



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa



## **Modelação e Simulação de um *Formula Student* Eléctrico**

**Gabriel Benjamim Teixeira Rodrigues**

(54536)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

### **Júri**

Presidente: Prof. Marcelino Santos

Orientador: Prof. Moisés Piedade

Co-orientador: Prof. Duarte Mesquita

Vogal: Prof. Francisco Alegria

**Outubro 2009**

## **Abstract**

The Formula Student competition is a student competition where teams compete against each other in a real world engineering environment. The competition is commonly known as the Formula 1 of Universities. The team of the Technical University of Lisbon decided to go forward in the design of an Electric Formula Racing Car for the Formula Student competitions. It is proposed a Formula Student Racing Car with an electric power train. The main goal is to compare it's performance with the previous, Formula Student gas engine car designed and manufactured by the team, in terms of autonomy, performance and efficiency. The Formula Race Car is modeled and simulated in MATLAB / Simulink to predict the performance autonomy of the Formula Electric Race Car and compare it with the previous engine Formula Race Car. The simulation can help the team to find the best compromise for the overall package of the electric racing car. The main goal for this first electric car is to get the know-how to design and manufacture more and better formula electric race cars.

Keywords – electric vehicle, formula racing, batteries, PM machine, formula electric competition.

## Resumo

A *Formula Student* é uma competição entre universidades onde as universidades competem entre si num ambiente ultra competitivo, onde o objectivo é apresentar o melhor compromisso entre os custos e o nível tecnológico do protótipo. A competição é conhecida mundialmente como a Formula 1 Universitária. A equipa do Instituto Superior Técnico, decidiu projectar um protótipo totalmente eléctrico, para as competições da *Formula Student*. O principal objectivo é comparar o protótipo eléctrico quer em termos de performance, eficiência e autonomia em relação ao último protótipo, que utilizava um motor de combustão interna. O protótipo eléctrico é modelado em MATLAB / Simulink onde se estima o desempenho, autonomia do protótipo eléctrico ao mesmo tempo que os resultados são comparados com o protótipo anterior. É com o modelo implementado que a equipa pretende encontrar o melhor compromisso para o conjunto global do protótipo eléctrico. O principal objectivo para este primeiro protótipo eléctrico é coleccionar *know-how* para construir mais e melhores protótipos, com mais módulos electrónicos projectados pela equipa.

Palavras-chaves: – Veículo Eléctrico; Baterias; Motores Ímanes Permanentes; Competição Formulas Eléctricas.

## Lista de Acrónimos

DOD	Deep Of Discharge
EV	Electric Vehicle
FCEM	Força Contra ElectroMotriz
FST	Formula Student Técnico
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
RPM	Rotações Por Minuto
PWM	Pulse Width Modulation
SAE	Society of Automotive Engineers
SOC	State Of Charge
USABC	United States Advance Battery Consortium
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VRLA	Valve Regulated lead Acid

# Índice

Abstract .....	i
Resumo.....	ii
Lista de Acrónimos .....	iii
Índice .....	iv
Lista de tabelas.....	vii
Lista de figuras.....	viii
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Enquadramento da dissertação .....	2
1.3 Objectivos da dissertação de mestrado:.....	3
1.4 Organização da Dissertação .....	5
1.5 Estado da Arte .....	5
1.5.1 Introdução .....	5
1.5.2 Estado da arte do Sistema de Propulsão Eléctrica .....	6
1.5.3 Estado da arte de Fontes de Energia.....	10
1.5.3.1 Introdução .....	10
1.5.3.2 Baterias.....	11
1.5.3.3 Ultra-condensadores .....	14
2 Modelação da Dinâmica do Protótipo .....	15
2.1 Introdução .....	15
2.2 Força de tracção .....	15
2.2.1 Força de atrito de rolamento .....	16
2.2.2 Força de arrasto aerodinâmica.....	16
2.2.3 Força para subir um plano inclinado .....	17
2.2.4 Força de aceleração.....	17
2.2.5 Força de total de tracção.....	19
2.3 Conclusão .....	20
3 Sistemas de Armazenamento de Energia.....	21
3.1 Introdução .....	21
3.2 Factores que afectam o desempenho das baterias .....	22
3.2.1 Nível de tensão.....	22
3.2.2 Corrente de descarga .....	23

