

**Instituto Superior de Engenharia do Porto**



## **Automatização dum Carrinho de Compras**

**Ricardo Jorge Paiva da Costa**

Dissertação do Projecto realizado no âmbito do Mestrado em Engenharia  
Electrotécnica de Sistemas Eléctricos de Energia

Orientador: Prof. Dr. Nuno Gomes

Outubro de 2011



# Resumo

Olhando para a necessidade de auxiliar o movimento dos carrinhos de compras nas grandes superfícies, surgiu a ideia de desenvolver um sistema de accionamento flexível, que pudesse ser adaptado a diferentes tipos de carrinhos. O sistema deveria ser também de baixo custo e ter potencial de industrialização.

Como em qualquer sistema de accionamento eléctrico foi necessário dimensionar e seleccionar um controlador e um motor, no entanto, dados os requisitos relativos à adaptabilidade do sistema foi necessário um esforço significativo para o desenvolvimento dos componentes mecânicos de tracção e transmissão.

Considerando os requisitos de portabilidade foi também desenvolvido um sistema de alimentação a partir de baterias e feito um estudo preliminar relativo ao sistema de carregamento de baterias a ser instalado nos locais de utilização.

Após a concepção, foi construído um protótipo que depois foi instalado num carrinho de compras.

Os testes realizados demonstraram a viabilidade do sistema, quer pelo auxílio que podem dar aos utilizadores, quer pela flexibilidade e potencial de comercialização.

# Abstract

Looking at the need to assist the movement of shopping carts in supermarkets, appear the idea of developing a flexible drive system, which could be adapted to different types of shopping carts. The system should also be low cost and have potential for industrialization.

As with any electrical drive system was necessary to scale and select a controller and a motor, however, given the requirements for adaptability of the system took a significant effort to the development of mechanical components of traction and transmission.

Considering the requirements of portability was also developed a system of power from batteries and made a preliminary study on the system for charging batteries to be installed at points of use.

After conception, a prototype was built which was later installed in a shopping cart.

The tests demonstrated the feasibility of the system, either by the aid that can give users both the flexibility and marketing potential.

# Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nuno Gomes, pelo projecto proposto e pelo apoio durante a execução deste trabalho.

Um agradecimento especial ao Paulo Brandão por partilhar a sua experiência e conhecimentos.

Aos meus companheiros e amigos de curso, por partilharem comigo os momentos mais tristes e alegres ao longo destes anos no ensino superior.

À minha família que, ao longo destes anos no ensino superior, sempre me apoiou e me deu todas as condições para que tivesse sucesso.

# Índice Geral

RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	IV
AGRADECIMENTOS .....	V
ÍNDICE GERAL .....	VI
ÍNDICE DE TABELAS .....	IX
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS .....	XI
LISTA DE SIMBOLOS .....	XII
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJECTIVO DO TRABALHO .....	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	1
1.3 SISTEMAS COM TRACÇÃO ELÉCTRICA.....	2
1.3.1 SISTEMAS DE TRACÇÃO COM ACCIONAMENTO AUXILIAR ELÉCTRICO .....	2
1.3.1.1 Bicicletas Eléctricas .....	2
1.3.1.2 Cadeira de rodas eléctrica .....	3
1.3.1.3 Carro transporte manual com tracção eléctrica.....	4
2 ARQUITECTURA E PROJECTO DO SISTEMA .....	6
2.1 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO .....	6
2.1.1 Arquitectura do sistema .....	6
2.1.2 Definições gerais deste carro.....	8
2.2 DETERMINAÇÃO E CÁLCULO DAS FORÇAS PRESENTES NO SISTEMA .....	8
2.2.1 Tipo de forças aplicadas no CDC quando este se encontra no plano horizontal.....	8
2.2.2 Tipo de forças aplicadas no CDC quando este se encontra no plano inclinado....	10
2.2.3 Binário necessário para movimentar o CDC .....	11
2.2.4 Constante elástica da mola .....	11
2.2.5 Formulação para dimensionamento das baterias .....	12
2.2.6 Sistema de transmissão.....	13
2.3 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE ALGUNS PARÂMETROS DO SISTEMA DE ACCIONAMENTO.....	14
2.3.1 Velocidade de operação .....	14
2.3.2 Força necessária à operação.....	14
2.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO CDC .....	16
2.4.1 Binário do Motor .....	16
2.4.2 Autonomia das baterias.....	17
2.4.3 Constante elástica da mola .....	18
2.4.4 Velocidade angular do motor .....	18
2.5 ENSAIOS EM LABORATÓRIO DOS MOTORES DE CC ENCONTRADOS.....	19
2.6 CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DAS BATERIAS.....	21
3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA .....	24

3.1 Sistema de controlo .....	24
3.1.1 Caracterização do Controlador.....	24
3.1.2 Esquema de ligação do controlador .....	27
3.1.3 Protecção contra inversão de polaridade .....	28
3.2 Sistema de comando.....	28
3.3 MOTOR.....	28
3.4 SISTEMA DE TRANSMISSÃO .....	29
3.5 SISTEMA DE TRACÇÃO .....	29
3.5.1 Roda.....	29
3.5.2 Mola .....	29
3.5.3 Estrutura em Ferro .....	29
3.6 SISTEMA DE CARREGAMENTO.....	30
3.7 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO.....	32
4 RESULTADOS DOS TESTES DO SISTEMA.....	33
4.1 RESULTADOS FINAIS DO CARRINHO DE COMPRAS .....	33
4.1.1 Autonomia da bateria com funcionamento contínuo.....	34
5 CONCLUSÕES FINAIS .....	35
5.1 CONCLUSÃO .....	35
REFERÊNCIAS.....	36
ANEXOS .....	37
ANEXO I .....	38
ANEXO II .....	40

# Índice de Figuras

Figura 1-1-Bicicleta eléctrica [3] .....	3
Figura 1-2-Cadeira de rodas com sistema de motorização adaptado/ motor DC do tipo série[4] .....	4
Figura 1-3-Carro de tracção para transporte de material na vertical ou na horizontal [6] .....	5
Figura 2- 1-Arquitectura do sistema.....	6
Figura 2- 2-componentes de controlo utilizados no CDC [7] .....	6
Figura 2- 3-Motor de ímanes permanentes [8].....	7
Figura 2- 4- Apresentação dos componentes utilizados no protótipo .....	7
Figura 2- 5-Força aplicada para deslocar o carrinho plano horizontal [10] .....	9
Figura 2- 6-Rampa que se pode encontrar num supermercado .....	10
Figura 2- 7-Carrinho no plano inclinado .....	10
Figura 2- 8-Sistema de tracção do carro no plano Horizontal .....	12
Figura 2- 9-Forças aplicadas na mola quando esta é comprimida.....	12
Figura 2- 10-Compressão da mola.....	18
Figura 3-1-Modelo ‘Pro-120 séries controllers’ [14] .....	24
Figura 3-2-Quatro quadrantes do plano Binário (T) - Velocidade (W) .....	25
Figura 3-3-Conjunto de entradas e saídas controlo do CDC [14] .....	26
Figura 3-4-Modelo ‘ Pro-120 séries controllers’ com marcação [14] .....	26
Figura 3-5-Esquema de ligações do sistema de controlo do CDC [14].....	27
Figura 3-6-Ligação do circuito externo de controlo [14] .....	28
Figura 3-7-Comportamento do carro no inicio de mudanças de declive .....	30
Figura 3-8-Detalhe do mecanismo de rotação do sistema de tracção.....	30
Figura 3-9-Imagem Tomada de Carregamento.....	31
Figura 3-10-Protótipo da fixa móvel de carregamento.....	31
Figura 3-11-Sistema de carregamento das baterias .....	31
Figura 3-12-Bateria de chumbo ácido [15] .....	32
Figura A-1- Motores de CC de íman permanente [8] .....	41
Figura A-2-Esquema do circuito eléctrico de um motor [17] .....	42

# Índice de Tabelas

Tabela 2-1-Velocidade de pessoa a movimentar o CDC.....	14
Tabela 2-2-Valores registados da força necessária para começar a movimentar o CDC (Faprep), e mantê-lo em movimento (Fapmov) para diferentes cargas .....	15
Tabela 2-3-Coeficiente de atrito estático $\mu_e$ e cinético $\mu_c$ . .....	16
Tabela 2-4-Parâmetros essenciais das várias tecnologias de baterias [13].....	23
Tabela 4-1- Comparação entre potência eléctrica real e a dimensionada. ....	33
Tabela A-1-Comparação dos modelos de equipamentos encontrados no mercado actual [5] .	39

# Índice de Gráficos

Gráfico 2-1-Comportamento do atrito [9] .....	8
Gráfico 2-2-Característica de binário .....	20
Gráfico 2-3-Característica da velocidade em função do binário .....	20

# Lista de Abreviaturas

CDC: Carrinho de compras

Fap: Força de atrito do carrinho parado

DC: Corrente continua

Ca: Corrente alternada

i.e: isto é

f.c.e.m: Força contra electromotriz

f.c.e.m.i: Força contra electromotriz do induzido

VRLA : Bateria selada (valve regulated lead acid batteries)

# Lista de Símbolos

- $F$  → força aplicada
- $m$  → massa da roda
- $a$  → aceleração
- $P_{\text{elect}}$  → potência eléctrica do motor
- $F_{\text{apli}}$  → força necessária a aplicar no CDC para este se deslocar no plano inclinado
- $F_{\text{aprep}}$  → força necessária para começar a movimentar o CDC
- $F_{\text{apmov}}$  → força necessária para mantê-lo em movimento para diferentes cargas
- $V_M$  → velocidade média de uma pessoa
- $\Delta s(m)$  → distância percorrida
- $\Delta t(s)$  → tempo que demora a percorrer a distância
- $F_e$  → força elástica da mola
- $W_n$  → velocidade angular
- $F_a$  → força de atrito
- $P$  → peso do CDC que actua sobre a roda
- $\theta$  → ângulo de inclinação
- $F_{\text{mol}}$  → força elástica exercida sobre a mola
- $\mu_e$  → coeficiente de atrito estático
- $\mu_c$  → coeficiente de atrito cinético
- $\mu$  → coeficiente de atrito estático e cinético
- $X_i$  → comprimento no estado normal
- $X_f$  → comprimento no estado comprimido
- $K$  → constante elástica da mola
- $\Delta x$  → deformação da mola
- $P_{\text{mot}}$  → potência do motor
- $g$  → peso gravitacional
- $T_r$  → binário resistente
- $r$  → raio da roda
- $T_m$  → binário do motor
- $J_T$  → momento de inércia
- $\dot{\omega}$  → aceleração angular
- $J_{\text{rodas}}$  → momento de inércia das rodas
- $J_{\text{massa}}$  → momento de inércia da massa
- $J_{\text{motor}}$  → momento de inércia do motor
- $C$  → Capacidade da bateria
- $F_{ae}$  → força de atrito estático
- $F_{ac}$  → força de atrito cinético
- $R_N$  → reacção normal
- $Co$  → cateto oposto

- Ca → cateto adjacente
- E → energia que as baterias necessitam para alimentar o motor
- t → tempo de funcionamento
- $\rho$  → análise da condutibilidade
- R → resistência admissível
- L → comprimento do cabo
- S → secção
- $I_n$  → corrente nominal

# 1 Introdução

O aumento da competitividade das empresas de distribuição e de retalho tem levado a uma constante procura de mecanismos para atrair clientes. Para além das fortes campanhas de marketing, tem sido feito um grande esforço no sentido de melhorar as condições do cliente no momento da compra. Esta preocupação é acrescida nas pessoas com maior dificuldade de locomoção, nomeadamente na acção de empurrar o carrinho de compras (CDC) que progressivamente adquire mais peso.

Foi a pensar nesses clientes que se estudou a forma de desenvolver um sistema de accionamento para auxiliar o movimento de um CDC.

O sistema a desenvolver, deverá ser flexível de forma a adaptar-se a mais do que um tipo de carrinho de forma a ser economicamente viável.

Para o seu desenvolvimento optou-se por um sistema com tracção eléctrica, alimentado por baterias, de comando simples, para que qualquer pessoa possa usufruir desse mesmo sistema sem necessidade de adquirir conhecimentos para poder controlar o CDC.

O sistema a desenvolver, para os vários tipos de CDC, deve ser de baixo custo e ter boa autonomia de modo a poder aguentar várias utilizações sem que as baterias necessitem de carga.

