_{av}	Torque médio
U/V	Tensão
U_A	Tensão de saída da ponte de Wheatstone
U_E	Tensão de entrada da ponte de Wheatstone
μ	Coeficiente de fricção
ν	Coeficiente de Poisson
v	Velocidade linear
V_H	Tensão de Hall
W	Watt
w	Velocidade angular
W_L	Massa da carga
$x/y/z$	Coordenadas
ϕ	Fluxo Magnético
δ	Largura do semiconductor
$\Delta\theta$	Variação da posição angular do rotor
Δx	Variação da posição em x
Δy	Variação da posição em y

Capítulo 1

Introdução

Este documento realizou-se no âmbito da unidade curricular de Dissertação, do 5º ano, do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, e tem como objetivo arquivar todo o trabalho, pesquisa e dedicação envolvidos na realização deste projeto.

A *Invacare* é uma empresa responsável por uma linha de produtos para pessoas com mobilidade reduzida. O produto em destaque é o elevador de transferência, modelo *Birdie Evo* e os seus variantes, sendo este dispositivo concebido para transferir e posicionar um indivíduo de uma superfície de repouso para outra.

O cerne da questão envolve a dificuldade na deslocação do elevador, consoante o tipo de superfície onde este atua e os valores da carga que transporta.

Como a ergonomia no ambiente de trabalho é fundamental para manter a saúde e a segurança do utilizador, é de extrema importância ultrapassar esta adversidade. Sendo assim, a ideia proposta para resolver este problema consiste na motorização deste dispositivo através da implementação de motores elétricos. Com a adequada sensorização nas barras de empurrar do elevador de transferência, numa perspetiva de análise dos valores de força aplicados, é possível criar uma harmonia entre o binário do sistema implementado e a força exercida pelo o utilizador, melhorando assim o quotidiano deste.

1.1 Motivação

A tecnologia de motorização elétrica das rodas tem vindo a desenvolver-se cada vez mais sendo que, atualmente, representa um recurso eficiente e viável. Por outro lado, a ergonomia no trabalho é um tema que visa o bem-estar do trabalhador e do paciente.

A motivação para a realização desta dissertação advém da vontade de aumentar o conhecimento sobre motores elétricos, desde o seu funcionamento até ao modo de atuação, de forma a poder conferir o caráter de conforto ao elevador de transferência da *Invacare*.

Sendo a ergonomia um assunto bastante abordado na área da saúde, este tema despertou o meu interesse em descobrir e estudar como é possível melhorar o estilo de vida de quem utiliza, no seu quotidiano, aparelhos que lhe podem causar lesões músculo-esqueléticas.

Numa perspetiva de simulação, enquanto estudante do ramo de automação, cuja especialização é robótica, era importante ter possibilidade de desenvolver modelos para simulação e fortalecer a compreensão sobre este tópico.

Infelizmente, não foi possível realizar o trabalho no ambiente empresarial previsto, devido à conjuntura mundial vivida (*Covid-19*), uma vez que a ida à empresa esteve impossibilitada.

1.2 Objetivos

Relativamente aos objetivos deste projeto, o principal seria o desenvolvimento de um protótipo, isto é, uma versão praticamente finalizada de um elevador de transferência motorizado.

Para tal, salienta-se o estudo intensivo da estrutura de produto, do funcionamento de motores *Brushless DC* em específico, do tema ergonomia no trabalho, uma investigação relativa à vertente de simulação e pesquisa de aparelhos adequados para implementar no elevador.

Posteriormente, seria necessário investigar o modo de interligação de todos estes temas, de forma a que, em uníssono, fosse alcançado o objetivo primário mencionado anteriormente.

1.3 Estrutura da Dissertação

Inicialmente, foi necessário realizar um estudo do estado da arte, abordado na secção 2.1. Numa primeira fase foi feita uma análise intensiva ao elevador de transferência da *Invacare*, relativa às suas características ergonómicas, estéticas e físicas, e um estudo relacionado com a ergonomia no trabalho, no capítulo 2.

Posteriormente, tal como é possível observar no capítulo 3, existe uma abordagem fortemente teórica sobre motores de corrente direta sem escovas, desde a sua constituição, modo de funcionamento e controlo. Ainda no mesmo capítulo, a vertente teórica recai sobre sensores de força e o seu funcionamento.

Na fase seguinte, o trabalho consistiu na necessidade de recorrer a uma ferramenta de simulação, *SimTwo*, onde se desenvolveram modelos para simulação demonstrados no capítulo 4.

O capítulo 5 caracteriza-se pela pesquisa no mercado, análise e escolha de material a ser implementado. Por último, esta implementação é demonstrada no capítulo 6.

Capítulo 2

Elevador de Transferência

O Elevador de transferência, ilustrado na figura 2.1 é um aparelho médico destinado para transferir pacientes com mobilidade reduzida de ou para uma superfície de repouso, seja esta uma cama, cadeira de rodas, sanita ou até mesmo o chão. Neste processo de transferência, o paciente é envolvido por uma cesta que ficará presa a uma barra de suporte, através de um gancho. Posteriormente, através de um atuador de elevação, será erguido e movido para outro local.

2.1 Revisão Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica que motivou a redação de todo o capítulo alusivo ao estudo ergonómico e análise das características do elevador de transferência baseou-se, essencialmente, na exploração de conteúdo de alguns *websites* referentes a empresas de produção e comercialização de equipamentos médicos como é o caso da *Esense* e da *Invacare*.

Recorrendo à utilização da técnica de *snow-balling*, considerando como referência a página da *Esense*, viabilizou-se um maior conhecimento sobre a temática ergonomia, melhorando assim a contextualização da investigação, através das referências [9], [10], [11] e [17]. Toda a análise relativa à estrutura do elevador derivou de [14] onde foi possível recorrer ao Manual do utilizador e catálogo disponíveis pela *Invacare*.

Através do livro de *Jacek F. Gieras*, referência [12], foi possível reter informação sobre os ímanes permanentes colocados no rotor, salientando as suas propriedades/características e fazer uma análise sobre forças eletromotrizes e de métodos de controlo de motores BLDC, complementada pelo livro de *R. Krishnan*, representado em [15]. Ainda associado a esta referência, salienta-se o estudo sobre sensores de posição, nomeadamente sensores de *Hall* e *encoders*. Como forma de acrescentar conteúdo aos métodos de controlo, o artigo [19] serviu para abordar o controlo de um ciclo e redução do torque *ripple*. Para concluir as referências associadas ao terceiro capítulo, todo o conteúdo associado à constituição e funcionamento de um motor de corrente contínua sem escovas advém de [21] e [24].

Dos dados relativos à constituição de uma célula de carga, incluindo os seus componentes e o modo como a força é detetada, resultaram de uma investigação em [16] integrando-se com a apresentação e estudo relacionado com pontes de *Wheatstone* em [8] e [13].

Posteriormente, abordando a temática de simulação, a referência [1] serviu como generalização dos conteúdos relacionados com o funcionamento do *SimTwo* e a configuração hierárquica do ambiente simulado. Relativamente aos modelos apresentados, a sua constituição advém da informação contida em [3], [2] e [4] que, em simultâneo com os dados de articulações/*joints* proveniente de [20], tornou possível o desenvolvimento e programação de dois modelos semelhantes ao elevador de transferência da *Invacare*.

As referências [18] e [23] foram úteis na recolha de equações fundamentais para o cálculo das especificações do motor e de forças de atrito, respetivamente.

Para concluir, as referências [5], [6], [7] e [22] têm como objetivo comprovar a escolha e a compra dos materiais explicados no capítulo 5.

2.2 Família *Birdie Evo*

A *Invacare* possui vários modelos deste produto, cada um com características específicas, podendo assim satisfazer um variado leque de necessidades do cliente [14]. Os modelos são:

- *Birdie Evo*;
- *Birdie Evo Compact*;
- *Birdie Evo Versão Premium*;
- *Birdie Evo XPlus*;

A utilização deste aparelho restringe-se ao interior, quer seja em ambiente doméstico ou institucional (hospital e lares, por exemplo). O *Birdie Evo* é a versão *standard* destes produtos e tem a característica de ser dobrável e de possuir uma abertura manual das pernas (útil para aumentar o equilíbrio do produto durante a transferência de pessoas). De uma forma análoga, o *Birdie Evo Compact* também apresenta as mesmas características com a exceção de ser ligeiramente mais leve, pequeno e, conseqüentemente, mais fácil de transportar; características detalhadas nas tabelas 2.1 e 2.2. A versão *Premium* destes modelos pode ou não conter abertura de pernas elétrica e tem a exclusividade de possuir tecnologias como *slow'R* e *Smartlock*, um amortecedor integrado que suaviza as descidas e um sistema de fixação fiável que permite uma melhor estabilização do paciente, respetivamente. Por último, também com as tecnologias referidas anteriormente instaladas no seu sistema, existe o *Birdie Evo XPlus* que se apresenta como uma versão melhorada e reforçada para utilizações intensivas e de maiores cargas [14].



Figura 2.1: Elevador de transferência da Invacare

2.3 Características dos diferentes modelos

Numa fase inicial foi realizada uma análise à estrutura do elevador de transferência da *Invacare* de forma a saber as suas dimensões específicas. Para tal recorreu-se ao Manual de utilizador e ao Catálogo do *Birdie Evo*. Apesar de todo o detalhe e quantidade de informação relacionada a este produto, foi feita uma seleção dos dados mais relevantes, dentro das diferentes variantes do modelo *Birdie Evo*.

Tabela 2.1: Tabela de medidas relacionadas com os diferentes modelos da família *Birdie Evo*

	Birdie Evo	Birdie Evo Compact	Birdie Evo Premium	Birdie Evo XPlus
Regulação em altura (mm)	415-1660	530-1590	415-1660	415-1660
Largura Max Interior (mm)	1020	815	1020	1020
Largura Max Exterior (mm)	1100	890	1100	1100
Largura Min Interior (mm)	495	380	495	495
Largura Min Interior (mm)	640	520	640	640
Diâmetro dianteiro dos rodízios (mm)	75/100	75/100	100	100
Diâmetro traseiro dos rodízios (mm)	75/100	75/100	125	125
Comprimento da base (mm)	1220	1080	1235	1280
Altura da base (mm)	115	115	115	115

Tabela 2.2: Tabela referente a características como Massa e Bateria

	Birdie Evo	Birdie Evo Compact	Birdie Evo Premium	Birdie Evo XPlus
Massa máxima do paciente (Kg)	180	150	180	210
Massa das peças (Kg)	40	31	41	41
Bateria	Chumbo-Ácido	Chumbo-Ácido	Chumbo-Ácido	Chumbo-Ácido
Capacidade da Bateria (Ciclos)	40	40	40	40
Lifting Speed (mm/s)	30	23	40	40

O ciclo de trabalho caracteriza-se como sendo a percentagem de tempo que o aparelho deve trabalhar, seguido de um repouso. Neste caso, o ciclo de todos os aparelhos é de 10% ou de 2 minutos de uso contínuo, seguido de 18 minutos de descanso [14].

2.4 Ergonomia no trabalho

O manuseamento manual de cargas pesadas é uma das formas mais comuns de transporte nos mais variados ambientes de trabalho, estimando-se que cerca de 50% da força exercida pelo utilizador é aplicada aos movimentos de empurrar e de puxar essas mesmas cargas [11].

Decorrente do facto de esse tipo de tarefas ser executada de forma bastante regular e repetida durante o período de trabalho, os utilizadores tendem a sofrer algumas lesões a nível do sistema músculo-esquelético, conduzindo a uma perda progressiva não só da própria saúde mas como também da segurança no campo profissional [17].

Locais de maior complexidade muscular e ligamentar tendencialmente sofrem mais distúrbios devido ao efeito dos elevados torques e das forças de compressão e cisalhamento no corpo, contribuindo assim, para uma percentagem considerável de ausências nos dias de trabalho. A região lombar, do ombro e do punho são as mais afetadas nos profissionais de saúde, conforme é possível observar na figura 2.2 abaixo representada [17].