3.2.3	Potência e Energia específica .....	25
3.2.4	Temperatura.....	26
3.2.5	Auto descarga.....	26
3.2.6	Ciclo de vida das baterias .....	27
3.3	Tecnologias de baterias.....	27
3.3.1	Baterias de Chumbo .....	28
3.3.2	Baterias de Lítio .....	30
3.4	Ultra-Condensadores .....	32
3.5	Comparação entre as tecnologias estudadas.....	33
3.6	Conclusão .....	36
4	Motores Eléctricos.....	38
4.1	Introdução .....	38
4.2	O motor DC de ímanes permanentes.....	38
4.2.1	Operação do motor DC básico .....	38
4.2.2	Característica do binário e velocidade angular .....	39
4.2.3	Controlo do motor DC de ímanes permanentes .....	42
4.2.4	Modos de operação da máquina de ímanes permanentes.....	43
4.2.4.1	Funcionamento como motor.....	43
4.2.4.2	Funcionamento como gerador.....	44
4.2.5	Eficiência de um motor DC.....	45
4.3	Travagem dinâmica e regenerativa.....	46
4.3.1	Motores DC como travões.....	46
4.4	Circuitos de drive para motores DC .....	48
4.5	Regulação e conversão da tensão .....	51
4.5.1	Semicondutores.....	51
5	MODELO TEÓRICO PROPOSTO .....	53
5.1	Introdução .....	53
5.2	Modelo Proposto.....	53
5.2.1	Motor Eléctrico.....	53
5.2.2	Dinâmica de Veículos .....	55
5.2.3	Controlador .....	56
5.2.4	Dimensionamento.....	57
5.2.5	Sistema de Armazenamento – Baterias .....	60
5.2.6	Conversor de 2 Quadrantes.....	62

5.2.7	Sistema completo .....	64
5.3	Conclusão .....	65
6	Resultados obtidos por Simulação .....	67
6.1	Introdução .....	67
6.1.1	Prova de aceleração .....	68
6.1.2	Prova de Qualificação - <i>Sprint</i> .....	70
6.1.3	Endurance sem regeneração de energia .....	73
6.1.4	Endurance com regeneração de energia.....	75
6.2	Conclusão .....	78
7	Conclusões finais .....	79
7.1	Conclusão .....	79
7.2	Trabalho Futuro.....	80
8	Referências .....	82

# Lista de tabelas

Tabela 1 Pontuação atribuída nas diferentes provas estáticas e dinâmicas.....	3
Tabela 2 Análise dos diferentes tipos de motores eléctricos.....	8
Tabela 3 Parâmetros essenciais das várias tecnologias de baterias [17].....	11
Tabela 4 Vantagens e desvantagens das células de ácido de chumbo [17].....	29
Tabela 5 Características técnicas baterias de chumbo [17]. .....	30
Tabela 6 Vantagens e desvantagens das células iões de lítio [2, 17]. .....	31
Tabela 7 Características técnicas baterias de iões de lítio [2,17].....	32
Tabela 8 Características técnicas ultra-condensadores [19].....	33
Tabela 9 Características dos diferentes Semicondutores [6]. .....	51
Tabela 10 Componentes escolhidos e os seus respectivos custos.....	78