## 1.1 Objectivo do Trabalho

O objectivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um sistema de accionamento eléctrico de auxílio ao movimento de um CDC.

A alimentação do sistema deve ser feita a partir de baterias recarregáveis. O sistema deve ser simples de forma a poder ser usado pelo público em geral.

O custo do sistema deve ser baixo para permitir a produção em massa.

## 1.2 Organização da Tese

Esta tese divide-se em cinco capítulos.

No primeiro capítulo, são definidos os objectivos do trabalho sendo apresentado o projecto em termos gerais e feita uma pequena abordagem aos sistemas de tracção eléctrica existentes no mercado. No segundo capítulo, são expostos os cálculos que permitiram escolher os componentes adequados para este projecto. Em alguns casos foram efectuados ensaios no terreno de modo a obter dados para o dimensionamento e selecção de componentes. Neste capítulo são apresentados os resultados desses ensaios. No terceiro capítulo, são apresentados todos os componentes usados no sistema de accionamento. No

quarto capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios ao teste do sistema e o processo de carga das baterias. No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões finais e os trabalhos que no futuro poderão enriquecer/melhorar o projecto.

## **1.3 Sistemas com tracção eléctrica**

### **1.3.1 Sistemas de tracção com accionamento auxiliar eléctrico**

Nesta secção são apresentados alguns exemplos de sistemas que tradicionalmente eram accionados por pessoas mas que, actualmente, já dispõe de versões com accionamento eléctrico.

#### **1.3.1.1 Bicicletas Eléctricas**

De todos os veículos de tracção as bicicletas são provavelmente o veículo mais popular ou seja, que desperta mais interesse do público em geral. Estas têm uma grande aceitação em países que estão em desenvolvimento, como por exemplo a China, onde um largo número de pessoas a utilizam.

A utilização de bicicletas eléctricas poderá ter um grande impacto na sociedade actual. Entre outras coisas, permitem a redução do consumo de CO<sub>2</sub>, tornando as cidades menos poluídas e melhorando a qualidade de vida.

Como se verifica na figura 1-1 as bicicletas eléctricas são semelhantes às bicicletas convencionais, utilizando apenas um motor eléctrico que auxilia o utilizador.

A autonomia destes veículos situa-se entre os 20km e os 50 km. A autonomia está relacionada com as características da bicicleta e o modo de utilização [1].

O sistema de accionamento para bicicletas é normalmente constituído por um motor eléctrico, baterias e respectivo carregador, acelerador e o conversor de potência. O motor eléctrico mais utilizado é de corrente contínua e pode ser do tipo Brushed (com escovas) ou Brushless (sem escovas).

As características dos motores mencionados anteriormente, determinam o desempenho, a manutenção necessária e as características do sistema de controlo necessários. A potência dos motores utilizada situa-se entre os 250W a 400W [2].

As baterias normalmente usadas neste tipo de veículos são de chumbo-ácido ou iões de lítio. Enquanto as baterias de chumbo ácido apresentam um menor custo de aquisição e menor complexidade no processo de gestão de carga, as baterias de iões de lítio apresentam uma maior densidade de energia, o que permite uma maior autonomia para o mesmo peso.

As bicicletas eléctricas, utilizam tensões normalmente baixas, na ordem dos 20 a 40V, e baterias com capacidade na ordem dos 300W/h [2].

Nas subidas as baterias fornecem energia eléctrica ao motor que a converte em energia mecânica. Nas descidas a energia mecânica pode ser recuperada pela máquina eléctrica que funciona como gerador.

As baterias são carregadas usando um sistema de gestão que controla a corrente de carga, de acordo com o nível de carga que vai monitorizando. Quando as baterias estão carregadas o sistema termina o processo de carga evitando a sobrecarga das mesmas. Desta forma prolonga-se o tempo de vida útil das baterias.

O acelerador aplicado é, normalmente, do tipo “Twist” (acelerador de punho) semelhante a um acelerador de motociclos. O utilizador pode optar por accionar o motor eléctrico ou imprimir a sua própria força de modo a poder deslocar-se. Esta é sem dúvida uma das vantagens que estes veículos têm.

O objectivo das bicicletas eléctricas é essencialmente de auxílio ao utilizador, principalmente em percursos com inclinação. Este tipo de veículos é ideal para executar curtos trajectos em centros urbanos.



Figura 1-1-Bicicleta eléctrica [3]

### 1.3.1.2 Cadeira de rodas eléctrica

Com a evolução tecnológica têm surgido, com maior frequência, sistemas para auxiliar a locomoção de pessoas de mobilidade reduzida.

Hoje em dia uma cadeira de rodas eléctrica é um equipamento dispendioso e que não está ao alcance de qualquer pessoa. Foi a pensar nas pessoas com poucos recursos económicos que se desenvolveu um sistema de tracção eléctrica adaptável a uma cadeira de rodas manual, como se pode ver na figura 1-2 [4]. O sistema é formado por um motor eléctrico ligado a duas pequenas rodas que é alimentado por baterias recarregáveis. O conjunto é accionado via controle remoto [4].

Conforme dados apresentados na tabela A-1 do anexo I, foi realizado um estudo com vários testes, de modo a ver qual o sistema de tracção a aplicar numa cadeira que fosse o mais viável, tanto tecnicamente como economicamente. A escolha recaiu sobre o sistema apresentado na figura 1-2. Este pode não ser o mais económico mas apresenta valores de ensaio bastante aceitáveis para uma aplicação e que não ficam atrás de um sistema motorizado.

A velocidade máxima que este sistema atinge é de 6,4km/h, tendo incorporado um motor do tipo série com potência de 220W, e alimentado por duas baterias de gel com tensão de 12v e capacidade de 17Ah. O sistema tem autonomia para 9,6km e o peso total do equipamento é de 12,7kg. O sistema de transmissão entre a roda adicional implementada e o motor é realizado a correias dentadas, no entanto, no motor DC já vem implementado um sistema redutor de velocidade, conforme se pode ver na figura 1-2.



Figura 1-2-Cadeira de rodas com sistema de motorização adaptado/ motor DC do tipo série[4]

### **1.3.1.3 Carro transporte manual com tracção eléctrica**

Na figura 1-3 é possível visualizar um carro de transporte de multi-aplicações para armazéns, escritórios ou oficinas.

Este é constituído por um motor eléctrico, um sistema de controlo, baterias e um acelerador. O controlador terá como função controlar a velocidade do carro.

O carro de tracção para transporte utiliza duas baterias de chumbo ácido estanques (VRLA) de 12V cada, sendo ligadas em série de modo a poder alimentar o motor que trabalha a 24 V [5].

O operador ao accionar o acelerador vai fornecer informação ao controlador sobre a aceleração que pretende para atingir a velocidade necessária.

Este carro veio facilitar o trabalho dos funcionários dos armazéns e tem como principal função transportar cargas pesadas de um local para o outro. A grande vantagem deste veículo é a capacidade de operar com ou sem tracção eléctrica. Este sistema permite transportar cargas consideráveis.



Figura 1-3-Carro de tracção para transporte de material na vertical ou na horizontal [6]

# 2 Arquitectura e Projecto do Sistema

## 2.1 Apresentação do Sistema Desenvolvido

Neste capítulo são apresentados os subsistemas que compõem o sistema de accionamento a aplicar no CDC. Para além da apresentação dos componentes é exposta a justificação para as escolhas efectuadas.

### 2.1.1 Arquitectura do sistema

A arquitectura do CDC está dividida em 7 sistemas como se pode ver na figura 2.1. Os sistemas são: comando, controlo, motor, transmissão, tracção, alimentação e carregamento.

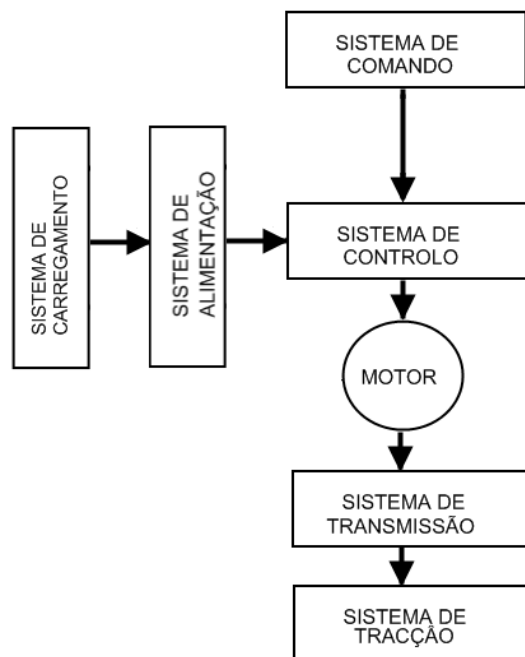
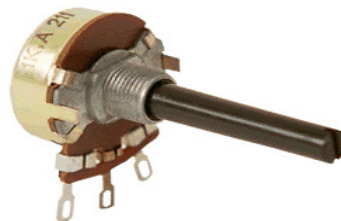


Figura 2- 1-Arquitectura do sistema

O Sistema de comando é constituído por um potenciómetro e dois interruptores responsáveis pela interface com o utilizador. Este sistema permite o controlo da velocidade e/ou arranque/paragem. Estes componentes estão expostos em baixo na figura 2-2.



INTERRUPTOR



POTENCIÓMETRO

Figura 2- 2-componentes de controlo utilizados no CDC [7]

O Sistema de controlo é composto por um controlador de velocidade que recolhe os sinais enviados pelo sistema de comando e ajusta a tensão de alimentação do motor de forma adequada.

O motor de ímanes permanentes (figura 2-3) responde à saída do controlador variando a velocidade e o binário. O Motor apresenta um papel importante em todo o sistema, já que é responsável pela transformação de energia eléctrica em energia mecânica para a deslocação do CDC.



Figura 2- 3-Motor de ímanes permanentes [8]

O sistema de transmissão, como o nome indica, é responsável pela transmissão do binário e velocidade à roda de tracção do CDC.

O sistema de tracção é constituído pela estrutura de suporte da roda, pela roda e pela mola.

O Sistema de alimentação é composto pelas baterias e é responsável por fornecer energia eléctrica ao sistema.

Por último, o sistema de carregamento vai fornecer a energia às baterias.

Na figura 2-4 encontra-se a localização no CDC de cada um dos sistemas.



Figura 2- 4-Apresentação dos componentes utilizados no protótipo

## 2.1.2 Definições gerais deste carro

O sistema de tracção do CDC deverá ser capaz de transportar um peso máximo de 29Kg, deslocando-se normalmente em piso liso com pouca inclinação.

A duração das baterias, em média, deverá ser suficiente para permitir várias utilizações do mesmo, sem necessidade de recarga. O ideal seria o CDC ter uma autonomia de 3 a 4h.

O sistema de carregamento necessita deverá ser de fácil acesso e simples para os utilizadores.

## 2.2 Determinação e cálculo das forças presentes no sistema

### 2.2.1 Tipo de forças aplicadas no CDC quando este se encontra no plano horizontal

Sempre que o utilizador pretender deslocar o CDC sobre o chão do supermercado, aplica uma força horizontal  $F$  de intensidade crescente até o carro(CDC) se deslocar. A força de atrito é sempre igual e contrária, qualquer que seja a intensidade de  $F$ . No entanto, a partir de um certo valor de  $F$  (movimento eminente) a força de atrito já não a consegue igualar. O CDC começa a deslocar-se.

A força de atrito continua a existir, com valor menor que o seu máximo (na situação de movimento eminente) que é aproximadamente constante, dificultando o seu movimento. No entanto, se a partir do início do movimento a força não variar este torna-se uniforme. O comportamento de atrito pode-se visualizar no gráfico 2-1.

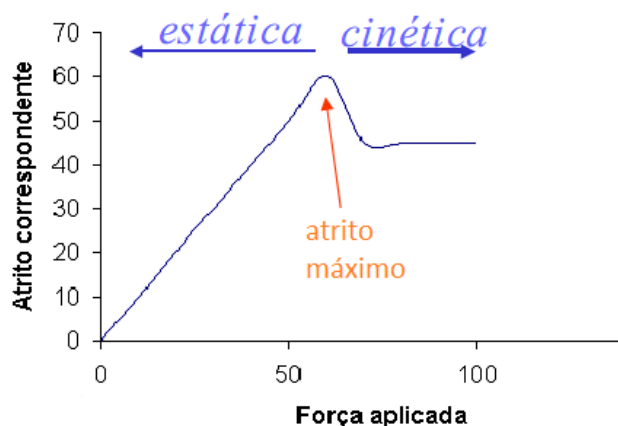


Gráfico 2-1-Comportamento do atrito [9]

Empiricamente verifica-se que, a força de atrito estática máxima e a força de atrito cinética são ambas proporcionais à força normal ( $R_n$ ) na superfície de contacto. Os coeficientes de proporcionalidade ( $\mu_e$  e  $\mu_c$ , respectivamente) dependem das características dos materiais em contacto.