De acordo com algumas directrizes internacionais (NEN-ISO 11228-2:2007), apoiadas em pesquisas científicas, constatou-se que para além da força manual que é aplicada à movimentação de grandes cargas também outros fatores contribuem para o crescente risco de lesão músculo-esquelética nos utilizadores. A frequência da movimentação, o ângulo do corpo, o número de mãos que deslocam a carga e a altura do empurrão/tração são fatores condicionantes deste risco [9].

O elevador de transferência da *Invacare*, nas variantes do modelo *Birdie Evo* (objeto de estudo da presente dissertação), foi arquitetado de forma a responder economicamente a algumas questões potencializadoras, não só do risco de desenvolvimento de lesões ocupacionais como também da preocupação em rentabilizar a eficiência organizacional ao nível da produtividade, por exemplo.

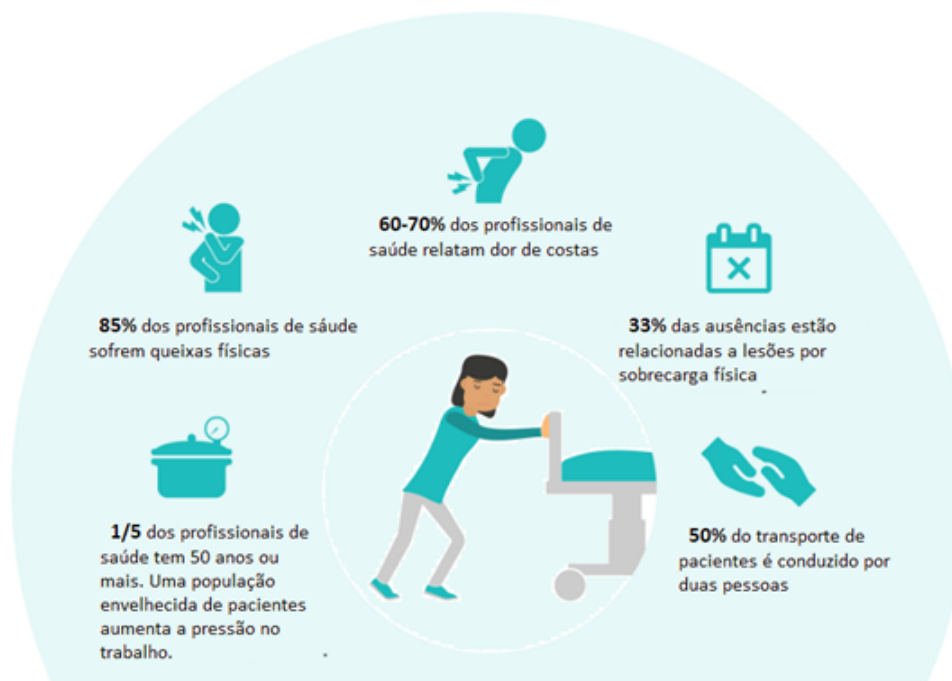


Figura 2.2: Figura representativa de desconforto no local de trabalho

2.4.1 Importância de um *design* ergonómico

A empresa *Invacare*, baseada nos principais fatores de risco profissionais/ocupacionais, dedicou-se à estruturação ergonómica dos principais componentes dos seus elevadores:

- **Sistema Amortecedor** – Inovação denominada *Slow'R* que diminui o efeito de balanço garantindo, consequentemente, maior sensação de segurança;
- **Mecanismo de fixação/extração rápido** – A barra do elevador pode ser fixa ou de desmontagem fácil através do sistema *SMART LOCK*, sistema este que permite a estabilização do utilizador;
- **Formato do gancho** - Este formato diminui a possibilidade das fivelas da cesta de transferência se soltarem da barra. Além disso, o encaixe dessas mesma fivelas é conseguido com apenas uma mão;
- **Punhos ergonómicos** – Facilitam as manobras de condução do elevador;
- **Design curvilíneo do braço e da barra da cesta** – Permite um maior contacto visual do cuidador com o utilizador durante o processo de transferência.
- **Design curvo das pernas do elevador** – Esta característica facilita a aproximação do elevador a várias superfícies de apoio, como o caso de cadeiras de rodas mais largas;
- **Abrangência em altura** – Elevação ergonómica bastante abrangente que possibilita uma rotação de 360 graus do utilizador.

Todas estas características, cuidadosamente implementadas, asseguram um ambiente de máxima segurança, conforto e confiança que envolve tanto o cuidador como o utilizador.

2.4.2 Impacto da inovação de um sistema de sensores na Ergonomia

De acordo com o que foi referido anteriormente, as alterações músculo-esqueléticas são uma das principais preocupações em vários ambientes trabalho, nomeadamente ao nível da saúde ocupacional. Este tipo de lesão ocorre frequentemente e associa-se ao manuseamento repetido de aparelhos [10].

O crescente número de pessoas idosas e obesas recruta uma maior necessidade, por parte dos profissionais de saúde, na assistência das atividades e dos cuidados diários exigindo um esforço adicional por parte dos mesmos [10].

Para dar resposta a estes entraves quotidianos, foi testado um sistema de sensores integrados para o elevador de transferência da Invacare que detetam a força manual do utilizador e convertem-na num suporte motorizado intuitivo que garante maior facilidade, rapidez e segurança na movimentação dos pacientes reduzindo, assim, o risco de lesão músculo-esquelética.

Num estudo recente baseado na relação entre a prevenção da doença músculo-esquelética e a implementação de um sistema motorizado (bastante semelhante ao testado para esta redação) nos elevadores *esense*, constatou-se uma redução de 30 a 40% da dor nas costas em 3 meses, 20 a 25% da dor nos ombros e uma diminuição da lesão ao nível do punho até 25%. Estes indicadores percentuais refletem uma melhoria nas condições de saúde dos profissionais, e consequentemente reduzem as suas ausências no trabalho [10].

2.5 Conclusões

Perante uma análise profunda das características do elevador de transferência da *Invacare*, conseguiu-se identificar e destacar os diferenciados aspetos de entre os diversos modelos da gama *Birdie Evo* que, consequentemente garantiram uma forte base de conhecimento e familiarização deste produto. Foi também possível salientar, após um estudo relativo à temática ergonomia, os atributos ergonómicos presentes no elevador, na medida em que enaltecem a preocupação da empresa *Invacare* com este tema.

Capítulo 3

Wheel Hub Motor

O modo de controlo de um *Wheel hub motor* apresenta-se como uma das tecnologias elétricas de condução mais avançada e caracteriza-se pela instalação de um ou vários motores em cada roda, sendo especialmente desenhada para veículos elétricos.

Uma das grandes vantagens desta tecnologia é a simplicidade da estrutura em relação a um modelo convencional, uma vez que existe a remoção de componentes associados ao processo de geração de energia (embraiagem, transmissão e eixos), verificando-se, desta forma, um aumento considerável na eficiência da transmissão de potência, redução do peso e um *layout* mais flexível [21].

3.1 Constituição dos motores BLDC

Atualmente, os motores *Brushless Direct Current* (BLDC) têm vindo a ganhar popularidade dentro dos diversos tipos de motores elétricos existentes.

Quando se trata de um motor para aplicações que requerem uma maior longevidade e elevada eficiência, ou seja, para eletrodomésticos, automóveis ou equipamentos industriais automatizados, os motores *brushless* são os ideais pelo facto de não necessitarem de manutenção (comutação elétrica através de interruptores) e por apresentarem valores típicos de eficiência entre 85% a 90%. Isto é algo que não se verifica em motores *brushed*, sendo que a necessidade de manutenção é consequência da fricção das escovas de grafite, na medida em que precisam de ser substituídas. Outras vantagens dos BLDC em relação aos motores DC são [24]:

- Melhor resposta dinâmica;
- Mais eficiência;
- Menos ruído;
- Gama de velocidades superior;
- Rácio entre torque e tamanho do motor é maior;

Quanto à sua estrutura, estes motores apresentam um rotor, com diversos ímanes permanentes, e um estator. Este último caracteriza-se por uma disposição circular de bobinas dotadas de um núcleo de aço que, ao serem percorridas por uma corrente elétrica, geram um campo magnético e se tornam num eletroímã. O funcionamento básico de um BLDC consiste na rotação do rotor a partir da interação de forças entre o ímã permanente e os eletroímãs, como consequência da atração de polos opostos. São motores síncronos na medida em que o campo magnético gerado pelo rotor e o campo magnético gerado pelo estator rodam à mesma frequência [24].

3.1.1 Estator

Tal como explicado anteriormente, mas de uma forma breve, um estator é constituído por um conjunto de laminações de aço colocadas axialmente ao longo da sua periferia interna, observável na figura 3.1. A maior parte dos motores BLDC possuem três enrolamentos de estator, sendo que cada um é construído de forma a que múltiplas bobinas estejam interligadas entre si. Estas bobinas são colocadas individualmente ou em conjunto nestas laminações de aço com o intuito de formar um enrolamento. Este procedimento é distribuído assim uniformemente pela periferia do estator, formando um número simétrico de polos [24].

É importante destacar que o modo como a conexão das bobinas é feita, dentro dos enrolamentos do estator, determina a existência de dois tipos de *Back electromotive force*: trapezoidal, figura 3.3, ou sinusoidal, figura 3.4.

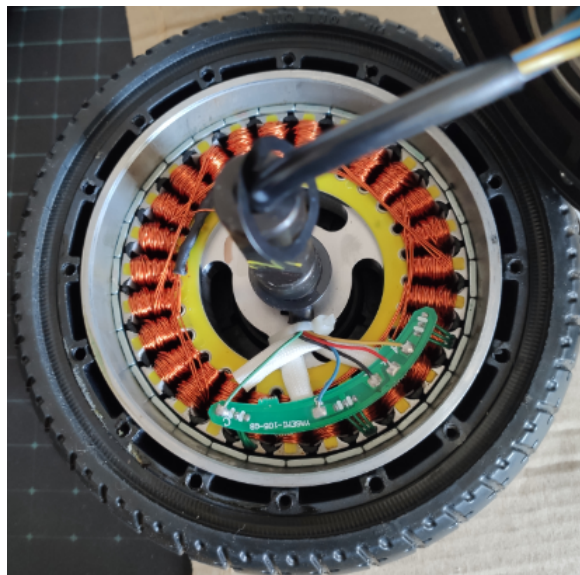


Figura 3.1: Interior de um motor usado no projeto.

3.1.2 Rotor

O rotor é constituído por ímanes permanentes, colocados de forma sequencial e alternada entre o polo Norte e Sul. Estes ímanes são escolhidos consoante os requerimentos da densidade

do campo magnético para o rotor.

No que diz respeito ao material que os constitui, a ferrite é a que se salienta na escolha, no entanto, à medida que a tecnologia evolui, os ímanes baseados em terras raras têm vindo a ganhar popularidade. Apesar de, em termos de custos, a Ferrite ser mais barata, tem a contra indicação de possuir baixa densidade de fluxo magnético, dado um certo volume. Em oposição, os ímanes baseados em terras raras permitem manter o valor do torque na saída, para um volume inferior, sabendo que possuem uma maior densidade de fluxo magnético [24].

3.1.2.1 Ímanes permanentes e as suas propriedades

Dentro dos ímanes permanentes usados especificamente para motores elétricos, destacam-se 3 tipos [12]:

- I. Alnico;
- II. Cerâmicos (ferrites);
- III. Materiais baseados em terras raras;

3.1.2.2 Alnico

Relativamente ao Alnico, as principais vantagens resumem-se a uma alta densidade de fluxo magnético remanescente e baixos coeficientes de temperatura. Graças a isto é possível que haja um elevado fluxo magnético num entreferro considerável, a temperaturas magnéticas elevadas. Outro fator importante a destacar é a baixa força de coercividade, juntamente com uma curva de desmagnetização não linear, o que facilita tanto o processo de magnetização como o de desmagnetização do Alnico.

3.1.2.3 Ferrite

Em comparação com o Alnico, a Ferrite apresenta uma força coerciva superior mas um fluxo de densidade magnética remanescente inferior. As principais vantagens são o baixo custo e uma resistência elétrica elevadíssima na medida em que, com o aumento do volume do Íman permanente não existe o chamado fenómeno correntes de *Foucault*.