# Lista de figuras

Figura 1	Curvas de RPM – Potência e RPM – Binário [16].	7
Figura 2	Curva da Energia e Potência específica de vários tipos de acumuladores [17].	11
Figura 3	Projecção das forças num veículo a subir um plano inclinado.	16
Figura 4	Representação simples da ligação entre o motor eléctrico e a roda.	18
Figura 5	Veículo eléctrico que em 1899, estabeleceu o record de velocidade.	21
Figura 6	Perfil de descarga para 3 tipos de sistemas electroquímicos [2].	23
Figura 7	Bateria descarregada a várias intensidades de corrente, intensidade crescente de 1 a 5 [2].	24
Figura 8	Baterias descarregada a uma intensidade de corrente elevada (1) e mudança sucessiva para correntes inferiores quando se atinge tensão de corte [2].	24
Figura 9	Gráfico de Ragone para diferentes tecnologias [18].	25
Figura 10	Variação da capacidade das células para diferentes temperaturas [22].	26
Figura 11	Influência da temperatura no número de ciclos [2].	27
Figura 12	Densidade de potência e energia para diferentes tecnologias de baterias [19].	28
Figura 13	Diferentes eléctrodos para diferentes tecnologias de lítio, com diferentes características.	31
Figura 14	Variação da corrente de descarga em função do tempo de descarga [17].	35
Figura 15	Variação da tensão em função da capacidade para diferentes correntes de descarga [22].	35
Figura 16	Motor simplificado de ímanes permanentes [23].	38
Figura 17	Curva de Binário- Velocidade de um motor de ímanes permanentes [6].	42
Figura 18	Variação da curva binário – velocidade diminuindo a tensão de alimentação do motor [6].	42
Figura 20	Motor Ímanes permanentes com resistência para travagem dinâmica.	47
Figura 21	Sistema de aproveitamento de energia.	48
Figura 22	Conversor de 4 quadrantes.	49
Figura 23	Conversor de 2 quadrantes.	49
Figura 24	Variação das grandezas eléctricas num conversor de 2 quadrantes.	50
Figura 25	Modelo da dinâmica do motor eléctrico em ambiente Simulink.	54
Figura 26	Motor de ímanes permanente montado na traseira de um <i>Formula Student</i> Híbrido.	55
Figura 27	Modelo com as grandezas físicas que condicionam a propulsão do veículo eléctrico.	56
Figura 28	Resposta de um sistema com e sem <i>anti-windup</i> [23].	57
Figura 29	Controlador Proporcional Integral em ambiente Simulink.	57
Figura 30	Variação da tensão em função da corrente de descarga aplicada à célula.	60
Figura 31	Modelo do sistema de armazenamento de energia em MATLAB/Simulink.	61
Figura 32	Variação da tensão em função do estado de carga, para várias correntes de descarga.	62
Figura 33	Conversor de 2 quadrantes em ambiente Simulink.	63
Figura 34	Diagrama de blocos do Sistema de Propulsão Eléctrica.	64
Figura 35	Sistema completo em ambiente MATLAB/Simulink.	65
Figura 36	Curva de Binário em função das RPM do motor de combustão interna.	67
Figura 37	Velocidade do protótipo em função do tempo, Prova de Aceleração.	68
Figura 38	Distância percorrida em função do tempo na Prova de Aceleração.	69
Figura 39	Variação da corrente na Prova de Aceleração.	70
Figura 40	Energia consumida ao longo de uma volta no <i>Sprint</i> .	71
Figura 41	Corrente média consumida numa volta, na Prova de <i>Sprint</i> .	72

Figura 42 Corrente consumida na bateria – <i>Sprint</i> .....	73
Figura 43 Estado de Carga da bateria na Prova de <i>endurance</i> .....	74
Figura 44 Curva de tensão da bateria ao longo da prova de <i>endurance</i> .....	75
Figura 45 Modelo do sistema de armazenamento de energia com a recuperação de energia em MATLAB/Simulink.....	76
Figura 46 Estado de carga da bateria, com sistema de reaproveitamento de energia .....	77
Figura 47 Curva de tensão da bateria ao longo do <i>endurance</i> .....	77

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Com as recentes e mais exigentes leis no que concerne às emissões de escape dos veículos, com o escassear dos recursos energéticos de origem fóssil e as preocupações quanto ao aquecimento global serem cada vez maiores, os veículos eléctricos têm vindo a ser vistos como uma solução para o futuro por parte dos governos, fabricantes de automóveis e consumidores.