O  $\mu_e$  e  $\mu_c$  são constantes adimensionais determinadas experimentalmente, assim temos:

$$F_{ae} \leq \mu_e \times R_n \quad (2.1)$$

$$F_{ac} = \mu_c \times R_n \quad (2.2)$$

É compreensível que o atrito seja proporcional à força normal: quanto maior for  $R_n$  mais comprimidas estão as irregularidades das superfícies.

Para dimensionar o sistema inserido no CDC será necessário encontrar as forças que nele actuam. A determinação dessas forças irá ajudar à escolha do motor eléctrico, que deverá ser capaz de ajudar o utilizador a movimentar do CDC, sem necessidade de ser empurrado, bastando apenas accionar o botão de comando e controlar o carrinho de modo a que este siga o trajecto pretendido.

Para determinar a força necessária para o utilizador deslocar o CDC, serão representadas as forças da natureza presentes no carrinho quando este está na eminência de se deslocar, conforme se pode ver na figura 2-5.



Figura 2- 5-Força aplicada para deslocar o carrinho plano horizontal [10]

Enquanto não houver movimento verifica-se que a força aplicada pelo utilizador é descrita pela equação seguinte:

$$\vec{F} + \vec{F}_{ae} = 0 \quad (2.3)$$

No qual  $\vec{F}$  é a força aplicada e  $\vec{F}_{ae}$  é a força de atrito estática.

Quando a força de atrito estático atinge o valor máximo, que se pode visualizar no gráfico 2-1, o corpo fica na eminência de movimento, assim temos:

$$F_{ae} = \mu_e \times R_n (N) \quad (2.4)$$

Onde  $\mu_e$  é coeficiente de atrito estático e  $R_n$  força normal na superfície de contacto.

Quando o CDC entra em movimento a força atrito cinético é dado pela seguinte expressão:

$$F_{ac} = \mu_c \times R_n (N) \quad (2.5)$$

Onde  $\mu_c$  é coeficiente de atrito cinético e  $F_{ac}$  força atrito cinética.

A força de atrito aerodinâmico neste caso específico é desprezada, dada a baixa velocidade que o carro se desloca e suas características físicas. Considera-se o deslocamento num plano não inclinado.

## 2.2.2 Tipo de forças aplicadas no CDC quando este se encontra no plano inclinado

Para este projecto é fundamental saber quais as forças que actuam no plano inclinado, isto porque o CDC poderá encontrar rampas nos supermercados que não têm uma inclinação muito acentuada mas que aumenta de certa forma, a força necessária a aplicar ao CDC.

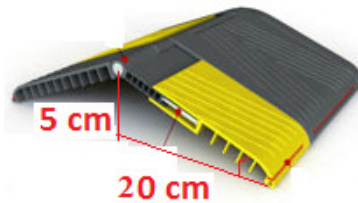


Figura 2- 6-Rampa que se pode encontrar num supermercado

Segundo a análise efectuada nos hipermercados, as rampas não ultrapassam a inclinação que é apresentada na figura 2-6, sendo esta a máxima inclinação que se pode encontrar neste tipo de rampas.

Para determinar o declive recorreremos a uma expressão trigonométrica que se apresenta em baixo:

$$\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \quad (2.6)$$

Na figura 2-7 é representado um CDC de massa  $m$ , que se desloca a uma velocidade  $v$ , a subir uma dada inclinação com ângulo  $\alpha$ , sendo necessário que a força de tracção seja capaz de ultrapassar o CDC, i.e, que esta força seja superior à força de atrito da roda em contacto com o chão. Para tal é necessário calcular a força aplicada necessária para deslocar o CDC neste mesmo plano de inclinação.

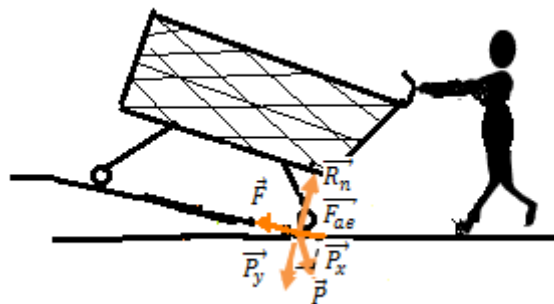


Figura 2- 7-Carrinho no plano inclinado

Logo, a força referida anteriormente é calculada a partir da expressão seguinte:

$$F_{apl} = P \times \sin \alpha + \mu \times P \times \cos \alpha \quad (N) \quad (2.7)$$

Onde  $F_{apl}$  é a força aplicada,  $P$  é o Peso bruto do sistema,  $\mu$  é coeficiente de atrito estático, ou cinético e  $\alpha$  é o ângulo de inclinação.

### 2.2.3 Binário necessário para movimentar o CDC

Neste ponto vamos determinar o binário necessário para deslocar o carrinho, esta característica é especialmente importante porque vai ajudar a escolher e a determinar a potência do motor DC que satisfaça o exigido.

De seguida, apresentam-se algumas expressões necessárias para se determinar a potência do motor a aplicar no projecto, assim temos:

$$T_r = F_{apl} \times r \text{ (N.m)} \quad (2.8)$$

Onde  $T_r$  é o binário resistente expresso em Newton metro (N.m),  $F_{apl}$  é a força aplicada expressa em Newton (N) e  $r$  é o raio que vem expresso em metros.

A potência necessária para auxiliar a movimentação do CDC, resulta no cálculo do binário do motor, na qual se demonstra na expressão abaixo:

$$T_m = \left[ J_T \times \left( \frac{d\omega}{dt} \right) \right] + T_r \text{ (N.m)} \quad (2.9)$$

Onde  $T_m$  representa o binário do motor,  $J_T$  caracteriza o momento de inércia,  $\dot{\omega}$  aceleração angular e  $T_r$  representa o binário resistente.

O momento de inércia das rodas é expresso através da seguinte fórmula:

$$J_{rodas} = \frac{1}{2} \times m \times r^2 \text{ (kg.m}^2\text{)} \quad (2.10)$$

Onde  $m$  é a massa da roda (kg) e  $r$  é o raio da roda (m).

Sendo o momento de inércia da massa do carrinho expresso pela fórmula abaixo indicada:

$$J_{massa} = m \times r^2 \text{ (kg.m}^2\text{)} \quad (2.11)$$

Assim, juntando o momento da inércia da massa, do motor e das rodas obtemos o momento de inércia total expresso da seguinte forma:

$$J_T = J_{massa} + J_{rodas} + J_{motor} \text{ (kg.m}^2\text{)} \quad (2.12)$$

### 2.2.4 Constante elástica da mola

Para que o CDC tenha tracção eléctrica na roda situada a meio do mesmo, será necessário colocar uma mola comprimida ao ponto de poder responder da melhor forma às irregularidades que se podem encontrar no terreno. A força da mola aplicada na roda permite que esta esteja sempre em contacto com o piso para que a roda ao girar não deslize no chão.

Como se pode verificar na figura 2-8, no plano horizontal temos a força elástica da mola ( $F_e$ ), a velocidade angular ( $W_n$ ), a força de atrito ( $F_a$ ), a reacção normal ( $R_n$ ) e o peso do CDC que actua sobre a roda ( $P$ ).

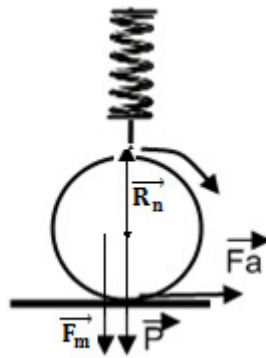


Figura 2- 8-Sistema de tração do carro no plano Horizontal

Para determinar o valor da constante elástica da mola é necessário saber quais as forças que actuam na roda de tração.

$$R_N = P + F_{mol} (N) \quad (2.13)$$

Onde ( $F_{mol}$ ) é a força elástica exercida sobre a roda e  $P$  é o peso do CDC que actua sobre a roda.

A constante elástica da mola é dada pela seguinte expressão:

$$k = \frac{F_{mol}}{\Delta x} (N/m) \quad (2.14)$$

Sendo  $K$  a constante elástica da mola e  $\Delta x$  é a deformação da mola.

A figura 2-9 representa o sistema de forças aplicadas na mola e que irão ser mencionadas na secção referente ao cálculo da constante da mola.

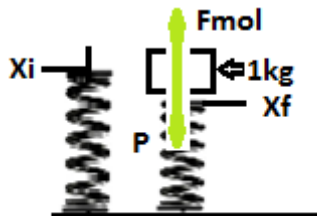


Figura 2- 9-Forças aplicadas na mola quando esta é comprimida

Se um corpo está em equilíbrio, a soma das forças aplicadas nele serão nulas.

$$F_{mol} - P = 0 \quad (2.15)$$

Assim, forças com sentidos opostos anulam-se, logo a força imposta pela mola irá ser igual ao peso do objecto nela aplicado.

## 2.2.5 Formulação para dimensionamento das baterias

As baterias a utilizar neste projecto serão responsáveis pela autonomia do CDC. Este deve ter autonomia suficiente para aguentar algumas horas de funcionamento contínuo.

Para escolher as baterias será necessário determinar a energia necessária para alimentar o motor e, posteriormente, saber a capacidade necessária para que o sistema a aplicar no CDC seja técnico/economicamente viável.

A potência que o motor necessita para transportar o CDC é dada pela seguinte expressão:

$$P_{mot} = T_m \times \omega \quad (W) \quad (2.16)$$

Sendo  $P_{mot}$  a potência que o motor necessita para poder deslocar o CDC,  $\omega$  é a velocidade angular e  $T_m$  binário do motor.

A energia é determinada aplicando a seguinte expressão:

$$E = P_{mot} \times t \quad (W.h) \quad (2.17)$$

Onde  $E$  é a energia das baterias necessária para alimentar o motor e  $t$  é o tempo de funcionamento do mesmo quanto trabalha continuamente.

A capacidade a determinar vai ajudar a estabelecer o número de baterias que serão necessárias a aplicar neste projecto.

O consumo do motor é calculado através da seguinte expressão:

$$P_{elect} = U_n \times I_n \quad (W) \quad (2.18)$$

Sendo a capacidade calculada através da seguinte expressão:

$$C = I_n \times t \quad (A.h) \quad (2.19)$$

Onde  $C$  é a capacidade que a bateria necessita de ter para o CDC funcionar o maior tempo possível sem necessidade de carregar as mesmas.

## 2.2.6 Sistema de transmissão

O sistema de transmissão é responsável pela ligação mecânica entre o motor e a roda que permite variar o binário e a velocidade fornecidas à mesma. Este tem por objectivo reduzir a velocidade linear imposta pelo motor e aumentar o binário disponível e vice-versa.

No mercado existem vários tipos de sistemas de transmissão que se poderiam utilizar neste projecto, no entanto, irão ser abordados dois onde irá incidir a escolha. Os sistemas referidos são:

- Sistema que utilizam correias;
- Sistema de rodas dentadas.

O sistema de transmissão que utiliza correias de transmissão normalmente só necessita de duas rodas onde uma delas é de menor dimensão e uma de maior dimensão. A roda de pequena dimensão é acoplada ao veio do motor e a de maior dimensão aplicada à roda ou rodas de tracção, de modo a diminuir a velocidade do motor e aumentar o binário.

As rodas dentadas são elementos rígidos utilizados na transmissão de movimentos rotativos entre eixos. Como são elementos rígidos a transmissão deve atender a algumas características especiais, na qual, a principal característica é que não exista qualquer diferença de velocidades entre pontos que estão em contacto.

Um sistema de transmissão feito através de rodas dentadas é realizado por duas ou mais rodas, todas elas interligadas entre si por dentes. Geralmente quando se utiliza este tipo de

sistema verifica-se que o tamanho das rodas varia. Normalmente a roda menor é aplicada ao veio do motor e a maior aplicada ao eixo das rodas responsáveis pela tracção do motor eléctrico ao chão.