3.1.2.4 Materiais baseados em terras raras

O nome destes materiais advém não da sua raridade, mas sim de uma vasta mistura de minerais naturais. No caso do $SmCo_5$, apesar de um custo relativamente caro, possui um fluxo de densidade magnética remanescente alto, elevada força coerciva e energia, curva de desmagnetização linear e coeficiente de temperatura baixo.

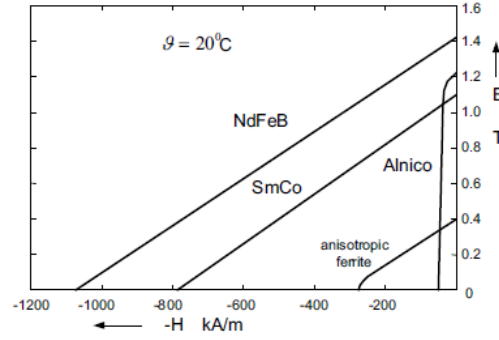


Figura 3.2: Curvas de desmagnetização

3.2 Back Electromotive Force

Segundo a lei de indução de *Faraday*, a variação de um campo magnético nas proximidades de um condutor, gera uma força eletromotriz (EMF). Quando um motor *brushless DC* roda, os enrolamentos que estão no seu interior geram a conhecida *Back-EMF* pelo facto de se opor à tensão (U) de alimentação. Sendo assim, numa perspetiva matemática, segundo a lei de *Faraday* [15][12]:

$$e = N_e \frac{d\phi_f}{dt} \quad (3.1)$$

Onde e corresponde à EMF instantânea induzida numa bobina com N_e espiras e ϕ fluxo magnético.

Nos motores *BLDC*, a *EMF* pode ser expressa em função da velocidade do rotor n :

- Operação de meia onda:

$$E_f = c_E \phi_f n = k_E n \quad (3.2)$$

- Operação de onda completa:

$$E_{fL-L} = c_E \phi_f n = k_E n \quad (3.3)$$

Na medida em que c_E ou $k_E = c_E \phi_f$ é uma constante também chamada de *armature constant*. Para a excitação de um íman permanente e uma reação de armadura constante, $\phi_f \approx \text{const}$ [12].

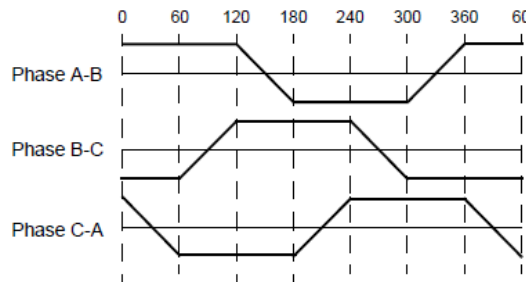
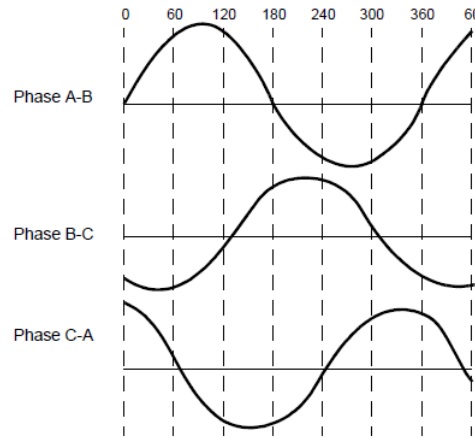


Figura 3.3: *Back-EMF* trapezoidal

Figura 3.4: *Back-EMF* sinusoidal

3.3 Sensores de posição

A posição do rotor pode ser verificada a partir de sensores de posição, tal com os *Hall sensors*, *encoders* ou *resolvers*. No caso dos motores *BLDC*, estes sensores fornecem um *feedback* de sinais referente à posição angular do rotor [12].

3.3.1 Sensores de *Hall*

É importante salientar os sensores de *Hall* uma vez que, para este projeto, a velocidade dos motores é calculada com base nesta tecnologia. Estes sensores em particular conseguem gerar uma tensão, representada na figura 3.5 quando alimentados por uma corrente DC e localizados perto de um campo magnético estacionário:

$$V_H = K_H \frac{1}{\delta} IB \sin \beta \quad (3.4)$$

- K_H : Constante de *Hall*;
- δ : Largura do semicondutor;
- I : Corrente;
- B : Densidade de fluxo magnético;
- β : Ângulo entre o vetor de B e a superfície do elemento de *Hall*;

No caso de um típico motor *brushless* de três fases, para detetar a posição do rotor são necessários dispor três sensores de *Hall* pela sua extensão, desfasados de 120° . Este valor é calculado pela seguinte formula em que, no caso de dois polos ($p = 1$) e três fases ($m_1 = 3$), o desfasamento (α_H):

$$\alpha_H = \frac{360^\circ}{m_1 p} \quad (3.5)$$

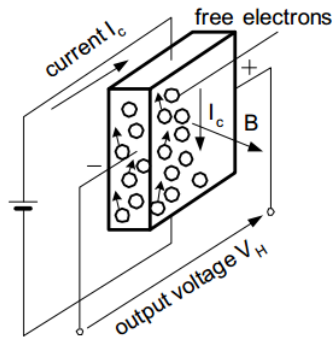


Figura 3.5: Sensor de *Hall*: tensão de saída

3.3.2 Encoders

Os *encoders* podem dividir-se em duas classes: absoluto e incremental, tal como representado na figura 3.6.

O funcionamento deste aparelho resume-se à emissão de luz, por parte de um *led*, e receção desta mediante um *photosensor*, através de um disco que contém zonas transparentes. No caso de um *encoder* incremental, um sinal de onda quadrada é gerado relativa e proporcionalmente às marcações que se encontram no disco, dado um incremento da posição angular do eixo do motor. No que diz respeito à direção da rotação, é necessário que o *encoder* tenha dois canais de forma a poder observar o desfasamento dos dois sinais [12].

Um *encoder* absoluto é um dispositivo que fornece informação única da posição para cada localização angular axial, através de *outputs* digitais codificados para binário. A vantagem deste aparelho em relação ao incremental é que, por não ser um contador, não perde a informação sobre a posição em caso de perda de energia [12].

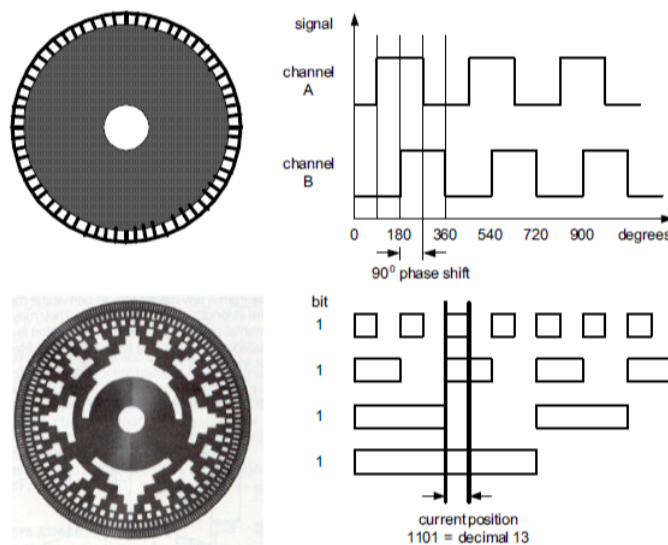


Figura 3.6: *Encoder* incremental e absoluto, respetivamente

3.4 Controlo de motores BLDC

3.4.1 Controlo de um ciclo e redução do torque *ripple*

Uma das desvantagens dos BLDC são as oscilações do torque originadas principalmente pela comutação de correntes de fase. O método que será apresentado seguidamente tem como princípio o controlo de um ciclo do motor e, para reduzir este torque *ripple*, propõe um controlo de torque médio baseado neste ciclo. De uma forma resumida, é espectável que o torque médio na saída possa ser controlado por um torque de referência em cada ciclo e em tempo real [19].

A forma de controlo apresentada é através de vetores espaciais. Considerando que o estator possui três bobinas ou três fases de alimentação, desfasadas de 120° , apenas duas destas fases são ativas e responsáveis pela rotação, ao longo de cada período de comutação. O modo de ativação destas fases é conseguido através de um conjunto de interruptores controlados por um bloco lógico de comutação, figura 3.7, com os seguintes estados: (100010), (100001), (010001), (010100), (001100) e (001010); estados estes obtidos através de sensores *Hall* e ligados devidamente ao inversor [19].

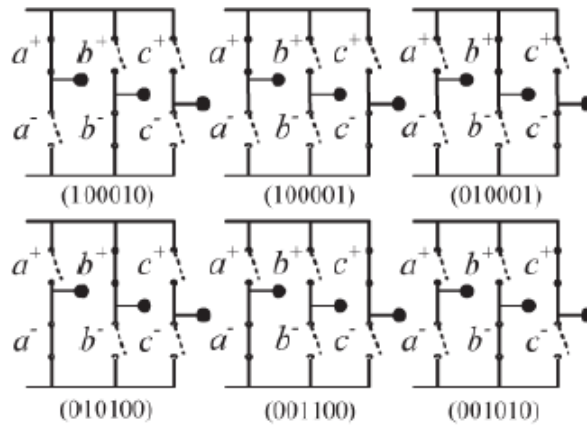


Figura 3.7: Comutações elétricas

Segundo o princípio de conversão eletromecânica de energia, demonstrado em (3.6), a energia incremental num sistema (dW_e), pode ser classificada como um somatório da energia mecânica de saída do mesmo (dW_{mech}), das perdas energéticas (dW_{loss}) e da alteração de energia no entreferro (dW_m). Sendo assim, foram deduzidas as seguintes fórmulas a partir deste princípio, que permitem relacionar o torque médio com a energia, por cada ciclo de controlo [19]:

$$dW_e = dW_m + dW_{mech} + dW_{loss} \quad (3.6)$$

Considerando que as perdas por alteração de energia no espaçamento de ar são nulas quando o campo magnético atinge o equilíbrio; e assumindo que a eficiência do sistema é constante devido

à curta duração de cada ciclo, então:

$$dW_e = dW_{mech} + dW_{loss} = \frac{1}{\eta} dW_{mech} \quad (3.7)$$

Por fim, é possível relacionar o torque médio na saída (T_{av}) com a energia introduzida ao sistema, na medida em que o $\Delta\theta$ corresponde à variação da posição angular do rotor, por ciclo:

$$dW_e = \frac{1}{\eta} dW_{mech} = \frac{\Delta\theta}{\eta} T_{av} \quad (3.8)$$

No modelo final apresentado, são implementados os seguintes componentes:

- Controlador PI, cujo ganho foi concebido para controlar a energia à saída do controlador;
- Um integrador, que calcula a energia de entrada, em cada ciclo, através da integração do produto da tensão e corrente no barramento dc;
- Um inversor trifásico;
- Bloco lógico de comutação;
- Sensores de efeito de *Hall*, usados para calcular a velocidade de rotação que, por sua vez, realimenta o controlador PI com o erro entre essa velocidade e a de referência;

3.4.2 *Sensorless Control*

Pelo aquilo que foi possível observar até agora, as comutações elétricas têm sido baseadas na posição do rotor, que é fornecida pelos diversos tipos de sensores abordados anteriormente. De uma forma resumida, o *drive system* depende inteiramente destes sensores o que, por vezes, pode não ser o desejável dependendo do tipo de aplicações. Algumas das razões pela qual o sistema beneficia com a eliminação destes sensores são [15][12]:

- Redução dos custos das aplicações;
- Confiança do sistema devido à sua simplificação ao nível da remoção de sensores e cablagem associada;
- Ambientes com pó ou óleo incentivam à manutenção dos sensores para que funcionem devidamente;
- Limite de temperatura dos sensores de *Hall*;
- Motores com potência inferior a 1W podem perder eficiência com a presença destes sensores;
- Aplicações compactas onde outros dispositivos são mais "importantes", como por exemplo um disco rígido (*HDD*);

Tendo estes factores em conta, existem muitos métodos que permitem estimar os sinais de comutação. Após a análise destes métodos, destacam-se os seguintes [15][12]:

- I. **Deteção do terceiro harmónico da *EMF* induzida:** Este método serve-se da deteção do terceiro-harmónico da tensão presente nos enrolamentos da máquina. Este sistema pode ser facilmente alcançado e praticamente sem custos, a partir de quatro resistências implementadas;
- II. **Deteção de *Back-EMF* em fases inativas:** Quando estas fases do estator não estão a ser energizadas (algo que ocorre 33.33% do tempo na medida em que apenas duas das três fases estão ativas após cada comutação) é induzida uma *EMF* nos enrolamentos destas fases. A *EMF* induzida contém a informação no cruzamento zero e quando alcança uma região constante, indica a necessidade de mudança de fase. Para além disto, a sua polaridade determina a polaridade da corrente que deve ser injetada nessa mesma fase. É possível através de um *output* integrador fazer uma correspondência destes valores para graus;
- III. **Estimação:** Através da deteção de tensões e correntes aplicadas nos terminais do motor, da indutância própria e mútua, é possível identificar forças eletromotrizes. Uma vez que a corrente e tensão de entrada são isoladas, é possível também extrair sinais isolados.