Paralelamente a população mundial está a aumentar e estima-se que nos próximos 50 anos a população mundial passe dos actuais 6 biliões para 10 biliões de habitantes. Juntamente estima-se que o número de veículos aumente dos actuais 700 milhões para 2,5 biliões [17], ou seja, mais do triplo da quantidade actual. Portanto, se todos estes veículos forem movidos por motores de combustão interna, de onde virá todo o petróleo necessário? Como será resolvido o problema das emissões? O que por sua vez nos leva à questão do aquecimento global. As respostas a estas questões estão na base, do desenvolvimento dos meios de transporte, por nós utilizados de uma forma sustentável. Num mundo em que as questões ambientais cada vez são mais preocupantes, o desenvolvimento de veículos eléctricos ganham novos contornos e o seu desenvolvimento tem vindo a ser acelerado para satisfazer as necessidades, como por exemplo custos mais baixos e maior autonomia. Do ponto de vista ambiental, os veículos eléctricos têm emissões locais. Do ponto de vista energético a sua maior eficiência, irá permitir um desenvolvimento tecnológico que será benéfico para a criação de uma nova indústria que se sustentará numa economia também ela mais sustentável [17].

É neste contexto que as entidades organizadoras das competições da *Formula Student*, nomeadamente a SAE (*Society of Automotive Engineers*), IMechE (*Institution of Mechanical Engineers*), ATA (*Associazione Technica dell'Automobile*) e VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*), a ordem dos engenheiros alemãs, começaram a apresentar nas suas respectivas competições, classes específicas para veículos eléctricos. Todas estas organizações têm em comum, o objectivo de preparar os futuros engenheiros para os desafios condutores do futuro, não só a nível intelectual mas mais importante ainda na componente prática. As várias organizações partilham a visão, de no espaço de 3 anos tornar a classe de protótipos eléctricos a classe principal, ou seja, aquela onde haverá mais concorrentes e onde participarão as melhores universidades do mundo. É neste âmbito e com a experiência anteriormente adquirida nas competições da *Formula Student*, na equipa do Instituto Superior Técnico, que surge a necessidade da realização desta dissertação. Na secção seguinte iremos abordar em detalhe as questões regulamentares e a filosofia que alicerça as competições da *Formula Student*. Com o conhecimento das duas premissas anteriores pretende-se tomar as melhores decisões para o protótipo de modo a que cumpra as respectivas regras, mas que também as explore da melhor forma, tendo sempre em conta o desempenho a nível de engenharia do sistema, do seu custo e da capacidade de ser facilmente implementado no mercado.

## 1.2 Enquadramento da dissertação

A filosofia da competição *Formula Student*, é a de proporcionar, exclusivamente para Universidades uma competição semelhante, mas reduzida à escala, a todas as grandes competições actualmente existentes no panorama automóvel mundial (isto é, *Formula 1*, *Indy Car Racing*, etc.). Pretendem-se construir os melhores e os mais rápidos carros, e estimular a capacidade intelectual dos futuros engenheiros, tal como estimular o desenvolvimento tecnológico. Porém, tudo isto tem que ser feito dentro de um apertado “*budget*”, respeitando regulamentos complexos com base nas competições automóveis sobre a égide da FIA, e ainda, tendo como finalidade clara a possibilidade de construção, com lucro, de 1000 unidades por ano, durante um período de 4 anos. O grande desafio proposto a qualquer equipa que participe ao longo das diferentes classes é o de projectar, construir e fazer competir um protótipo. As equipas têm de assumir-se como um construtor de automóveis que apresentará um protótipo para ser avaliada a sua viabilidade de produção. O mercado alvo será o dos “*non-professional weekend race driver*”, pelo que o protótipo deverá apresentar desempenhos elevados quer a nível de aceleração e de travagem, bem como no equilíbrio do protótipo. O protótipo deverá igualmente ter um custo razoável, tal como ser fiável e facilmente ajustado. Assim sendo, as capacidades de organização, apresentação e exposição são postas à prova num conjunto de provas de *Design Event* (Prova de Engenharia), *Business Presentation Event* (onde se apresenta um *Business Plan*), *Cost & Management Event* ( Prova de Custos) e *Sustainability Event* (Prova da Sustentabilidade dos materiais utilizados) ,que apresentam um peso importante na classificação final. Devido à magnitude da tarefa proposta, e das dificuldades inerentes à sua realização em ambiente académico, a organização da prova divide as equipas participantes em 3 classes de competição, de acordo com o estado de evolução do seu projecto. São essas classes: a Classe 3, classe de projecto; Classe 2, Classe de protótipos das peças que compõe o protótipo final e a Classe 1, que é a classe rainha onde para além das provas atrás mencionadas, são ainda avaliados todos os protótipos em vários tipos de provas dinâmicas, desde provas de aceleração frontal e lateral até uma prova de *Endurance* de 22 km de distância. É pois um englobante desafio de engenharia, cujos benefícios que os futuros profissionais adquirem não são exclusivamente aplicáveis à área da engenharia, são antes transversais a um vasto leque de áreas profissionais. Para finalizar, é de referir que toda a indústria automóvel e o desporto motorizado em particular, tal como outras áreas da indústria, sabem o quão importante é o facto de ter engenheiros de alta categoria nos seus quadros. A *Formula Student* não só ajuda a fornecer estes quadros exigentes com a preparação que incute nos seus participantes, bem como incentiva futuros engenheiros. Nenhum outro tipo de competição constitui um tão completo complemento à formação académica, gerando assim profissionais bem preparados para os desafios do futuro. Actualmente, mais de trezentas faculdades participam, por todo o mundo, nestas competições. Em suma a filosofia da competição é formar profissionais de engenharia mais inovadores, mais competentes e com uma formação mais vasta.