No entanto, para este projecto vai-se utilizar o sistema de transmissão utilizando rodas dentadas, isto porque este já vem acoplado ao motor que foi escolhido para este trabalho que será abordado na secção 2.3.

## 2.3 Determinação experimental de alguns parâmetros do sistema de accionamento

### 2.3.1 Velocidade de operação

Nesta secção será determinada, experimentalmente, a velocidade a que normalmente um utilizador empurra um CDC. Esta velocidade pode ser obtida medindo o tempo ( $\Delta t$ ) que o utilizador demora a percorrer uma determinada distância ( $\Delta s$ ). Depois de realizar vários ensaios foi possível achar a velocidade média ( $V_M$ ) que uma pessoa, normalmente, demora a percorrer uma determinada distância num supermercado quando empurra um CDC.

A tabela 2-1 mostra os resultados do ensaio com um CDC sem carga. Com base nos dados da tabela é possível calcular a velocidade média de uma pessoa  $V_M = 1,04 \text{ m/s}$  como sendo o valor mais desfavorável.

Amostra	$\Delta s$	$\Delta t$	$v_M$
1	4,8	4,65	1,03
2	4,8	4,96	0,97
3	4,8	4,94	0,97
4	4,8	4,93	0,97
5	4,8	4,75	1,01
6	4,8	4,61	1,04

Tabela 2-1-Velocidade de pessoa a movimentar o CDC

### 2.3.2 Força necessária à operação

O CDC foi pesado em vazio e verificou-se que o mesmo tinha 30kg de peso. Para o ensaio realizado fez-se a experiência de se colocar quilogramas de produtos no CDC e medir, através de um dinamómetro, a força necessária a aplicar para vencer o atrito existente entre as rodas do mesmo e o piso existente no supermercado, os valores medidos são apresentados na tabela 2.2.

Neste ensaio mediu-se, com ajuda de um dinamómetro, a força necessária aplicar para o CDC entrar em movimento (Faprep). Posteriormente, com o CDC em movimento verificou-se a força necessária para o mesmo continuar em movimento (Fapmov).

$P_{comp}$ (Kg)	Faprep (N)	Fapmov (N)
vazio	12	4,5
2	14	6
4	16	7,5
6	18,5	8
8	22	8,5
10	23,3	9
13	25,2	9,3
15	26,3	9,9
17	27,3	10
19	28,5	10,3
21	28,7	10,5
23	28,9	10,7
25	29,5	11
27	29,9	11,3
29	30	11,7

Tabela 2-2-Valores registados da força necessária para começar a movimentar o CDC (Faprep), e mantê-lo em movimento (Fapmov) para diferentes cargas

Onde  $P_{comp}$  é o peso das compras colocadas no CDC.

De acordo com os dados mencionados na tabela 2-2, pode-se verificar que à medida que o CDC vai tendo mais carga será necessário aplicar uma maior força, de modo a que este possa ultrapassar a inércia.

Através dos valores das forças registados apresentados na tabela 2-2, para os vários pesos, irão ser apresentados, na tabela 2-3, os valores dos coeficientes de atrito calculados a partir destes resultados. Os valores de coeficiente de atrito estático e cinético foram determinados a partir das expressões 2.1 e 2.2.

	$\mu_e$	$\mu_c$
	0,04082	0,01531
	0,04464	0,01913
	0,04802	0,02251
	0,05244	0,02268
	0,05908	0,02282
	0,05944	0,02296
	0,05980	0,02207
	0,05964	0,02245
	0,05927	0,02171
	0,05935	0,02145
	0,05742	0,02101
	0,05564	0,02060
	0,05473	0,02041
	0,05353	0,02023
	0,05189	0,02024
<b>Média</b>	<b>0,05438</b>	<b>0,02104</b>

Tabela 2-3-Coeficiente de atrito estático  $\mu_e$  e cinético  $\mu_c$ .

Na tabela 2-3 verifica-se, nos valores determinados, uma diferença acentuada entre coeficientes de atrito estático e cinético em termos nominais, tal como se esperava.

## 2.4 Dimensionamento do Sistema de Alimentação do CDC

Os cálculos expostos de seguida terão como objectivo apresentar valores que permitam escolher os componentes adequados ao CDC para que seja automatizado, isto é, sem necessidade do utilizador aplicar a sua força, para o deslocar necessitando apenas de controlar o CDC, como já foi abordado anteriormente.

### 2.4.1 Binário do Motor

Para determinar o binário do motor capaz de deslocar o CDC tem que se saber qual a força necessária a aplicar, por parte do utilizador, quando este empurra o CDC partindo do repouso.

Para saber a força aplicada é necessário conhecer qual o coeficiente de atrito existente nos rolamentos do CDC. De acordo com a expressão 2.1 e 2.2, calcularam-se os valores do coeficiente de atrito estático e cinético apresentados na tabela 2-3 para vários kg de compras colocadas dentro do CDC, no entanto, para o caso em estudo interessam apenas os valores médios  $\mu_e = 0,05438$  e  $\mu_c = 0,02104$ .

No caso em estudo será determinada a força a aplicar para uma carga máxima de 29kg. Sabe-se que, à partida, o CDC não transporta continuamente este peso podendo o mesmo variar consoante a aplicação de mais ou menos carga. No entanto, fica-se com uma percepção

do binário necessário para escolher um motor que permita ter binário suficiente para deslocar o CDC ao longo do supermercado.

A força a aplicar será superior no plano inclinado e, como o objectivo é determinar essa força na situação mais desfavorável, optou-se por encontrar uma lombagem que, normalmente, está colocada nos parques de estacionamento. Contudo, é necessário encontrar o seu ângulo de inclinação.

Assim, através da expressão 2.6 calculou-se um ângulo de inclinação da rampa de  $14^\circ$ , com base nas medições realizadas, podendo ser vista na figura 2-6.

A força necessária aplicar no CDC, para que este se desloque no plano inclinado, no momento em que parte do repouso, quando tem um peso de compras de 29kg é de  $F_{apl} = 167,82N$ , esta força foi calculada através da expressão 2.7.

Contudo, é essencial determinar o binário necessário para ser possível movimentar o CDC através de tracção eléctrica e o binário resistente, determinado através da expressão 2.8. Também é necessário calcular o momento de inércia total apresentada na expressão 2.12 onde são somadas todas as inércias consideradas (ver expressões 2.10 e 2.11). O valor do binário calculado segundo a expressão 2.9 é de  $T_m = 18,12N.m$

## 2.4.2 Autonomia das baterias

Para saber a capacidade das baterias necessárias a aplicar neste projecto é preciso saber a capacidade das mesmas, de modo a que tenham autonomia suficiente para suportar algumas horas de funcionamento contínuo.

Através da expressão 2.16 sabe-se a potência do motor necessária para deslocar o CDC no pior cenário, ou seja, com bastante carga e numa rampa inclinada.

Considerando que o rendimento do sistema ronda os 60% o valor da potência necessária é aproximadamente de 279,7W.

Estipulando que a autonomia das baterias a aplicar no CDC seja, aproximadamente, de 3h em funcionamento de contínuo é possível saber a energia necessária para o tempo de funcionamento. Através da expressão 2.17, determina-se que o valor da energia para o tempo de funcionamento estipulado é de 839,09Wh. Sabendo que a tensão das baterias é de 12V, e com base nos dados retirados dos ensaios e pela expressão 2.18, determina-se que a corrente de funcionamento é 23,308A.

A capacidade das baterias e a escolha das mesmas só é possível depois de se ter determinado o consumo do motor. Tendo por base esse consumo e sabendo o tempo que o CDC deve trabalhar em contínuo, obteve-se através da expressão 2.19 que a capacidade das baterias de 69,92Ah.

### 2.4.3 Constante elástica da mola

A mola que se utilizou neste projecto era uma mola de uma sucata e como tal, não tinha informação técnica sobre a mesma. Assim, foi necessário determinar o valor da constante elástica da mesma onde se sabe, à partida, que quanto maior for o seu valor mais dura é a mola, ou seja, tem uma oscilação pouco acentuada.

Para tal, foi necessário colocar a mola na posição vertical e medir o seu comprimento no seu estado normal ( $X_i$ ). De seguida, colocou-se um peso de 1kg, conforme é exemplificado na figura 2-10, e medido novamente o comprimento da mesma ( $X_f$ ), visto que, esta comprimiu com a força imprimida pelo objecto colocado em cima dela.

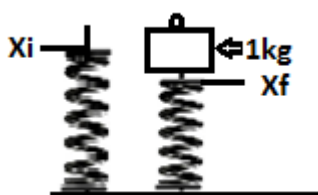


Figura 2- 10-Compressão da mola

Através da expressão 2.15 sabe-se o valor da força exercida sobre a mola, e da expressão 2.14 tem-se o valor da constante elástica da mesma como sendo de  $k = 245\text{N/m}$ .

De acordo com a expressão 2.13, vamos saber qual a compressão que a mola necessita para que a roda de tracção, a aplicar no CDC, esteja sempre em contacto com o chão e corresponda da melhor forma às irregularidades que possa encontrar ao longo do percurso.

### 2.4.4 Velocidade angular do motor

O motor é um dos componentes mais importantes deste projecto, pois será ele o responsável pela deslocação do CDC. Desta forma, fez-se uma análise de um conjunto de motores já utilizados no mercado em grande escala, tendo em conta os pontos seguintes:

- Funcionamento nos Quatro Quadrantes;
- Baixo Custo;
- Funcionamento contínuo mesmo a baixas rotações;
- Elevado Binário de Arranque e a velocidades Baixas;
- Facilidade de operação;
- Facilidade no Controlo de Velocidade.

Normalmente o motor não se encontra preparado para ser acoplado directamente a uma roda, quer porque a velocidade é excessiva, quer porque o binário que fornece não é suficiente.

A aquisição de um motor com as características ideais teria um custo um pouco elevado, como tal, optou-se por procurar motores usados noutras aplicações e que se adaptassem ao projecto que se está a desenvolver.

## **2.5 Ensaios em laboratório dos motores de CC encontrados**

Para este trabalho optou-se por escolher um motor de corrente contínua de ímanes permanentes, que tivesse binário suficiente para deslocar o CDC a uma velocidade que permitisse ao utilizador o seu controlo.

Assim, testaram-se dois motores com diferentes aplicações, o motor de um limpa-para-brisas e um motor dum carrinho de criança com sistema de transmissão acoplado. Os motores encontrados eram os dois de ímanes permanentes. Efectuados alguns testes eliminou-se o motor do limpa-para-brisas por este não ser adequado à aplicação. De facto o motor do limpa para brisas aquece demasiado mesmo sem carga. Logo, este não é o mais adequado para o funcionamento em contínuo.

Perante os inconvenientes apresentados pelo motor do limpa para brisas optou-se pelo motor do carrinho de criança. O estudo a realizar com o motor do carrinho de criança, enquadram-se na estrutura clássica utilizada no estudo de motores no laboratório de máquinas eléctricas.

Foram realizados um conjunto de ensaios ao motor de forma a determinar as suas características. Com os ensaios em carga determinou-se as características, electromecânica e mecânica. Estas características demonstram a relação entre a velocidade, o binário desenvolvido e a corrente aplicada ao motor.

O motor a ensaiar já tem incorporado um sistema de transmissão de rodas dentadas, e como tal, os valores registados e apresentados no gráfico 2-2, e gráfico 2-3 vêm afectados por essa condição.

O ensaio realizado em carga ao motor acoplado ao sistema de transmissão tem como objectivo manter o CDC a andar a uma velocidade praticamente constante, seja qual for a carga que leve. Para responder à variação da carga, será necessário variar o binário produzido pelo motor de modo a poder manter a velocidade.