Todos os métodos que dependem da *EMF* induzida têm algumas desvantagens associadas à falta de informação em relativamente à posição do rotor inicial (*EMF* induzida é nula a 0 m/s e dificilmente detetável a baixas velocidades). Sendo assim, é necessário realizar diversos procedimentos primeiramente [15]:

1. Para conhecer a posição inicial do motor é necessário excitar algumas fases de forma a colocá-lo na posição desejada;
2. Tal como mencionado anteriormente, após o começo da rotação, a informação relativa à *EMF* não é fidedigna sendo necessário energizar as fases do estator segundo uma variação de frequência baixa. Assim é possível manter o sincronismo e o controlo caso se conheça o valor da carga.

3.5 Sensores de força

As células de carga, quando usadas correta e adequadamente, são sensores bastante precisos e fidedignos no que diz respeito à medição de massas, *feedback* de forças de compressão e /ou outras medidas. Relativamente ao formato das mesmas, existe uma vasta quantidade de tipos e *shapes* desde barras de dobrar, botões, em formato de "S", discos, entre outros.

3.5.1 *Strain Gauge*

Uma célula de carga contém vários componentes considerando-se o extensómetro como o principal elemento do sensor. Este último possui uma geometria específica adequada à medição

da deformação de um material submetido a uma determinada tensão. Quando a deformação (força que atua numa deliberada área de um objeto) é aplicada a condutores verifica-se uma variação na resistência elétrica, fenómeno descoberto por *Lord Kelvin* em 1856 [16].

O conhecido efeito *Poisson* acontece quando existe contração ou expansão de um material submetido a uma deformação mecânica. Para se medir a tensão aplicada é necessária a conexão de um extensómetro à superfície de um elemento de mola, que exiba efeitos de *Poisson*, e as variações mecânicas à superfície são transmitidas ao medidor. A intensidade da variação da resistência elétrica nos extensómetros é proporcional à intensidade da força executada [16].

3.5.2 Elemento Spring

Como referido anteriormente, o elemento de mola encontra-se conectado ao objeto que exerce a força, ocorrendo deformação deste mesmo elemento aquando da aplicação de uma tensão externa. De acordo com a composição do material (geralmente de alumínio ou aço) cada tipo de elemento de mola possui um efeito de *Poisson* longitudinal (ao longo do eixo x) e transversal (ao longo do eixo y) ao ser exercida uma força necessariamente incluída na faixa elástica do material que responde linearmente. Danos permanentes verificar-se-ão na ocorrência da aplicação de uma força superior ao limite elástico do material [16].

O coeficiente de *Poisson* define-se como a razão entre a deformação transversal associada a uma deformação longitudinal na direção da força aplicada e adota valores que variam de 0 a 0,5 para a maioria dos materiais. A dedução da sua fórmula matemática é facilitada pela interpretação de um exemplo representado pela figura 3.8.

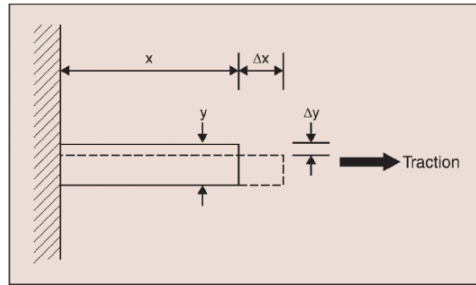


Figura 3.8: Material submetido a forças de tração

O coeficiente de *Poisson* (ν) obtém-se através da razão entre a deformação longitudinal (ϵ_{eu}) e a deformação transversal (ϵ_t):

$$\epsilon_{eu} = \frac{\Delta x}{x} \quad (3.9)$$

$$\epsilon_t = \frac{\Delta y}{y} \quad (3.10)$$

$$\epsilon_t = -\nu \epsilon_{eu} \quad (3.11)$$

3.5.3 Sinal Obtido

Um dos principais problemas dos *Strain gauges* são as insignificantes variações do valor das resistências após a deformação, valores estes que podem rondar entre 0.1 a 0.3%. Outro factor delicado a ter em consideração é a alteração de temperatura, na medida em que também influencia esta variação [16].

Posto isto, uma das soluções principais converge para o uso de pontes de *Wheatstone*, designadas com o propósito de medir essas mesmo pequenas variações de resistência e convertê-las para um valor em tensão. Uma configuração normal desta ponte pode ser observada na figura 3.9 com a presença de quatro *strain gauges* denominados por SG_1, SG_2, SG_3 e SG_4 [8].

Posteriormente, será necessário realizar o condicionamento do sinal que inclui por exemplo a utilização de um amplificador de instrumentação, filtragem para prevenção de *aliasing* e remoção de ruído externo (causado por outras fontes eletromagnéticas)[16].

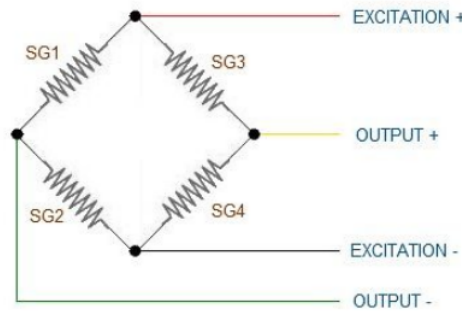


Figura 3.9: Ponte de Wheatstone

A equação geral que permite calcular a diferença de tensão na saída U_A relativamente à tensão de entrada U_E é a seguinte [13]:

$$U_A = \frac{SG_1 SG_4 - SG_2 SG_3}{(SG_1 + SG_2)(SG_3 + SG_4)} U_E \quad (3.12)$$

Para o caso em que o valor do rácio da tensão de saída com a tensão de entrada for nulo, o valor de todas as resistências presentes no circuito são iguais ou então $SG_1 : SG_2 = SG_3 : SG_4$.

3.6 Conclusões

Relativamente a este capítulo, foi realizada uma investigação orientada a motores de corrente contínua sem escovas, abordando-se temas relacionados com a sua constituição, modo de funcionamento, forças eletromotrizes envolvidas e técnicas de controlo dos mesmos.

Considerou-se também essencial estudar sensores de força, nomeadamente células de carga, devido à idealização inicial de controlar a motorização do elevador a partir de forças aplicadas nas suas barras de empurrar.

Capítulo 4

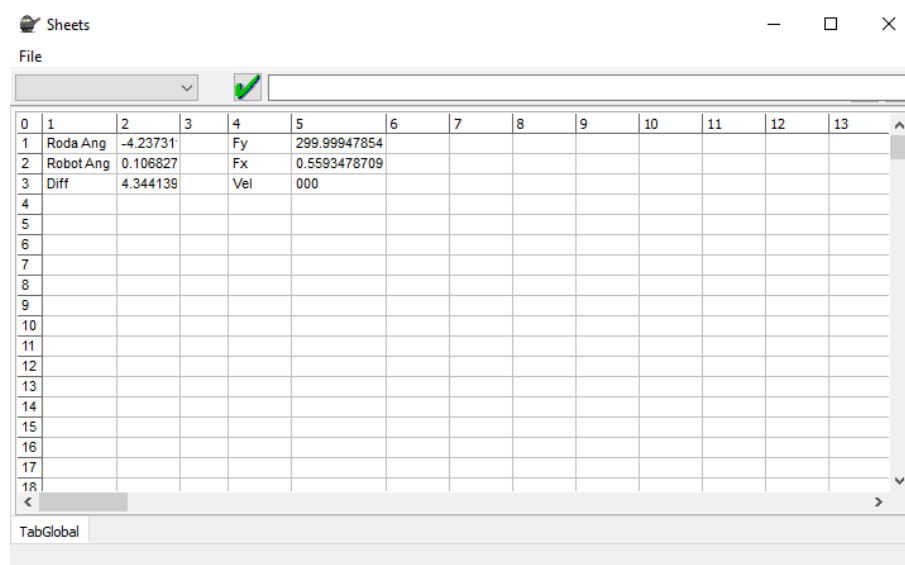
Modelo de Simulação no SimTwo

A plataforma de simulação *SimTwo* foi desenvolvida por um grupo de robótica móvel *5dpo*, constitui-se como uma ferramenta versátil e importante na área da simulação robótica [1].

A sua utilidade converge para uma simulação realista de qualquer tipo de robô terrestre, constituído por articulações rotativas e/ou rodas, num ambiente 3D e em tempo real. De realçar também o realismo ao nível da dinâmica e cinemática.

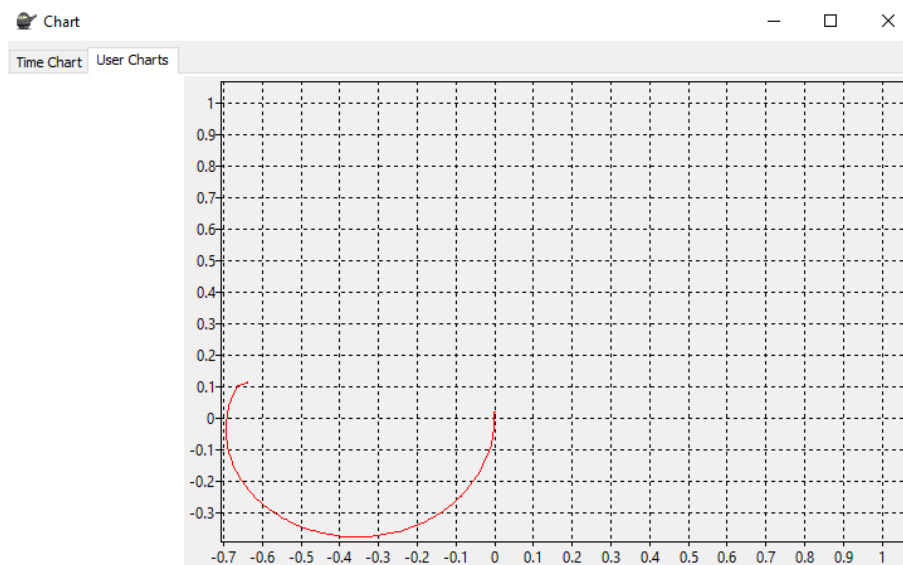
4.1 Introdução ao SimTwo

A ferramenta *SimTwo* apresenta diversas secções que permitem ao utilizador ter uma visão geral sobre o ambiente de simulação. Num ponto de vista de análise gráfica de valores ou numa perspetiva de exibição em tempo real de variáveis do sistema, as figuras 4.1 e 4.2 identificam as janela *Sheets* e *Chart* que permitem a realização dessas funções, respetivamente.