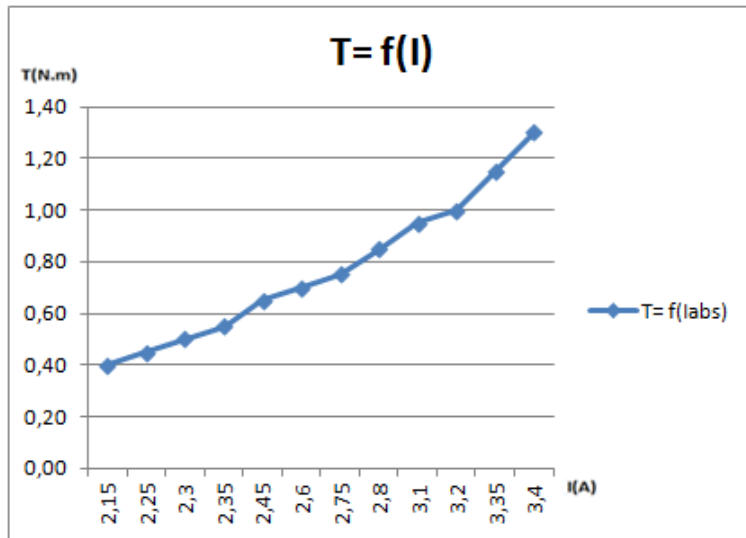


Gráfico 2-2- Característica de binário

A variação do Binário é directamente proporcional à variação da corrente injectada, conforme se pode ver no gráfico 2-2, como tal o controlador regula a corrente injectada no motor, para manter o equilíbrio entre os binários carga e motor, que permita manter a velocidade [11].

Os valores do binário apresentados no gráfico 2-2, são binários produzidos pelo motor acoplado ao sistema de transmissão que estão unidos ao eixo de uma roda cujo raio é de 10cm.

A força produzida para o movimento do CDC será igual ao binário produzido pelo motor a dividir pelo raio da roda.

De seguida, apresenta-se graficamente a característica mecânica onde é expressa a velocidade do motor em função do binário  $n=f(T)$ , tendo-se retirado estes valores do ensaio já mencionado anteriormente.

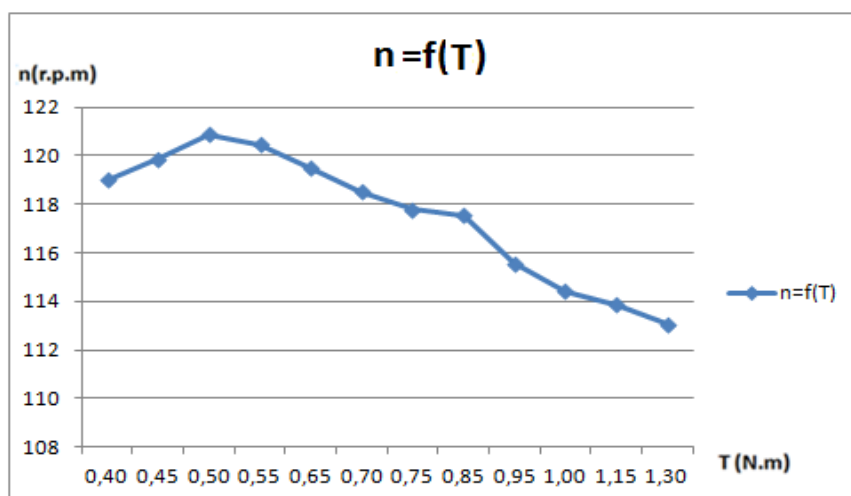


Gráfico 2-3- Característica da velocidade em função do binário

De acordo com a os valores do ensaio realizado ao motor e representados no gráfico 2-3, verifica-se que com o aumento do binário solicitado existe uma pequena diminuição da velocidade.

Para além do ensaio ao motor em carga foi realizado o ensaio em vazio, tendo-se determinado a característica eléctrica. Esta demonstra a relação entre a tensão e a corrente aplicadas ao motor. A escolha deste motor baseou-se em dois factores:

- Factor económico (por questões de orçamento);

- Factor físico (através das características apresentadas, verificou-se que este motor se enquadrava nos requisitos físicos solicitados pelo CDC).

O ensaio realizado ao motor permite concluir que este satisfaz as necessidades desejadas que era ter um binário capaz de movimentar o CDC a uma velocidade reduzida.

## **2.6 Capacidade de armazenamento das baterias**

No mercado existem vários tipos de baterias que nos podem dar garantias, i.e, sejam capazes de armazenar energia suficiente para aguentar algumas horas a trabalhar em contínuo sem necessidade de serem carregadas.

Neste trabalho vou apresentar alguns tipos de baterias que se podem encontrar facilmente no mercado.

A escolha do tipo de bateria a utilizar neste trabalho vai recair essencialmente em dois factores importantes, que são: o seu custo de aquisição e a quantidade de energia que a mesma consegue armazenar.

No mercado podem-se encontrar alguns tipos de baterias: chumbo-ácido, níquel-cádmio, hidretos-metálicos e iões de lítio.

As baterias de chumbo-ácido foram desenvolvidas no século XIX, tendo sido as primeiras a serem comercializadas no mercado. A bateria de chumbo-ácido é uma bateria selada. Este tipo de baterias podem ser encontradas em UPS, pequenas unidades de iluminação de emergência, cadeiras de rodas eléctricas, triciclos eléctricos, etc.

Elas tem como vantagens o seu custo relativamente baixo, se compararmos com os outros tipos de baterias, elas resistem a grandes variações de temperatura, e também não estão sujeitas ao efeito memória [12]. Tem como desvantagem ser uma bateria pesada, demorando bastante tempo a ser carregada. No entanto, quando fornece energia descarrega-se rapidamente, sofre uma diminuição pequena de voltagem durante a sua utilização e tem um número de ciclos carga/descarga baixo.

As baterias de níquel-cádmio apareceram no mercado em meados do século XX e são baterias que, normalmente, se podem encontrar em telemóveis, telefones portáteis, equipamentos médicos, câmeras de vídeo, etc. Este tipo de baterias tem períodos de carregamento bastante curtos. Uma grande fatia dos equipamentos portáteis utilizados no mercado utiliza este tipo de baterias [12].

Elas tem como vantagem ser rápidas a carregar-se e possuem uma resistência interna baixa o que permite que não percam muita energia ao longo do tempo. Possui um número elevado de ciclos de carga e descarga, sendo que se for utilizada adequadamente pode atingir os 1000 ciclos de carga e descarga [12]. Este tipo de baterias é extremamente poluente e tem a desvantagem adicional de trazer o chamado efeito memória. No efeito memória, muitas vezes, acontece que ao fim de algum tempo as baterias não carregam por completo, logo, o tempo que podem ser utilizadas diminui.

As baterias de hidretos-metálicos são baterias que, actualmente, estão a substituir as baterias de níquel-cadmio devido a questões ambientais. Inicialmente este tipo de baterias eram mais caras que as baterias de níquel-cadmio. No entanto, com o aumento da produção das baterias de hidretos-metálicos o custo de produção destas diminuiu e actualmente pode-se dizer que apresentam preços equivalentes. Em comparação com as baterias de níquel-cadmio, as baterias de hidretos-metálicos apresentam uma maior densidade de energia. Este tipo de baterias não é tão poluente como as de níquel-cadmio.

Apresenta uma vida útil reduzida, 200 a 300 ciclos de carga e descarga, se comparadas com outro tipo de baterias [12]. O processo de carga é mais complexo, porque estas baterias geram mais calor durante o processo de carga. Actualmente as baterias de íões de lítio estão aplicadas em vários equipamentos portáteis.

A vantagem deste tipo de baterias é que o seu processo de descarga pode ser lento quando esta é armazenada e carregada (10% ao mês). Actualmente no mercado é a bateria que apresenta melhor densidade de energia mas tem a desvantagem ter um custo elevado (ver tabela 2-4).

Para uma melhor compreensão dos dados referenciados na tabela seguinte é necessário saber as características mais importantes de uma bateria, sendo para tal necessário reter o seguinte:

- Energia específica (Wh/kg) - total de energia que a bateria pode fornecer por unidade de massa, para uma taxa de descarga;
- Densidade de energia (Wh/l) - total de energia que a bateria pode fornecer por unidade de volume para uma determinada taxa de descarga;
- Potência específica (W/kg) - total de potência que uma bateria pode fornecer por unidade de massa, para uma taxa de descarga;
- Ciclo de vida (nº de recargas) - número de vezes que a bateria pode estar descarregada e carregada durante a sua vida útil.

	Energia específica (Wh/kg)	Densidade Energia (Wh/L)	Potência Específica (W/kg)	Nº Ciclos
Bat. Chumbo - ácido (VRLA)	30 - 45	60 - 90	200 - 300	400 - 600
Bat. Níquel - Cádmio (Ni-Cd)	40 - 60	80 - 110	150 - 350	600 - 1200
Bat. Hidretos Metálicos (Ni-MH)	60 - 70	130 - 170	150 - 300	600 - 1200
Bat. Iões de Lítio (Li-Ion)	90 - 130	140 - 200	250 - 450	800 - 1200

Tabela 2-4-Parâmetros essenciais das várias tecnologias de baterias [13]

Analisando a tabela anterior, verifica-se que as baterias de chumbo-ácido são as que apresentam menor densidade de energia. Em contrapartida as baterias de lítio apresentam a maior densidade de energia. Para uma bateria com as mesmas dimensões e peso, a bateria de lítio apresenta uma maior disponibilidade de energia, o que se reflecte na autonomia dos equipamentos portáteis. No entanto, a bateria de chumbo-ácido terá um menor custo comparativamente à bateria de lítio.

Apesar das baterias de lítio apresentarem as melhores características técnicas para o CDC, optou-se por escolher baterias de chumbo-ácido. Esta escolha teve em atenção às restrições orçamentais e o facto do CDC ser um protótipo.

# 3 Implementação do Sistema

## 3.1 Sistema de controlo

O sistema de controlo é constituído por um controlador de velocidade, este encontra-se junto às baterias e está interligado com os sistemas de comando, de alimentação e motor.

No sentido de responder às necessidades deste sistema procurou-se um controlador que respeite os seguintes critérios:

- O controlador deve ser compatível com o motor a controlar;
- O sistema de comando deve ser simples e de fácil adaptação ao projecto;
- Ser capaz de inverter sentido de rotação do motor;
- Dar resposta suave a grandes variações de velocidade em intervalos de tempo curtos;
- Custo reduzido.

Considerando os requisitos anteriores optou-se pelo controlador 'Pro-120 séries controllers da empresa 4QD' [14] por questões económicas e, também, porque respondia às necessidades deste projecto.

### 3.1.1 Caracterização do Controlador

Na figura 3-1 é apresentada uma imagem do controlador com a definição de todas as entradas e saídas do mesmo.

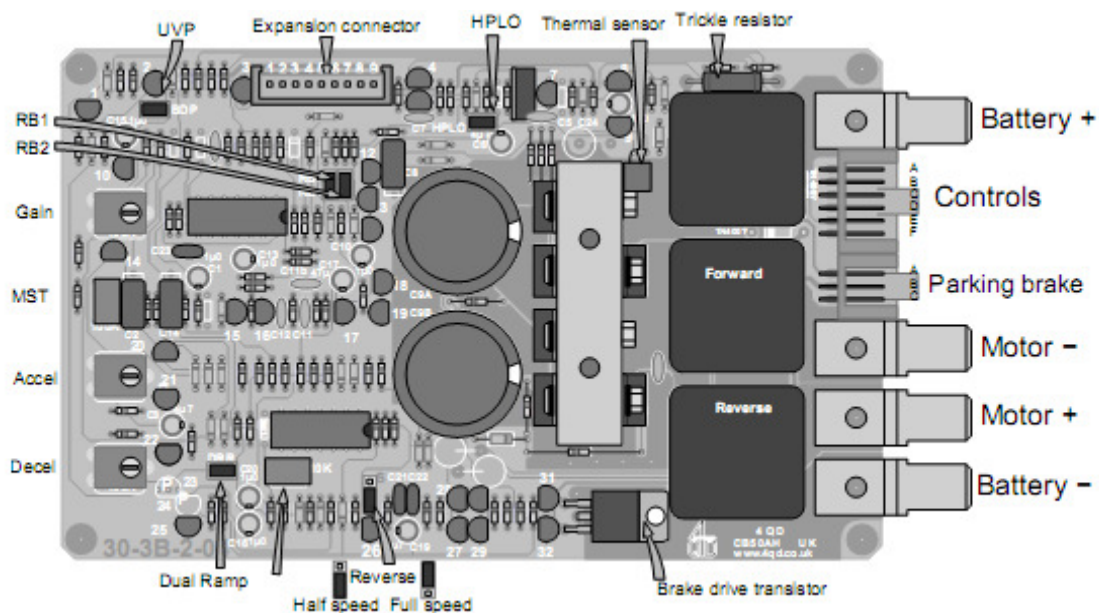


Figura 3-1-Modelo 'Pro-120 séries controllers' [14]

A definição de Entradas e Saídas do Controlador são as seguintes:

- BATTERY +: Terminal para ligação do pólo positivo da Bateria;
- BATTERY -: Terminal para ligação do pólo negativo da Bateria;

- CONTROLS: Terminal para ligação do Sistema de Comando;
- PARKING BRAKE: Desliga automaticamente o controlador no caso de falha ou corrente elevada;
- MOTOR +: Terminal para ligação do pólo Positivo do Motor;
- MOTOR -: Terminal para ligação do pólo Negativo do Motor;
- REVERSE: Definição do modo de funcionamento alta ou baixa velocidade;
- DUAL RAMP: Funcionamento em modo;
- DECEL: Ajuste da suavidade da desaceleração;
- ACCEL: Ajuste da suavidade da Aceleração;
- GAIN: Ajuste da resposta do controlador aos sinais do sistema de comando.

O controlador permite o controlo do motor nos quatro quadrantes dando assim múltiplas possibilidades de funcionamento, tais como, trabalho motor no sentido directo e inverso e frenagem também nos dois sentidos. No primeiro e terceiro quadrantes é realizado trabalho motor, no segundo e quarto quadrantes o controlador fornece energia às baterias porque o motor entra em frenagem (ver figura 3-2).

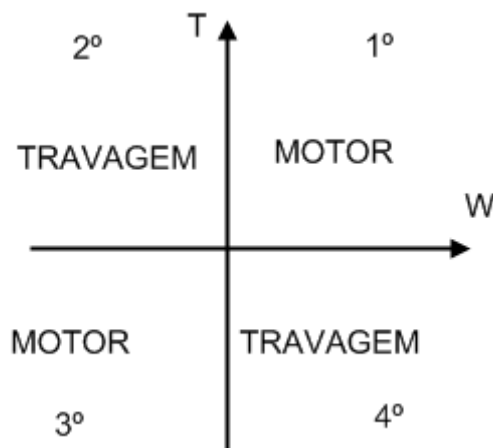


Figura 3-2-Quatro quadrantes do plano Binário (T) - Velocidade (W)

Para se obter a resposta nos quatro quadrantes o controlador dispõe de um conjunto de entradas para o seu controlo (CONTROLS). As entradas são ligadas através de um conector, tal como apresenta a figura 3-3.

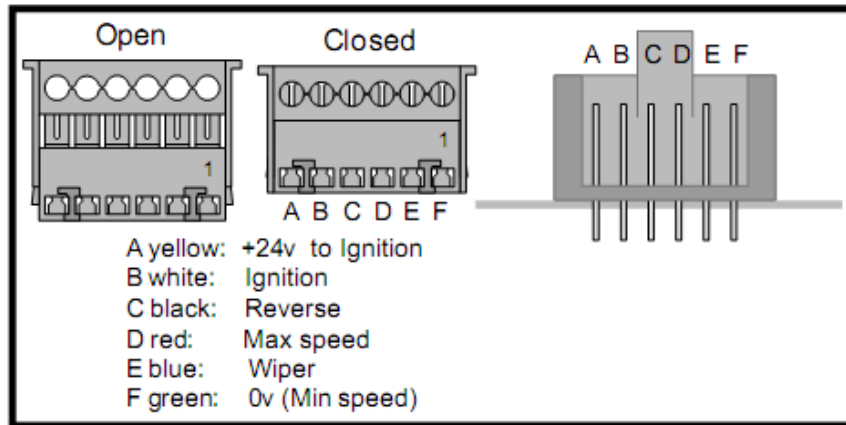


Figura 3-3-Conjunto de entradas e saídas controlo do CDC [14]

Este conjunto de entradas faz o ajuste da velocidade, da ignição e inversão do sentido de rotação.

Também não menos importante é a capacidade de inversão do sentido de rotação automática “Dual Rampa”. Com uma pequena configuração ‘remoção de um jumper na placa’, de acordo com a figura seguinte assinalado a vermelho, quando se inverte a velocidade do motor o controlador desacelera automaticamente até zero e acelera novamente, controlando a rampa de aceleração.

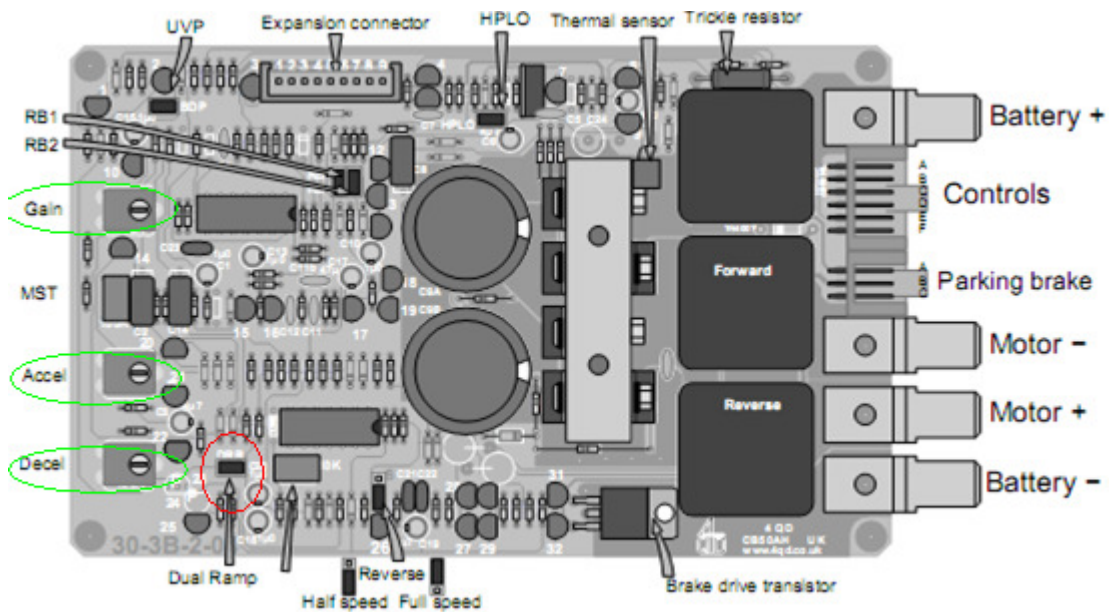


Figura 3-4-Modelo ‘ Pro-120 séries controllers’ com marcação [14]

A inversão do sentido de rotação pode ser feita a qualquer momento. Contudo, poderá ser mais ou menos rápida dependendo da configuração ajuste de ‘Gain’, ‘Accel’, ‘Decel’ (ver figura 3-4) assinalado a verde.

### 3.1.2 Esquema de ligação do controlador

Uma vez que não foi possível encontrar no mercado uma bateria com a capacidade pretendida optou-se por ligar duas de capacidade mais baixa e em paralelo. A ligação de duas baterias em paralelo com a mesma capacidade, duplica a energia disponível e o nível de tensão de saída permanece igual ao contrário de uma ligação em série. Assim, entende-se por capacidade de uma bateria a corrente fornecida por unidade de tempo.

Na Figura 3-5 são apresentadas as ligações entre os diferentes sistemas eléctricos e o controlador.

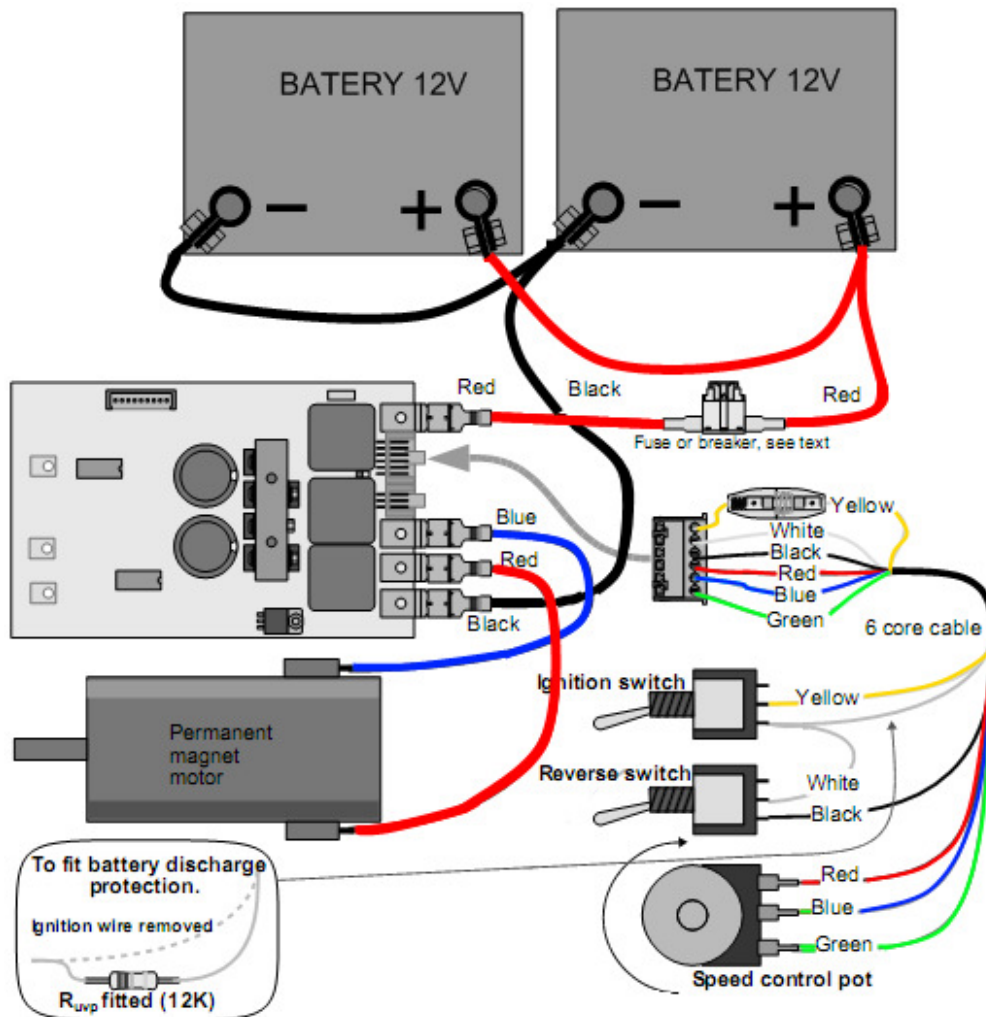


Figura 3-5-Esquema de ligações do sistema de controlo do CDC [14]

As ligações de potência foram feitas com bons conectores e cabos de secção 6mm para reduzirmos ao máximo a resistência da transmissão de energia da bateria para o motor. Para o cálculo da secção entraram os seguintes factores:

- Tipo de condutor (Cobre) análise da condutibilidade ( $\rho$ )
- Resistência admissível (mais baixa possível) (R)
- Comprimento do cabo (L)
- Secção (S)

$$R = \frac{1}{\rho} * \frac{L}{s} \quad (3.1)$$

### 3.1.3 Protecção contra inversão de polaridade

O controlador possui protecção contra inversão de polaridade e permite também definir rampas de aceleração e desaceleração. Este pode ser alimentado numa gama de 12V a 48V, no entanto, neste caso foi escolhida a alimentação de 12V que é a tensão aconselhável para o motor.

## 3.2 Sistema de comando

Na figura 3-6 é apresentada de uma forma detalhada as ligações para o circuito externo de comando. Como podemos ver na figura 3-6, a imagem é constituída essencialmente por um potenciómetro e dois interruptores. O potenciómetro permite ao utilizador controlar a velocidade do motor. Os interruptores, de forma independente, permitem ao utilizador executar a função de START/STOP e inversão de sentido de rotação.

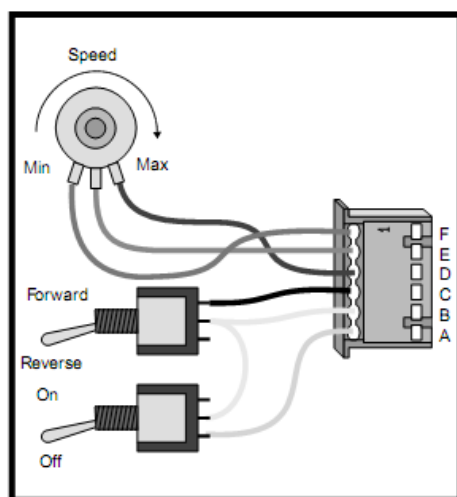


Figura 3-6-Ligação do circuito externo de controlo [14]

Quando se inverte o sentido de rotação o motor tem uma resposta, de acordo com a configuração do potenciómetro (DECEL) decrescendo a velocidade até zero, voltando depois a aumentar até o valor absoluto da velocidade ser próximo do valor antes da inversão. A resposta do motor na aceleração será agora de acordo com a configuração do potenciómetro (ACEL).