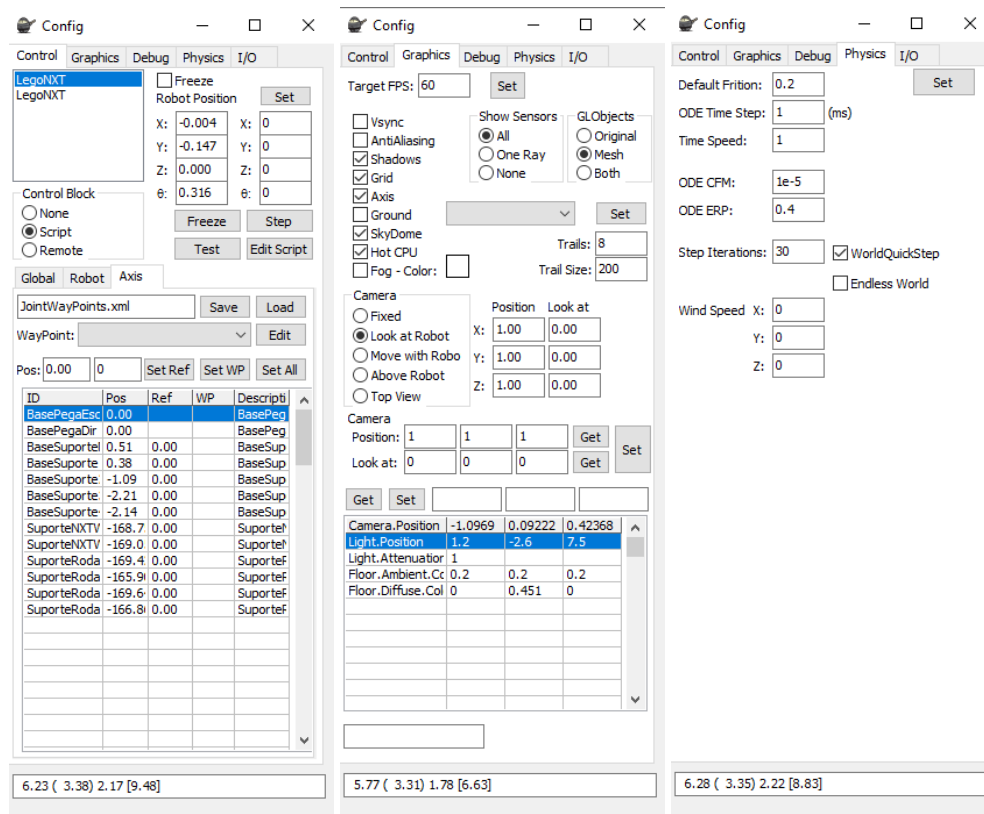


	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1		Roda Ang	-4.23731		Fy	299.99947854								
2		Robot Ang	0.106827		Fx	0.5593478709								
3		Diff	4.344139		Vel	000								
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														

Figura 4.1: Captura da janela *Sheets*

Figura 4.2: Captura da janela *Chart*

No que diz respeito à configuração da simulação e do cenário, tal como a alteração da posição da câmara, velocidade da simulação, posição do robô, *debugging*, *inputs* e *outputs*, o processamento de todos estes dados é realizado a partir da janela de *Config*, demonstrada na figura 4.3.

Figura 4.3: Captura da janela *Config*

A implementação do cenário é feita através de ficheiros em formato *xml*, na janela *XML Scene Editor*, permitindo assim definir informação por hierarquias. Neste caso, todas as estruturas simuladas correspondem a objetos com determinadas formas, sendo que estes são agrupados por um esquema hierárquico de secções e subsecções. Por sua vez, estas secções e subsecções podem ser definidas através de constantes que possibilitam um maior controlo na construção do robô.

Relativamente à interação com a simulação ou comportamento do robô, existe um conjunto de procedimentos e funções que podem ser criados a partir da janela *Code editor*, escrito em *Pascal*.

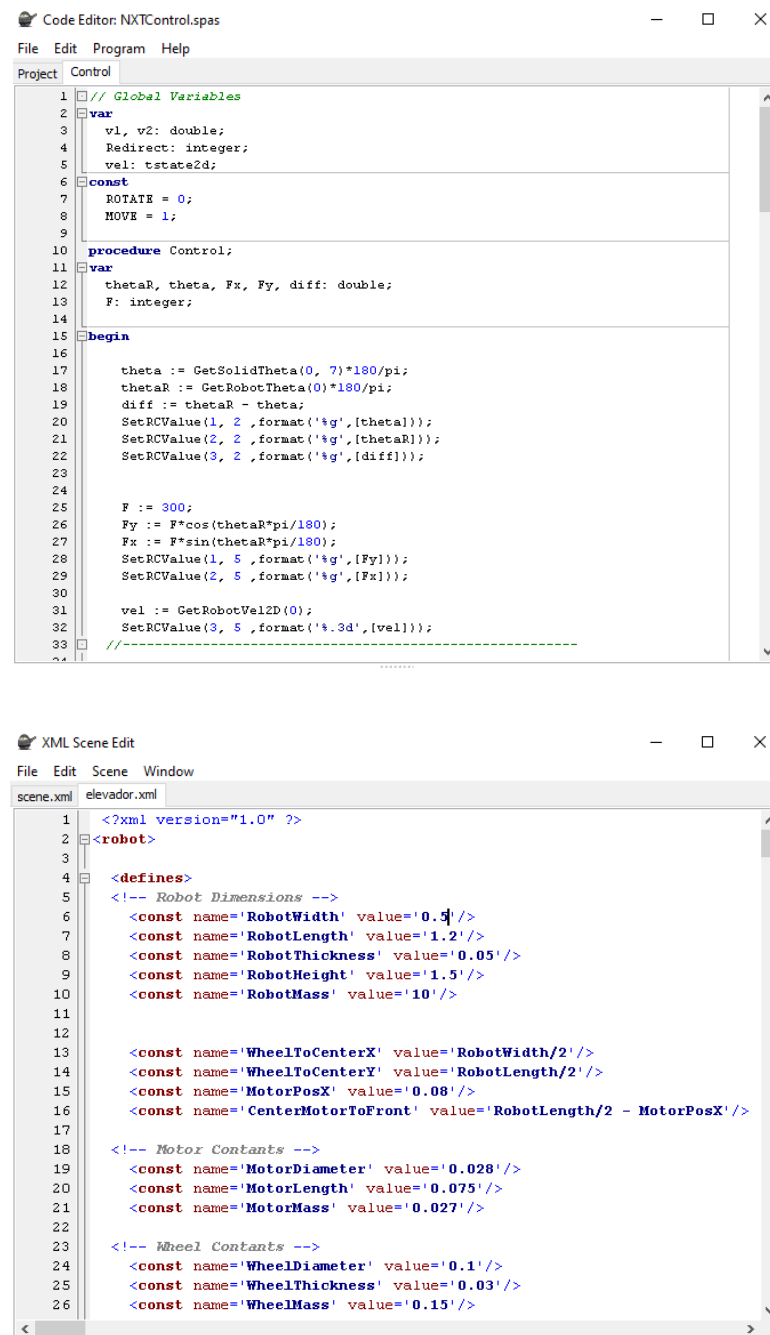


Figura 4.4: Captura das janelas *Code Editor* e *XML Scene Editor*, respetivamente

4.2 Configuração do ambiente

Dentro da configuração hierárquica de informação mencionada anteriormente, a secção *scene* encontra-se no topo e divide-se em cinco segmentos [1]:

- I. **Robot**: São definidas as restrições físicas do robô, nomeadamente o aspeto do corpo e as características físicas;
- II. **Obstacles**: Caracterizado por definir estruturas imóveis, a sua posição e aspeto;
- III. **Things**: Divergente ao segmento *Obstacle*, são definidas estruturas não estáticas, a respetiva posição e o seu aspeto;
- IV. **Ball**: Estabelecimento do corpo gráfico de um objeto móvel e das suas características físicas;
- V. **Field**: É definido o tamanho e o aspeto estético do terreno de simulação;

Como é possível observar, a definição dos segmentos II e III é muito semelhante. A diferença denota-se em momentos de colisão entre estruturas, na medida em que os *Obstacles* permanecem inertes e as *Things* não. Neste último caso, a simulação atua realisticamente de acordo com as suas propriedades físicas. De realçar que estas entidades não podem ser de alguma maneira controladas [3].

Código 1 Exemplo de código representativo da configuração hierárquica

```

1  <scene>
2    <robot>
3      <ID name='Elevador' />
4      <pos x='0' y='0' z='0' />
5      <rot_deg x='0' y='0' z='0' />
6      <body file='elevador.xml' />
7    </robot>
8  </scene>
9

```

Como ilustrado no Código 1, a secção *Scene* apresenta o segmento *robot* que, por order ascendente nas linhas de código, identifica o nome do robô, as coordenadas da posição inicial, o ângulo de rotação inicial e o ficheiro *xml* que contém o modelo de simulação.

4.3 Estruturas de simulação

Todo o realismo alcançado advém da decomposição do robô em corpos rígidos e motores eléctricos, sendo o comportamento individual destes corpos simulado através de características físicas, tal como a massa, forma do corpo, inércia, fricção e elasticidade [3]. As ligações entre estes corpos é feita a partir de articulações.

De uma forma genérica, um robô no *SimTwo* pode ser decomposto em várias camadas/objetos [4][2][3]:

1. **Solids/Shapes**: Sólidos com diversas formas (*cuboid*, *cylinder* e *sphere*);
2. **Shells**: Sólidos sem massa e que nada alteram as propriedades físicas do robô. Usadas apenas para colisões e *design*;
3. **Sensors**: O robô pode ter acoplado um conjunto de sensores que lhe fornecem informação sobre o ambiente em torno dele;
4. **Actuators**: Motores elétricos dentro de rodas;
5. **Articulations**: Conexão realizada entre estruturas. Pode ser dos tipos (*slider*, *socket*, *hinge*, entre outras);

Código 2 Exemplo de código representativo de um objeto

```
1  <solids>
2    <cuboid>
3      <ID value='Base' />
4      <mass value='RobotMass' />
5      <size x='0.05' y='0.05' z='0.05' />
6      <pos x='RobotWidth/2' y='RobotLength/2' z='0.15' />
7      <rot_deg x='0' y='0' z='0' />
8      <color_rgb r='128' g='0' b='0' />
9    </cuboid>
10 </solids>
11
```

Para cada objeto existem várias propriedades essenciais que o definem, nomeadamente o ID (identificador), o seu tamanho, posição do centro de massa e a sua orientação em relação aos eixos x, y e z. Todas as unidades são do SI.

No Código 2 existem várias constantes que foram previamente definidas de forma a auxiliar a escrita, sendo estas "Base", "RobotMass", "RobotWidth" e "RobotLength". Como é possível observar, dentro da categoria *solids*, definiu-se um objeto do tipo *cuboid* cujas características como o nome, massa, tamanho, posição, ângulo e cor foram definidas individualmente nas linhas 3, 4, 5, 6, 7 e 8, respetivamente.

4.4 Modelos Simulados

Uma das adversidades iniciais deste projeto, relacionada com a motorização do elevador, deriva do facto de todas as suas rodas serem rodízios. Devido à liberdade de movimentos que estas apresentam, a implementação de motores fica impossibilitada em virtude de um controlo inexistente da orientação das rodas. Tal como foi explicado anteriormente, o uso da ferramenta de simulação *SimTwo* teve um grande impacto na conceção do produto final por permitir experimentar diferentes formas de motorizar um modelo de simulação semelhante ao elevador de transferência.

Para resolver isto, uma das soluções abordadas inicialmente passaria por remover os quatro rodízios e substituí-los por rodas omnidireccionais, nomeadamente as *mecanum*. Rapidamente se constatou que esta solução não seria viável por diversos motivos:

1. Sabendo que o elevador se destina a um uso doméstico, a existência de superfícies irregulares (como por exemplo carpetes ou tapetes), que não se verificam tão assiduamente em ambientes institucionais, tornam as rodas omnidireccionais pouco fidedignas graças à ineficiência que apresentam em superfícies deste género;
2. Seria necessário remover o mecanismo manual ou elétrico de abertura das pernas em consequência da alteração da cinemática inicial do produto;
3. Após discussão desta solução com o orientador da empresa, chegou-se à conclusão que este não deveria ser o desfecho deste produto, tendo por base a ideia de auxiliar o utilizador a empurrar o elevador e não de torná-lo um robô, inteiramente motorizado;

Posteriormente, sem se explorar mais o uso de rodas omnidireccionais, procedeu-se à simulação de dois modelos que mantivessem a presença dos rodízios, representados na figura 4.5, e que ao mesmo tempo fossem motorizados.

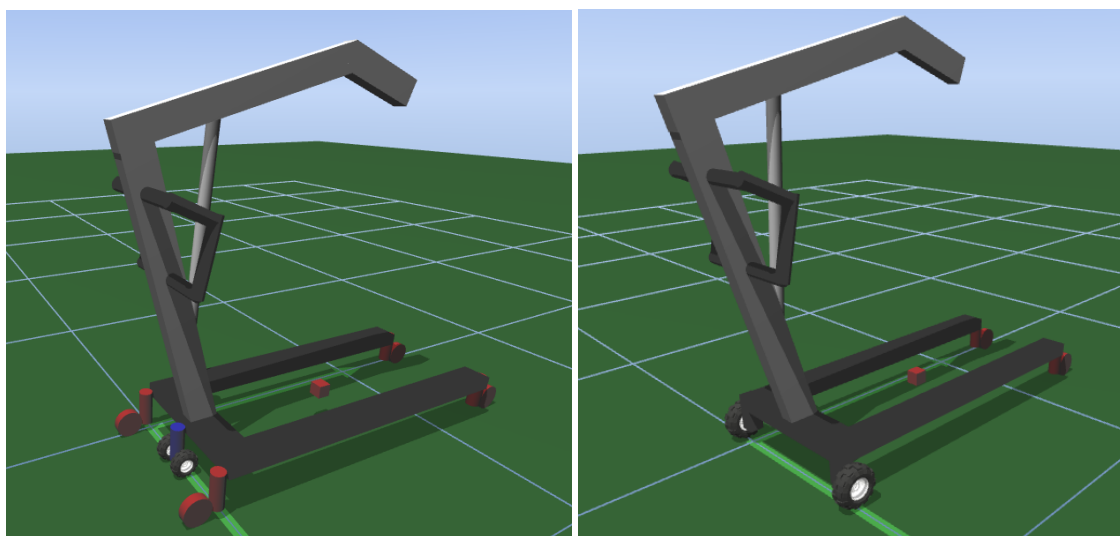


Figura 4.5: Ambiente de visualização 3D com os modelos desenvolvidos

Estes modelos foram desenvolvidos tendo em especial atenção as medidas do elevador de transferência da *Invacare*, nomeadamente o comprimento, largura e altura, explícitos na tabela 2.1. Como as diversas variantes da *Birdie evo* possuem dissemelhantes medidas, para auxiliar os cálculos, foram escolhidos valores aproximados e arredondados para estas variáveis:

- Comprimento = 1200 mm;
- Altura = 1500 mm;
- Largura = 500 mm;

Como consequência da reduzida informação detalhada sobre cada peça que o constitui, a estrutura foi desenhada e desenvolvida de forma a aproximar-se esteticamente do modelo real. Infelizmente, não é possível simular, através do *SimTwo*, o processo de abertura/fecho manual das pernas do elevador.

4.4.1 Constituição do primeiro modelo

Neste modelo desenvolvido, é possível observar com mais detalhe, através da figura 4.6, a implementação feita no centro da base do elevador. Resumidamente, este sistema assemelha-se a um rodízio no sentido em que há liberdade de rotação sobre o eixo z mas, em vez de uma, existem duas rodas motorizadas e paralelas entre si, instaladas no suporte destacado a azul, que permitem controlar essa orientação/rotação.

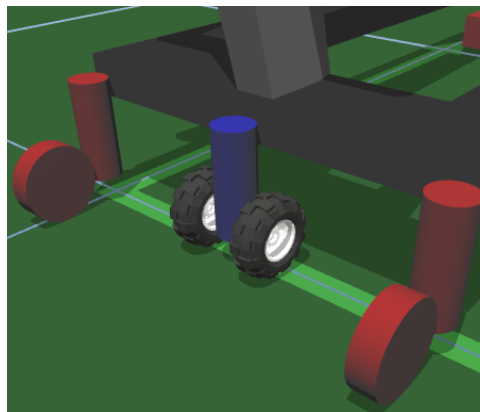


Figura 4.6: Solução principal demonstrada no ambiente visualização 3D

É também possível observar os rodízios destacados a vermelho e a sua constituição. São portanto formados por dois cilindros, em que um corresponde à roda e o outro ao suporte da mesma. Para reproduzir esta estrutura foi necessário replicar um código semelhante ao demonstrado no Código 2, para cada cilindro, mas substituindo obviamente o elemento `<cuboid>` por `<cylinder>` e fazendo as respetivas alterações nas outras características. Para além disto, também foi necessário fazer a ligação base-suporte e suporte-roda, através de *articulations*.

Neste exemplo específico de Código 3, o elemento `<articulations>` é parente do `<joint>`, onde é seguidamente especificado o tipo de conexão. Da linha 3 até à 10, é identificado por ordem

Código 3 Exemplo de código representativo de ligação entre 2 objetos

```

1  <articulations>
2    <joint>
3      <ID value='SuporteRoda1' />
4      <connect B1='Suporte1' B2='Roda1' />
5      <pos x='0' y='-0.1' z='0.05' />
6      <axis x='1' y='0' z='0' />
7      <type value='Hinge' />
8      <motor active='0' />
9    </joint>
10 </articulations>
11

```

ascendente o nome/ID da ligação, quais os objetos a serem conectados, as coordenadas do contacto entre estes, a orientação do eixo, o tipo de articulação [20] e a existência de motor.

Tabela 4.1: Tipos de articulações

Articulação	Graus de liberdade
Socket	3
Hinge	1
Slider	1
Universal	2
Fixed	0

O motor que, apesar de não observável, já se encontra inserido nas rodas apresenta características que podem ser definidas com antecedência, características essas como as especificações do motor, o rácio da caixa redutora, valores de fricção, informação sobre o encoder e controlador.

Em suma, como cada objeto do robô é individualmente simulado segundo as suas características físicas, grande parte da estrutura desenvolvida foi conseguida a partir de *Shells*, de forma a não sobrecarregar o processamento do *SimTwo*, excetuando partes essenciais como as rodas, os suportes destas e as barras de empurrar. Estas *Shells* constituem-se como parte integrante do *design*. De destacar também a existência de um bloco central (*<Solid>*) que contém a verdadeira massa do elevador.

4.4.2 Constituição do segundo modelo

Este segundo elevador de transferência simulado é em tudo igual ao primeiro salvo a configuração estrutural e motora da parte traseira. O sistema central anteriormente apresentado foi removido e procedeu-se à substituição dos rodízios de trás por rodas motorizadas fixas, tal como demonstrado na figura 4.7.

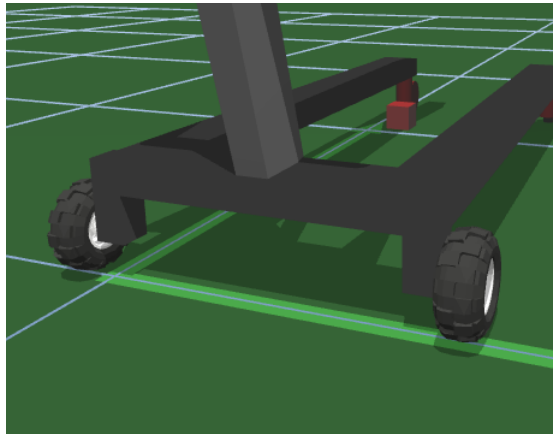


Figura 4.7: Solução secundária demonstrada no ambiente visualização 3D

4.5 Controlo

O controlo dos dois modelos é realizado na janela *Code Editor*.

Existem duas vertentes importantes a salientar relativamente às forças envolvidas durante a utilização de um elevador de transferência. Primeiramente, a força aplicada pelo utilizador nas barras de empurrar do produto e, em segundo lugar, a força exercida pelos motores após a implementação do sistema.

Em ambos os modelos, o modo como é simulada a aplicação de forças na pega é o mesmo. Dentro do *SimTwo* existe uma vasta lista de funções e procedimentos já criados sendo um destes:

```
1 procedure SetSolidForce(R: LongInt; i: LongInt; Fx: Double; Fy: Double; Fz:
2 Double);
```

Este procedimento tem como parâmetros o ID do robô, o ID do sólido em questão (neste caso são as pegas esquerda e direita) e a força exercida no centro de massa do objeto segundo os eixos x, y e z.

Relativamente ao controlo dos motores, o modo de atuação converge para a simulação de uma tensão aplicada nos seus terminais onde os parâmetros passados são, mais uma vez, o ID do robô, o ID do sólido (neste caso as rodas), variando por fim no último parâmetro, que corresponde a um valor nominal de tensão. Este procedimento é o seguinte:

```
1 procedure SetAxisVoltageRef(R: LongInt; i: LongInt; aVoltage: Double);
2
```

Estes dois métodos foram sempre usados em unísono.

Relativamente ao primeiro modelo, graças ao facto de a sua estrutura ser flexível e móvel, foi possível simular deslocações laterais, rotacionais, frontais e na retaguarda. No caso do segundo modelo, como tem uma estrutura mais rígida foi possível simular as mesmas deslocações mencionadas anteriormente, excetuando as laterais.

4.6 Conclusão

A ferramenta *SimTwo*, apesar de útil e versátil, apresenta variáveis tais como o valor de fricção padrão, atrito estático, atrito viscoso, características dos motores presentes nas rodas, entre outras variáveis que são difíceis de definir. Como o alvo de estudo era o comportamento do robô, numa perspectiva de reciprocidade entre a simulação da força aplicada nas barras de empurrar e o auxílio do sistema de motorização, considerou-se que especificar ao mais alto rigor estas variáveis seria desnecessário.

Reiterando, foi possível observar e estudar os movimentos dos modelos simulados, modelos estes que serviram de suporte para uma percepção futura daquilo que seria o protótipo final de um elevador de transferência motorizado.

Após a apresentação e discussão destas simulações com o orientador da empresa *Invacare*, o modelo escolhido foi o primeiro, representado na figura 4.6, devido à flexibilidade de movimentos e por não ser necessário fazer grandes alterações estruturais do produto inicial, constituindo-se basicamente como um *Add-on*.

Capítulo 5

Especificações e Mercado

Todo o tempo investido na simulação culminou num trabalho de investigação e pesquisa que possibilitasse transpor o que foi simulado para um elevador de transferência da *Invacare*. A partir daquilo que foi observado no *SimTwo*, era necessário desenvolver um sistema que detetasse a força exercida pelo utilizador nas barras de empurrar do elevador e um sistema motorizado que auxiliasse a deslocação do mesmo.

Relativamente a este sistema motorizado, foi fundamental perceber qual o tipo de motores a serem escolhidos e as suas características, de forma a satisfazer as necessidades funcionais e estéticas de produto final.

No que diz respeito ao aspeto funcional, foi preciso perceber as especificações dos motores de forma a que sejam capazes de responder perante as elevadas cargas a serem movidas e, a um nível estético, era essencial escolher algo que dimensionalmente não fosse nem desproporcional nem compromettesse a eficiência destes.

Para averiguar estas especificações, vários pormenores tiveram de ser considerados:

1. Diâmetro das rodas;
2. Força máxima;
3. Velocidade Máxima;
4. Utilização de dois motores;

No que concerne ao primeiro ponto, o diâmetro das rodas foi escolhido tendo em consideração as medidas dos rodízios trazeiros presentes nos diversos modelos do *Birdie Evo*. Tal como observado na tabela 2.1, as medidas variam entre valores como *75mm*, *100mm* e *125mm*, consoante o modelo, e portanto foi decidido calcular-se as especificações do motor para rodas com diâmetro de *125mm* e *150mm*.

Para saber o torque necessário na saída, um dos valores vitais a estipular é a força necessária para ultrapassar a fricção inicial. Esta força é calculada da seguinte maneira em que F_f corresponde à força de fricção, μ ao coeficiente de fricção e W_L à massa da carga [23]:

$$F_f = \mu W_L \quad (5.1)$$

Para isto seria necessário realizar testes com o elevador, em diferentes superfícies com dissemelhantes coeficientes de fricção e efetuar um estudo sobre forças aplicadas, o que não foi possível.