## 3.3 Motor

Através dos ensaios apresentados na secção 2.5 verifica-se que o motor satisfaz o pretendido, ou seja, responde às necessidades do utilizador. Os valores medidos vão de

encontro com os resultados esperados, isto é, o valor do binário calculado no ponto 2.4.1 vai ao encontro dos valores medidos no ensaio ao motor.

O motor mencionado anteriormente é de ímanes permanentes, este corresponde as necessidades exigidas pelo CDC, ou seja, tem binário suficiente para se deslocar num supermercado com pequenas rampas de inclinação.

### **3.4 Sistema de Transmissão**

O sistema de transmissão referido para este protótipo já vem acoplado ao motor seleccionado.

Este sistema permite ao motor reduzir a sua velocidade e aumentar a força de tracção à roda onde ele esta acoplado.

### **3.5 Sistema de Tracção**

O sistema de tracção é composto pela roda, pela mola e por uma estrutura em ferro que suporta a roda.

#### **3.5.1 Roda**

A roda utilizada no CDC é constituída por uma liga em borracha para garantir uma maior suavidade no contacto com o solo, ou seja, vai amortecer possíveis defeitos do piso e garantir um elevado coeficiente de atrito essencial para a tracção do veículo. Está localizada no centro do CDC, para facilitar a condução e também para suportar uma maior quantidade de peso, dada a proximidade do centro de massa do CDC.

#### **3.5.2 Mola**

Neste projecto, pretendia-se uma mola que tivesse força suficiente para pressionar a roda que vai ser responsável pela tracção do CDC e que fizesse com que esta estivesse sempre em contacto com o chão.

Quando se encontrou a mola houve a preocupação de a ensaiar para determinar as suas características físicas e verificar se eram adequadas às necessidades do CDC.

A mola que mais se adequa no CDC é do tipo helicoidal.

#### **3.5.3 Estrutura em Ferro**

A estrutura em ferro foi pensada para garantir à roda um grau de liberdade. Esta necessidade surge porque no ambiente de circulação do carro podem existir algumas elevações causadas por tapetes rolantes ou irregularidades no piso. Como se pode ver na figura 3-7, se a roda não tivesse nenhum grau de liberdade, no caso de aparecerem

elevações, era difícil garantir a força que a mola exerce na roda e consequentemente da roda no solo, uma vez que esta até poderia ficar suspensa no ar.

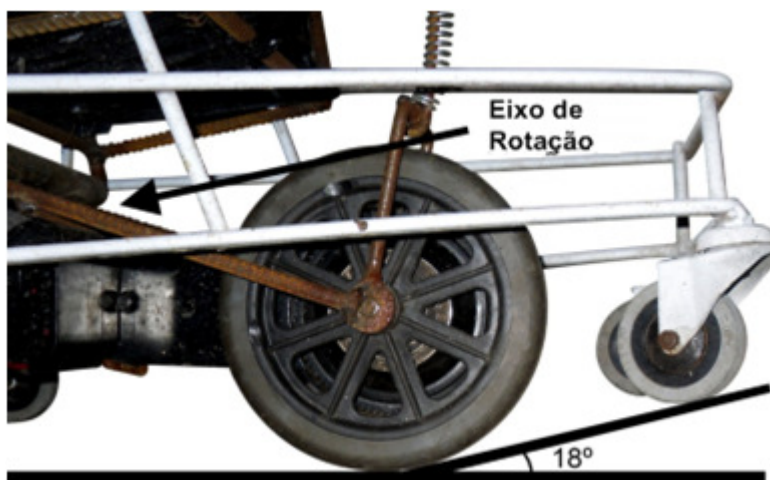


Figura 3-7-Comportamento do carro no início de mudanças de declive

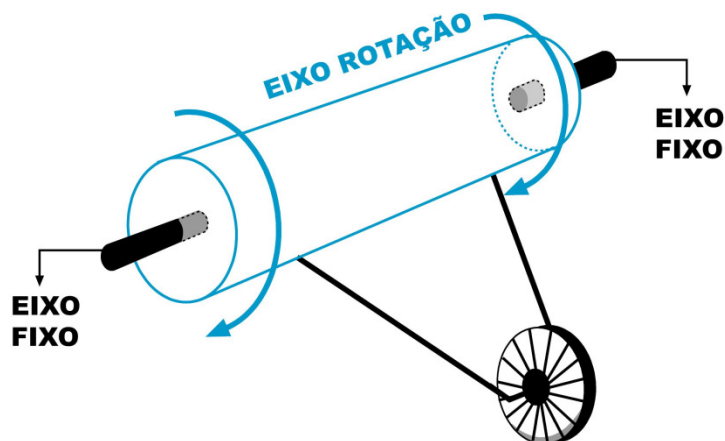


Figura 3-8-Detalhe do mecanismo de rotação do sistema de tracção

Sendo assim pensou-se numa estrutura capaz de rodar sobre dois suportes fixos, acompanhando oscilações e variações do declive da roda, para que esta permaneça sempre em contacto com o solo (figura 3-8).

### 3.6 Sistema de Carregamento

O sistema de carregamento é fundamental para o carregamento da bateria depois da utilização do CDC. Este deve ser instalado num local estratégico do parque para uma maior comodidade do cliente e dos proprietários dos hipermercados. Sempre que um utilizador necessitar de um carro, dirige-se ao local de arrumação dos CDC(s), insere uma moeda na tomada de carregamento e retira o CDC pretendido. Após as compras, o utilizador volta a deslocar-se ao local de arrumação do CDC, onde insere a ficha de carregamento e consequentemente a moeda salta fora.

Nada disto funciona se o carro não for estacionado convenientemente. Para tal pensou-se numa tomada de carregamento que faz a retenção de uma moeda, como já existe hoje em alguns hipermercados.

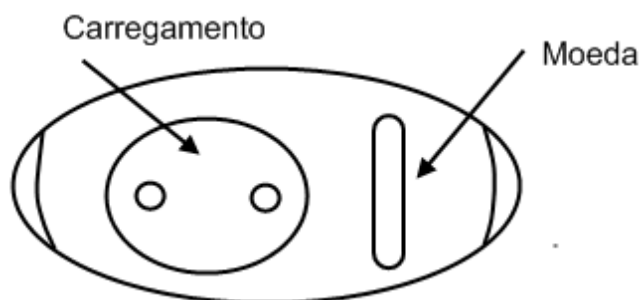


Figura 3-9-Imagem Tomada de Carregamento

A tomada da figura 3-9 será acoplada ao carrinho e no local de carregamento estará a ficha que será inserida na tomada para carregar as baterias.

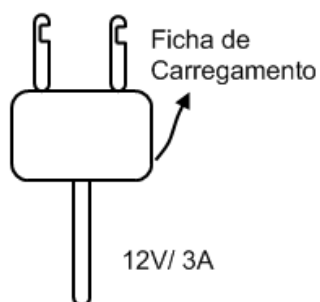


Figura 3-10-Protótipo da fixa móvel de carregamento

A ficha de carregamento, como podemos ver na figura 3-10, apresenta uma cavidade para bloquear a remoção da ficha se não for inserida uma moeda.

Na figura 3-11 é apresentada a forma como serão carregados os CDC. Como podemos ver a barra ao fundo sustenta uma ficha que ligada ao CDC, carrega as baterias.



Figura 3-11-Sistema de carregamento das baterias

### 3.7 Sistema de Alimentação

Para este projecto optou-se por uma bateria que fosse fácil de encontrar no mercado, com uma autonomia razoável, durabilidade considerável, de baixo custo e adequada ao sistema. Para tal, optou-se por uma bateria de chumbo-ácido VRLA (valve-regulated lead-acid battery), apresentada na figura 3-12. Estas baterias são de baixo custo, comparadas com outras tecnologias existentes no mercado, sendo também resistentes a grandes variações de temperatura, no entanto, necessita de um tempo considerável para o carregamento.

Só se optou por estas baterias depois de realizados alguns cálculos de modo a determinar a capacidade das mesmas, podendo-se consultar os dados no segundo capítulo.



Figura 3-12-Bateria de chumbo ácido [15]

## 4 Resultados dos testes do Sistema

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes ao CDC já com o sistema de transmissão implementado.

Realizou-se um ensaio com o carrinho em carga para verificar o comportamento da roda de tracção em contacto com o piso e o comportamento da mola quando o piso apresenta declives.

### 4.1 Resultados finais do carrinho de compras

Na tabela 4-1 estão registados os valores da corrente, tensão e potência aplicados ao motor para diferentes valores de carga.

Conforme a tabela abaixo mencionada, demonstra que o CDC em vazio pesa 30kg e, consoante se coloca compras, consegue-se medir a corrente consumida e a tensão necessária a fornecer ao motor. A potência eléctrica apresentada na tabela foi calculada a partir da expressão 2.18.

Peso Compras (kg)	$I_{\text{Consumida}}$ (A)	U (V)	w (rad/s)	Pelect.real (W)	Pelect.dim. (W)
vazio	3,3	11,7	11,95	38,61	37,23
10	5,5	11,5	11,64	63,25	59,62
25	6,38	11,2	11,23	71,46	68,2

Tabela 4-1- Comparação entre potência eléctrica real e a dimensionada.

Para o dimensionamento do sistema foi determinada a potência do motor para a pior situação (no plano inclinado) com um determinado declive, que já foi mencionado no capítulo 2. Agora o que se pretende é verificar, no plano horizontal, qual a potência eléctrica que realmente o motor necessita para poder deslocar o CDC e, como tal, verifica-se que os valores da potência calculados a partir de resultados práticos são idênticos aos valores de potência dimensionados. O valor da velocidade angular que foi considerada nos cálculos para a potência eléctrica dimensionada foi  $w=10,4$  rad/s como sendo a velocidade de uma pessoa. Este valor é resultado de um ensaio realizado e apresentado na tabela 2-1 onde se considerou a pior situação.

Para a potência eléctrica dimensionada considerou-se um rendimento de 60% isto porque, o que tinha sido determinado era a potência mecânica que foi calculada com base no binário, na velocidade angular e no rendimento. Os resultados para os vários pesos aplicados são apresentados na tabela 4-1.

A pouca queda de tensão da bateria, para diferentes cargas, dá-nos alguma garantia de que a bateria apresenta uma baixa resistência interna e assim garante grande capacidade para o fornecimento de energia.

#### 4.1.1 Autonomia da bateria com funcionamento contínuo

Como se verificou na tabela 4.1, onde estão representados os valores do CDC com cargas, verifica-se que para uma carga de 25Kg existe um consumo de 71,46W. Considerando que o CDC funciona durante uma hora o consumo de energia é  $E_{sist} = 71,46Wh$ .

Para o dimensionamento do CDC temos de ter em consideração que vai haver períodos de grande utilização em que a autonomia de uma hora não seja a mais adequada.

As baterias têm capacidade de 14Ah. Deste modo, sabendo o consumo do motor consegue-se saber o tempo de duração das baterias, como se pode verificar na tabela 4.2.

Peso Compras (Kg)	C <sub>BAT</sub> (Ah)	I <sub>CDC</sub> (A)	t
vazio	14	3,3	4,24
10	14	5,5	2,55
25	14	6,38	2,19

Tabela 4- 2- Duração da bateria para cada carga

Os valores que aqui foram determinados foram fundamentados em dois aspectos, o consumo do CDC para diversas cargas e a autonomia das baterias. Deste modo, sabe-se que para o carro vazio o tempo de duração das baterias é de aproximadamente 4h e 30m.

A autonomia do CDC quando se desloca com 10kg de compras é de aproximadamente 3h. Quando o mesmo tem um peso de 25kg consegue uma autonomia de aproximadamente 2h20m.

De acordo com os dados apresentados na tabela anterior verifica-se que à medida que aumentamos a carga do CDC este necessita de consumir mais corrente. Assim, o tempo de duração das mesmas diminui.