Sendo assim, de uma forma mais pragmática recorreu-se à norma mecânica ISO 10535, aplicada a elevadores de transferência de pessoas, para descobrir qual o valor da força máxima estipulada que os utilizadores podem exercer nas pegadas do aparelho. Este valor, 160N, serviu como referência no cálculo do torque.

Ainda referente à mesma norma, outros dados importantes a reter foram as velocidades máximas alusivas a movimentos horizontais motorizados. A velocidade de um movimento horizontal CSP (Ponto de Suspensão Central) não deve exceder os 0.8m/s e a velocidade de um movimento horizontal motorizado de CSP não deve exceder os 0.4m/s.

5.1 Especificações dos motores

As equações fundamentais usadas para o cálculo das características dos motores foram as seguintes [18]:

$$F = ma \quad (5.2)$$

$$T = Fr \quad (5.3)$$

$$v = wr \quad (5.4)$$

$$P = Tw \quad (5.5)$$

$$N = \frac{60v}{\pi d} \approx 10w \quad (5.6)$$

Destas fórmulas sabe-se que F corresponde a 80N na medida em que serão utilizados dois motores, o T é o torque mínimo para satisfazer o requerido, r equivale ao raio do motor, v representa a velocidade linear máxima (0.4m/s segundo a norma ISO 10535) e W a velocidade angular, P a potência do sistema, que pode ser comparada à multiplicação da tensão e corrente especificadas pelo fornecedor do motor, e por último N como uma unidade de velocidade angular em rotações

por minuto. Os resultados obtidos para uma roda com 150mm de diâmetro foram: $T = 6\text{Nm}$, $\omega = 5.33\text{rad/s}$, $P \approx 30\text{W}$, $N = 50\text{RPM}$.

Os motores BLDC, devido às excelentes características termodinâmicas que apresentam, têm a capacidade de gerar um torque elevado mesmo com um tamanho reduzido. São também motores que estão associados a velocidades muito elevadas, nomeadamente 30000RPM ou mais[23].

Para satisfazer as características que foram calculadas, na medida em que o requerido é um torque alto e velocidades baixas, seria necessário introduzir uma caixa redutora de engrenagens. Dentro desta pode-se destacar dois tipos: *Planetary Gearbox* ou *Spur Gearbox*. Fácilmente se pode constatar que a melhor para este sistema seria a *Spur* pelo facto de ser mais compacta, barata e menos ruidosa, apesar de a *Planetary* apresentar mais durabilidade e maior rácio de transmissão (torque consequentemente superior).

5.2 Procura de materiais

Após uma análise definitiva sobre como seria a constituição do modelo final, conclui-se que seriam necessários:

- Dois motores BLDC com as características apresentadas anteriormente;
- Células de carga fixas em cada barra de empurrar. Assim seria possível detetar e medir o tipo de forças aplicadas nestas pegas;
- Amplificadores diferenciais para amplificar o sinal fornecido pelas células de carga;
- Sensor de orientação, úteis para controlar a rotação do eixo sobre a qual os motores irão atuar;
- Placas *Driver* para controlar os motores;
- Um microprocessador capaz de conjugar toda a informação obtida dos diversos componentes do sistema, como por exemplo um arduino;

5.2.1 Motores

Numa fase inicial, a pesquisa envolveu fornecedores diretos da *Invacare* como a *Farnel* e *Digikey*, e outros grandes fornecedores de eletrónica tal como a *RSPortugal* ou *Mouser*.

Relativamente aos motores BLDC, foram encontrados inúmeros modelos com as características desejadas e com caixa redutora já incluída. O problema principal deste tipo de motores que estão disponíveis nestas plataformas, para além de serem relativamente caros, estão maioritariamente destinados a um uso industrial e portanto apresentam dimensões elevadas.

Posteriormente, o objetivo foi encontrar motores do género de *Wheel Hub Motors* como aqueles que são usados em *Scooters* ou em bicicletas elétricas.

Com os resultados desta pesquisa concluiu-se que, para obter este tipo de produto, seria necessário comunicar com certos fabricantes e pedir um produto customizado para se adaptar ao requerido.

De entre os fabricantes com produtos customizados, aquele que se destaca é a:

- **Bafang**: Empresa que interage com a *Invacare*, na medida em que fornece os motores presentes no produto *Alber Smoov One* [14] que consiste numa cadeira de rodas auxiliada pela propulsão destes motores.

Por fim, como alvo de testes e não como produto final decidiu-se comprar uma *hoverboard* e utilizar os motores que se encontravam no seu interior. A vantagem desta compra advém do facto de trazer dois BLDC motores compactos (com especificações muito superiores às calculadas anteriormente e com sensores de *Hall* incluídos) e de já incluir alimentação (bateria de 36V).

5.2.2 Sensores

Relativamente às células de carga, a escolha teve por base as dimensões destas, sensibilidade e capacidade. Dito isto, foram encomendadas quatro através da *DigiKey* [7], células bastante compactas com dimensões $12.7mm \times 12.7mm$ e com capacidade até $5Kg$, sendo que o objetivo é a utilização de duas em cada barra de empurrar de forma a ser possível detetar todo o tipo de forças aplicadas (frontal, lateral e à retaguarda).

Apesar de anteriormente se ter mencionado que a força máxima exercida pelo o utilizador é $160N$, ou seja, $16Kg$, o valor da capacidade da célula de carga não foi escolhido aleatoriamente. Como o objetivo do sistema é auxiliar o utilizador, considerou-se irrelevante saber o valor exato da força que está a ser aplicada a partir de um certo ponto.

Para acompanhar as células de carga, foram também encomendados quatro amplificadores diferenciais *Hx711* [6], dado que cada um amplifica individualmente um sensor de força.

Outro sensor encomendado a partir da *DigiKey* foi o MPU6050 [5], uma placa que contém um sensor de orientação (giroscópio), aceleração (acelerómetro) e a capacidade de processar a fusão sensorial dos dados obtidos por estes sensores. Este aparelho é facilmente implementado e controlado a partir de um Arduino.

5.2.3 Drivers

Grande parte dos *Drivers* de motores *brushless DC* que são utilizados em diversas aplicações, podem ser facilmente encomendados a partir de *sites* como *Ebay* ou *Amazon*, a preços bastante acessíveis mas, reiterando, os prazos de envio são extensos. Sendo assim, encomendou-se *BLDC Shields* da *Infineon* [22] para Arduino, na medida em que este último será o elo de ligação entre todos os componentes comprados. Este *driver* em específico foi desenhado para estar em sintonia com o Arduino Uno, podendo-se empilhar até uma quantidade máxima de quatro.

Apesar de tudo, a escolha feita foi o Arduino Mega para prevenir uma possível falta de memória interna, sabendo que seriam utilizadas diversas bibliotecas dos múltiplos aparelhos deste sistema, ou insuficientes pinos para os conectar.

Ainda relativo ao *driver*, destina-se ao controlo de um motor BLDC de três fases, via SPI, com algoritmo de controlo especificamente redireccionado para sensores *Hall*, com tensão de entrada normalizada de 5 a 28V, potência máxima de saída de 150W e corrente máxima de saída de 10A.

5.3 Conclusão

Relativamente a este capítulo foi destacada a idealização do sistema e salientou-se todas as etapas percorridas desde a planificação até à compra e chegada dos materiais.

Foram abordados os diferentes métodos de investigação e as diferentes opções de escolha que foram surgindo ao longo do desenvolvimento deste documento.

Sabendo que as escolhas tomadas tiveram sempre em mente o aspeto estético, de segurança, ergonómico e monetário de produto final, foram selecionados diversos componentes para constituírem o sistema final e evidenciados os motivos por detrás de cada seleção.

Capítulo 6

Resultados Experimentais

Após a chegada dos materiais procedeu-se à montagem e programação destes. Devido ao facto de o período de chegada dos materiais ter sido mais longo que o esperado, o sistema implementado limitou-se apenas a uma versão simplificada, representada na figura 6.2 daquilo que seria o sistema idealizado. Apesar de tudo, este modelo base desenvolvido permite observar a correlação existente entre o controlo de um motor BLDC e o uso de uma célula de carga, controlo este sensível a diferentes forças aplicadas. Foi também possível testar o funcionamento do sensor de orientação.

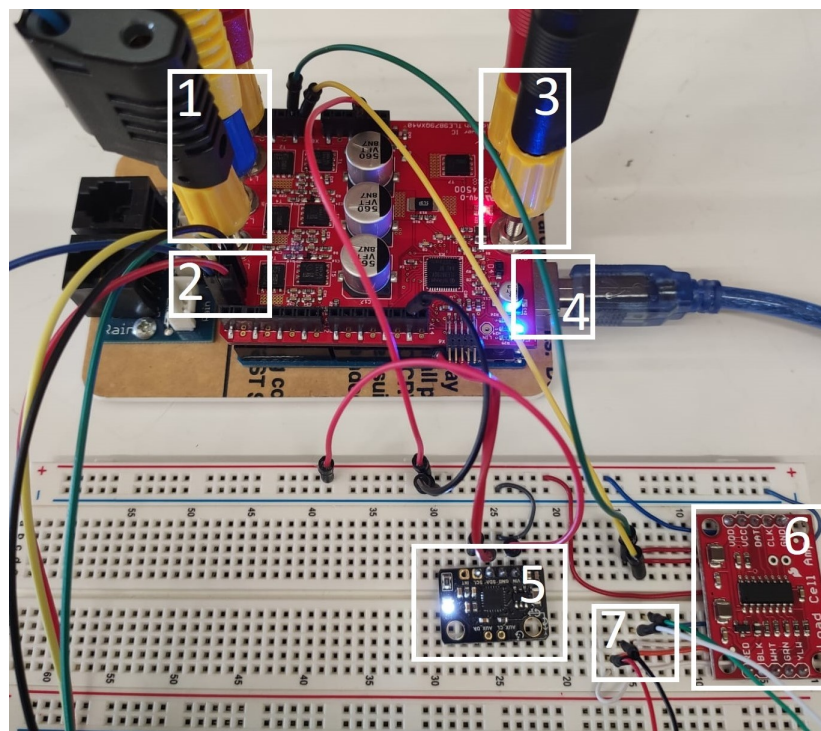


Figura 6.1: Circuito implementado. Legenda: 1-Entrada das fases do motor, 2- Entrada do sensor de *Hall*, 3- Alimentação de 12V a 28V da *Driver* representada a vermelho, 4- Alimentação do Arduino, 5- Sensor de Orientação MPU6050, 6- Amplificador diferencial HX711, 7-Conexão da célula de carga com o HX711

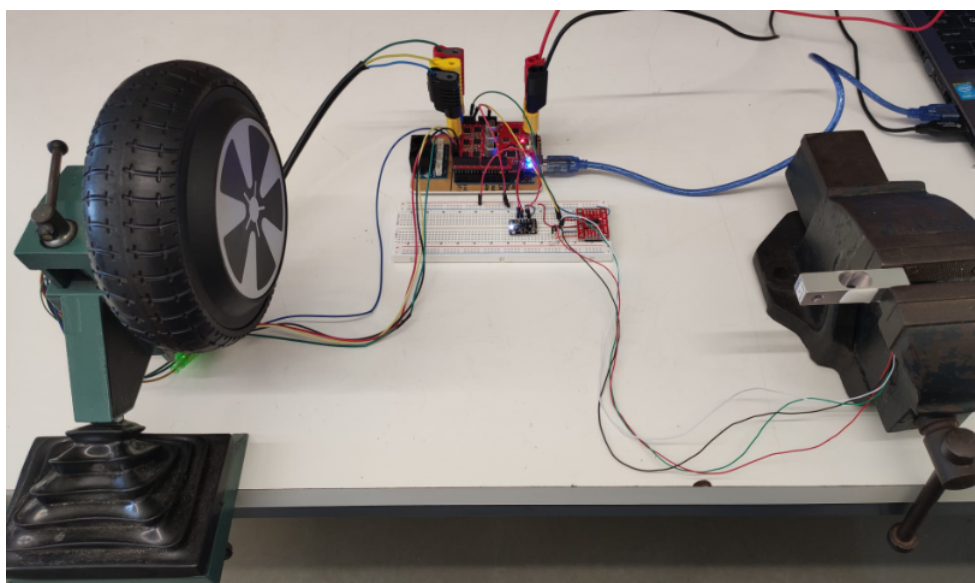


Figura 6.2: Sistema implementado

Tal como explicado anteriormente, o modelo desenvolvido é uma versão simplificada uma vez que idealmente o modelo final seria composto por dois motores e duas *drivers*, um sensor de orientação, quatro células de carga e quatro amplificadores diferenciais associados. Não obstante, fez-se um controlo com apenas um elemento de cada.

Uma adversidade prevista para a implementação no elevador de transferência seria o controlo da rotação do eixo central, na medida em que teria de se restringir a rotação máxima até 360° de forma a não afetar a cablagem envolvida.

Foram também observados diversos sinais relativos a tensões e correntes de fases e também relativos à tensão dos sensores de *Hall*.

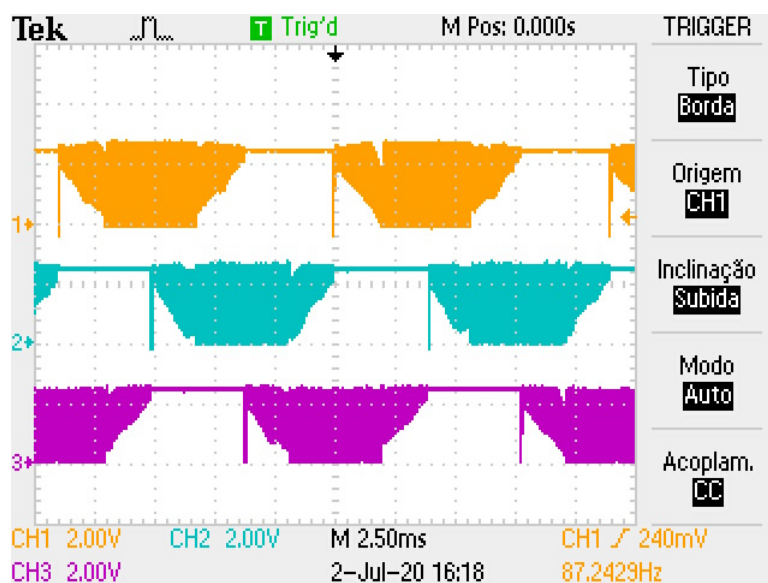


Figura 6.3: Sinal de tensão em cada fase do motor

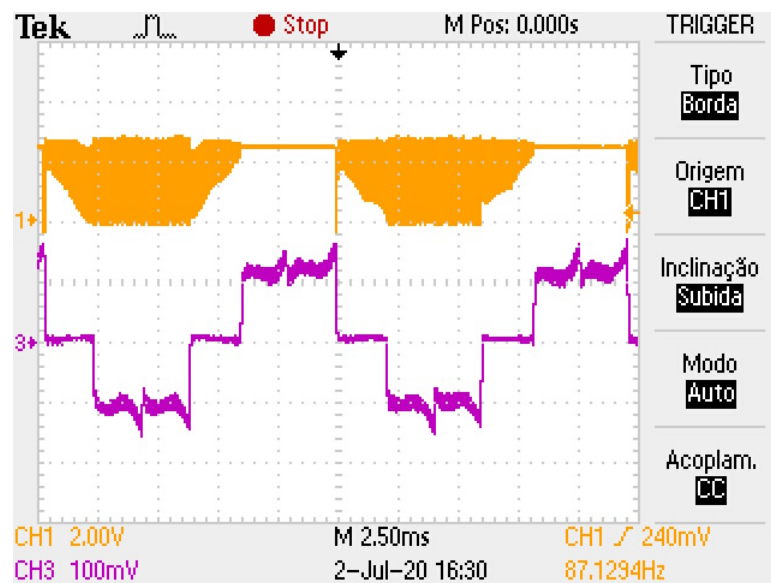


Figura 6.4: Sinal de tensão e corrente da mesma fase

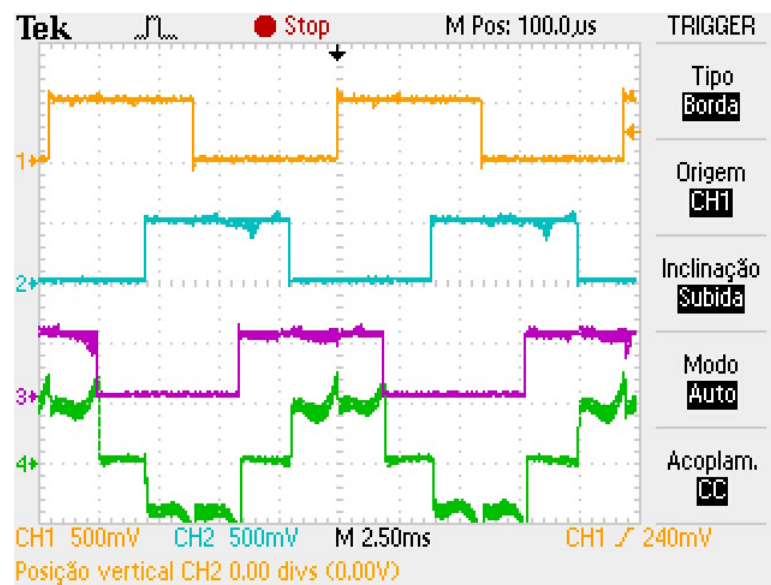


Figura 6.5: Forma de onda relativa à tensão fornecida pelos sensores de *Hall* em cada fase e corrente de fase representada através do *Channel 4*

6.1 Conclusão

Os resultados experimentais obtidos são preliminares, no entanto demonstram o objetivo pretendido. Neste capítulo apresentou-se o sistema implementado, possibilitando a observação dos componentes que o constituem, e realizou-se análises aos sinais de tensão e correntes de fases interessantes, presentes em diferentes terminais do circuito.

Capítulo 7

Conclusões

Este projeto permitiu trabalhar num ambiente empresarial, possibilitando analisar e alterar estética, estrutural e funcionalmente um dos seus produtos. Sem dúvida que houve um aumento de confiança e destreza para resolver assuntos futuros associados a este tema.

Através da pesquisa efetuada foi também possível perceber a preocupação incremental relacionada com a ergonomia no trabalho e o quão importante é procurar conferir estabilidade e conforto aos utilizadores que deslocam cargas elevadas todos os dias. Consequências e problemas que derivam da desvalorização deste tópico são bastante graves e preocupantes.

De destacar também o aumento da capacidade de procura e recolha de informação, agilidade esta que me permitiu aprender mais sobre motores elétricos, nomeadamente os motores de corrente contínua sem escovas, e sensores de força.

Enquanto estudante do ramo de automação, esta dissertação fortaleceu o meu conhecimento numa vertente de simulação, nomeadamente no desenvolvimento de modelos e controlo dos mesmos. Para além de ter sido bastante interessante aprimorar as minhas capacidades nesta área, a simulação constituiu-se como uma fase bastante importante para o progresso e evolução da tese.

Aumentou a competência em transformar algo idealizado em algo real, através da procura de materiais, compra, implementação e testes.

Apesar de o protótipo não ter ficado concluído, o sistema implementado revelou-se um sucesso não só pelo facto de ser bastante funcional, compacto e pragmático, mas por ter sido possível controlar um motor a partir da força aplicada numa célula de carga. Em teoria, o aumento previsto das dimensões do sistema seriam possíveis e o modo de como este ficaria colocado/implementado no produto também.

Concluindo, a solução desenvolvida é possivelmente viável e eficaz na resolução do problema inicial relacionado com a motorização de um elevador de transferência da *Invacare*.

7.1 Trabalhos futuros

Relativamente à fase de simulação desta dissertação, apesar de todo o realismo demonstrado quer ao nível do controlo, quer ao nível dos modelos desenvolvidos, ainda há espaço para melhorias. A solução passaria por analisar ao pormenor cada peça do elevador e anotar todos os aspetos físicos correspondentes, transpondo posteriormente para o modelo simulado, e também procurar definir com rigor todas as variáveis existentes.

Numa perspetiva de finalização deste projeto, seria necessário realizar um trabalho de campo com o elevador de transferência em junção com a solução desenvolvida. Nesta fase, seria preciso desenvolver então um algoritmo de controlo destinado a orientar e mover o elevador tal como o demonstrado na ferramenta de simulação *SimTwo*.

Outra opção interessante, sugestão do orientador da empresa *Invacare*, seria desenvolver as *drivers*, procurando escolher os componentes adequados e posteriormente embutidos numa PCB, de forma a substituírem as *drivers* compradas e maximizarem o potencial dos motores.

Referências

- [1] André Gustavo Conceição, António Moreira, Paulo Costa, Pedro Costa, e Tiago Nascimento. Modeling omnidirectional mobile robots: An approach using simtwo. Em *CONTROL'2012*, 2012.
- [2] Paulo Costa. Simtwo tutorial 1 - getting started, jun 2020.
- [3] Paulo Costa, José Gonçalves, José Lima, e Paulo Malheiros. Simtwo realistic simulator: A tool for the development and validation of robot software. *Theory and Applications of Mathematics & Computer Science*, 1(1):17–33, 2011.
- [4] Paulo Costa e Carlos Pena. A brief tutorial for simtwo realistic micromouse simulator. 2012.
- [5] DFRobot. 6 dof sensor-mpu6050. <https://bit.ly/38viYY9>, jul 2020.
- [6] SparkFun Electronics. Amplificador diferencial. <https://bit.ly/2BzctaW>, jul 2020.
- [7] SparkFun Electronics. Célula de carga. <https://bit.ly/31Oi7kc>, jul 2020.
- [8] SparkFun Electronics. Load cell amplifier hx711 breakout hookup guide. <https://learn.sparkfun.com/>, jun 2020.
- [9] Esense. <https://esense-moves.com/>, jun 2020.
- [10] Esense. How innovation can prevent occupational injury. <https://esense-moves.com/wp-content/uploads/2018/07/whitepaper-esense-ENG.pdf>, jun 2020.
- [11] Arun Garg, Thomas Waters, Jay Kapellusch, e Waldemar Karwowski. Psychophysical basis for maximum pushing and pulling forces: A review and recommendations. Em *International Journal of Industrial Ergonomics*, páginas 281–291, 2014.
- [12] Jacek F Gieras. *Permanent magnet motor technology: design and applications*. CRC press, 2002.
- [13] Karl Hoffmann. *Applying the Wheatstone bridge circuit*. HBM Germany, 1974.
- [14] Invacare. Invacare portugal. <https://www.invacare.pt/pt>, jun 2020.
- [15] Ramu Krishnan. *Electric motor drives: modeling, analysis and control*. Prentice Hall, 2001.
- [16] Ivan Muller, Renato Machado de Brito, Carlos Eduardo Pereira, e Valner Brusamarello. Load cells in force sensing analysis—theory and a novel application. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 13(1):15–19, 2010.
- [17] Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho. <https://osha.europa.eu/en/themes/musculoskeletal-disorders>, jun 2020.

- [18] RobotShop. Drive motor sizing tutorial. <https://www.robotshop.com/>, jun 2020.
- [19] Tiantian Sheng, Xiaolin Wang, Julia Zhang, e Zhiquan Deng. Torque-ripple mitigation for brushless dc machine drive system using one-cycle average torque control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4):2114–2122, 2014.
- [20] Russel Smith. Open dynamics engine. <http://www.ode.org/>, jun 2020.
- [21] Yuechao Sun, Man Li, e Cong Liao. Analysis of wheel hub motor drive application in electric vehicles. Em *MATEC Web of Conferences*, volume 100, página 01004. EDP Sciences, 2017.
- [22] Infineon Technologies. Bldc shield for arduino. <https://bit.ly/2ZDu6y5>, jul 2020.
- [23] Wilfried Voss. *A comprehensible guide to servo motor sizing*. Copperhill Media, 2007.
- [24] Padmaraja Yedamale. Brushless dc (bldc) motor fundamentals. *Microchip Technology Inc*, 20:3–15, 2003.