De seguida mediu-se a velocidade do CDC ao longo do percurso tendo-se verificado valores próximos dos ensaios experimentais do ponto 2.2.1, i.e, a velocidade que o sistema adquiriu foi de 11,55rad/s, para uma carga de 30kg, e foi diminuindo quando era acrescentada carga. A velocidade atingida quando o CDC estava com 25kg de carga é de 11,23 rad/s.

# 5 Conclusões Finais

## 5.1 Conclusão

O trabalho realizado nesta tese permitiu desenvolver um sistema de tracção para um CDC que permite auxiliar o utilizador. O sistema idealizado é composto por um controlador, um motor, baterias e sistema de carregamento.

Com o sistema montado no CDC é possível ao utilizador deslocar o mesmo sem necessidade de exercer uma força para este se poder deslocar ao longo do supermercado, bastando para tal, accionar o motor eléctrico para que o sistema de transmissão disponibilize força à roda de tracção para o seu deslocamento.

Uma das vantagens da utilização deste sistema é dar um maior conforto ao utilizador, possibilitando ao mesmo deslocar-se ao longo de um supermercado sem necessitar de exercer força suplementar para deslocar o CDC.

O protótipo do CDC desenvolvido preenche todos os requisitos propostos: é um sistema pequeno e adaptável aos diferentes CDC, conforme se tinha definido.

Para este efeito, o motor desempenha um papel fundamental porque fornece o binário adequado ao sistema.

Quanto ao armazenamento de energia, tomou-se em atenção a sua autonomia de funcionamento, o seu custo e a sua durabilidade. O sistema de comando vai ao encontro dos objectivos propostos, sendo simples e fácil de manusear.

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

## Trabalhos Futuros

Existem alguns pontos que podem ser melhorados, uma vez que este é um protótipo inicial do sistema auxiliar do CDC. Como tal, serão apresentadas aqui algumas melhorias que se poderão realizar em trabalhos futuros.

Poderá ser melhorado o sistema de suspensão para que exista uma resposta mais rápida aos obstáculos que se possa encontrar ao longo do percurso, uma vez que o protótipo foi realizado de forma artesanal.

Como o CDC é auxiliado por um motor, devia-se desenvolver uma estrutura (acoplada ao CDC) para transportar crianças.

Numa visão mais futurista, seria criar um sistema de telecomando para o utilizador orientar o CDC sem necessitar de contacto/esforço físico.

# Referências

- [1] INCISTA - Ocupação científica de Jovens nas Férias, IST- Área Científica de Energia - MJ Resende (2007).
- [2] <http://www.motonline.com.br/a-bosch-e-a-bicicleta-eletrica/>
- [3] <http://www.forococheelectricos.com/2009/03/desde-hace-muchos-anos-circulan-entre.html>
- [4] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010170060413>
- [5] Tese, 2006, Flávia Bonilha Alvarenga, “Sistema acoplável motorizado para cadeira de rodas convencional”.
- [6] <http://www.handtrucks.com/and-trucks/2-in-1convertible-hand-trucks/wescocobraprosrelectrichandtruck.cfm?source=pjn&subid=23493>
- [7] <http://eletroaquila.blogspot.com/2009/06/potenciometro-linear-sem-chave-23mm.html>
- [8] <http://portuguese.alibaba.com/product-gs/permanent-magnet-dc-motor-coreless-screwdriver-motor-printer-motor-micro-motor-rs-395sa--287374837.html>
- [9] Departamento de Física do ISEP, 2010, Adaptação e texto de Victor Meireles, “Aplicações das leis de newton”.
- [10] <http://www.pixmac.com.br/picture/3d+figura+humana+com+o+carrinho+de+compras+vazio/000000145119>
- [11] [www.siemens.com.br](http://www.siemens.com.br) - catálogo de máquinas de corrente contínua
- [12] Manual das baterias recarregáveis: [www.sta-electronica.com.br](http://www.sta-electronica.com.br)
- [13] IEEE, 2004, C.C Chan, “The State of the Art of Electric Vehicles”
- [14] <http://www.4qt.com>
- [15] [http://wikienergia.com/-edp/index.php?title=Bateria\\_de\\_gel](http://wikienergia.com/-edp/index.php?title=Bateria_de_gel)
- [16] <http://h-jardon-k.wikidot.com/cd-motor>
- [17] Brandão Diogo de Paiva Leite, 1984 “Introdução Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua”.
- [18] Siemens, 2006, “Unidade Automação e Controle - Accionamentos e Motores Eléctricos”

# Anexos

# Anexo I

(Quadro de comparação de diversos sistemas adaptados de tracção eléctrica)

Modelos de equipamentos	Tipo de motorização	Posição de montagem	Velocidade (km/h)	Quant. Motores x potência (Watts)	Quant. Baterias x voltagem	Autonomia do produto	Peso total (Kg)	Capacidade carga (kg)	Preço US\$
	Motorização assistiva e sistema motorizado	Troca das rodas traseiras	6	2 x 60	-	2h	17.2	-	4,289
	Sistema motorizado	Troca das rodas traseiras	1.6 to 6.6	2 x 75	2x 12 V 12 Ah	16 km	27	120 <sup>E</sup>	7,460
	Motorização assistiva	Troca das rodas traseiras	6.4	2x 24	2x 24	12 km	26.6	100	7,900
	Motorização assistiva	Troca das rodas traseiras	6.6	2x 160	2x 24 V 3.0 Ah	13 km	28	113 <sup>E</sup>	6,995
	Sistema motorizado	Contato com rodas traseiras	2	2 x 30	1x 12V 9 Ah	3h	60	60	600
	Sistema motorizado	Adição de uma roda frontal motorizada	8	-	2x2 4V 6 Ah	30km	30	181	2,000
	Sistema motorizado / puxando a cadeira	Adição de um equipamento motorizado instalado na parte frontal da cadeira	10	-	2x2 4V 40 Ah	30 km	66	130 <sup>E</sup>	6,000
	Sistema motorizado / puxando a cadeira	Adição de uma roda frontal motorizada	17	2x 160	-	30 km	18	90 <sup>E</sup>	3,600
	Sistema motorizado/ empurrando a cadeira	Adição de uma roda traseira motorizada	2.1	1x220	2x12V 7.5 Ah	6.4 km	4.6	63	640
	Sistema motorizado empurrando a cadeira	Adição de uma roda traseira motorizada	6.4	1x220	2x12V 17Ah	9.8 km	12.7	-	1,110
	Sistema motorizado	Troca das rodas traseiras	6.6	2	2x12 18Ah	15 a 30km	62	120	3,950

Tabela A-1-Comparação dos modelos de equipamentos encontrados no mercado actual [5]

# Anexo II

(Motor)

## Motor

O motor de corrente contínua de íman permanente (Permanent Magnet DC Motor) é praticamente igual a um motor de corrente contínua convencional (CC). A principal diferença está no estator, o campo magnético dele é gerado por ímanes permanentes

O indutor é constituído por dois ou mais ímanes permanentes. O induzido constituído por um núcleo ferromagnético composto por três, cinco ou sete pólos e respectivos enrolamentos. A carcaça do motor completa o circuito magnético (ver figura A-1).

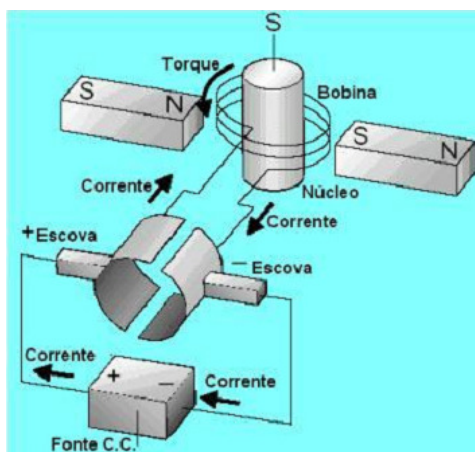


Figura A-1- Motores de CC de íman permanente [8]

Este em vez de ser gerado pela corrente eléctrica, como é o caso dos motores de CC convencionais, é gerado através dos ímanes permanentes.

Os motores CC de ímanes permanentes não tem enrolamentos no indutor. Para efectuar a sua alimentação basta ligar os dois condutores que ligam os enrolamentos do induzido, através do conjunto escovas/colector.

Aplicando uma tensão aos terminais do motor CC, este roda num determinado sentido. Invertendo a polaridade da tensão de alimentação, o motor roda em sentido contrário. Se aumentar ou diminuir a tensão de alimentação a velocidade do motor aumenta ou diminui, respectivamente[16].

## Controle de velocidade dos Motores CC

A figura A-2 mostra o esquema do circuito eléctrico de um motor CC com excitação independente. O motor CC de excitação independente apresenta características semelhantes ao motor CC de ímanes permanentes.

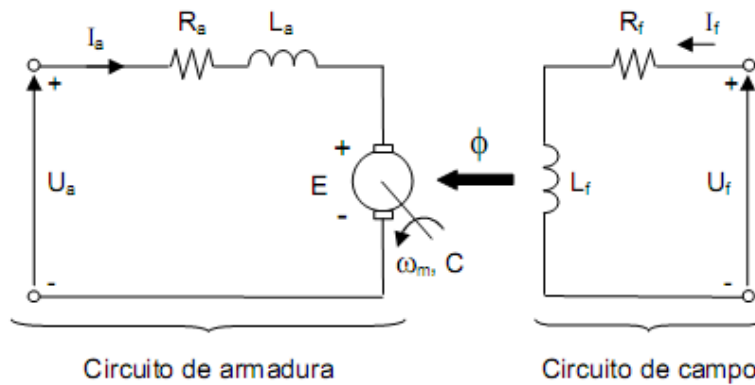


Figura A-2-Esquema do circuito elétrico de um motor [17]

O esquema está dividido em dois circuitos elétricos. O circuito da armadura, onde é aplicada uma tensão de alimentação e o circuito de campo que representa a excitação do motor.

A força contra electromotriz induzida ( $E$ ) é igual à tensão da armadura ( $U_a$ ) menos a queda de tensão gerada pela passagem da corrente da armadura ( $I_a$ ) multiplicando a resistência da armadura ( $R_a$ ).

$$E = U_a - (R_a \times I_a) \quad (B1)$$

O fluxo magnético gerado no entreferro ( $\Phi$ ) é proporcional à indução gerada pela passagem da corrente de excitação ( $I_f$ ) por uma bobine ( $L_f$ ).

No caso do motor CC de ímãs permanentes, o fluxo é gerado pelos ímãs permanentes e é constante.

Pela lei da Indução de Faraday, a força electromotriz (f.c.m.) induzida é proporcional ao fluxo e a velocidade de rotação do motor:

$$E = k_1 * \Phi * n \quad (B2)$$

Sendo  $n$  a velocidade de rotação do motor e  $k_1$  a constante que depende do tamanho do motor, do número de pólos do mesmo e de como os pólos estão interligados.

Para determinar a velocidade de rotação do motor CC, combina-se as equações ( $E = U_a - (R_a \times I_a)$ ) e ( $E = k_1 * \Phi * n$ ), resultando a seguinte equação:

$$n = k_1 \frac{U_a - R_a * I_a}{\Phi} \quad (B3)$$

Pela equação ( $n = k_1 \frac{U_a - R_a * I_a}{\Phi}$ ) verifica-se que o fluxo é inversamente proporcional à velocidade. Seguindo este raciocínio pode-se dizer que ao manter o fluxo é necessário variar a tensão da armadura para variar a velocidade de rotação do motor.

O binário produzido pelo motor CC ( $T$ ) é igual:

$$T = k_3 \times I_a \times \Phi \quad (B4)$$

Sendo  $k_3$  uma constante que depende das características físicas do motor CC.

Pela análise da equação ( $T = k_3 \times I_a \times \Phi$ ) conclui-se que o binário produzido pelo motor CC é proporcional à corrente da armadura, já que o fluxo é praticamente constante[18].

Pode-se concluir que, para variar a velocidade do motor CC de ímanes permanentes é necessário actuar sobre a tensão de alimentação do motor. Para aumentar a velocidade de rotação do motor aumenta-se a tensão aplicada e vice-versa.

Para variar o binário produzido pelo motor CC de ímanes permanentes é preciso variar a corrente injectada no motor. Para aumentar o binário produzido deve-se elevar a corrente injectada neste e vice-versa.