Após a introdução da filosofia da competição e de terem sido apresentadas as principais regras. Vamos agora analisar as pontuações para as provas estáticas e para as provas dinâmicas.

Tem-se como objectivo nesta secção e tendo em conta as pontuações, definir os melhores compromissos a serem tomados a nível de projecto, de modo a que a pontuação atingida pela equipa seja a máxima. Na Tabela 1 são apresentadas as pontuações das provas estáticas, seguidas das provas dinâmicas.

**Tabela 1 Pontuação atribuída nas diferentes provas estáticas e dinâmicas.**

Prova de Engenharia	150 pontos
Prova de Custos / Sustentabilidade	100 pontos
Prova de Negócios	75 pontos
Prova de Aceleração	75 pontos
Prova dos '8s'	50 pontos
Prova de Qualificação	150 pontos
Prova de Endurance	300 pontos
Consumo de Energia	125 pontos

### **1.3 Objectivos da dissertação de mestrado:**

- Criar um modelo para a cadeia de propulsão de um protótipo eléctrico.
- Calcular as necessidades energéticas de um veículo deste tipo, para um dado ciclo.
- Calcular a ordem de grandeza dos parâmetros envolvidos.
- Comparar a *performance* do protótipo eléctrico com protótipos anteriores.

O projecto de um protótipo eléctrico, é um projecto que visa a integração de várias áreas de engenharia, desde a automóvel até a química. Assim a devida integração das várias áreas e as suas optimizações são essenciais para cumprir os requisitos do protótipo. Visto que um protótipo eléctrico é munido de características especiais, é necessário na fase de projecto adoptar a implementação de um novo modelo para o projecto do monolugar. Para além do mais, que fontes de energia avançadas e sistemas inteligentes de gestão dos recursos energéticos são fundamentais para que os veículos eléctricos, sejam comercialmente viáveis. De igual modo o custo será sempre um dos factores essenciais nesta matéria da comercialização do protótipo. De seguida colocamos os pontos, essenciais para o projecto de um protótipo eléctrico:

1. Identificar o nicho de mercado.
2. Determinar as especificações técnicas, tendo em conta os ciclos de utilização.
3. Determinar as infra-estruturas necessárias incluindo as das reciclagens das baterias.
4. Determinar o sistema de armazenamento de energia.
5. Determinar as especificações do sistema de propulsão, potência, binário e velocidade, tendo em conta a fonte de energia (capacidade, corrente, tensão).
6. Determinar o sistema de propulsão eléctrica – motores, conversores, um ou vários motores.
7. Optimizar a eficiência do motor eléctrico para o ciclo de utilização e condições de operação.
8. Optimização de todo o sistema utilizando simulação em computador.

Existem várias considerações que são específicas num veículo eléctrico, devem-se elas a questões relacionadas com os motores eléctricos e aos sistemas de armazenamento de energia. Portanto, os principais objectivos que deverão ser alcançados pelo protótipo FST eléctrico são:

- Segurança
- Custo final
- Funcionalidade, fiabilidade facilidade de implementação
- Peso do protótipo
- Autonomia suficiente para a prova de *Endurance*
- Capacidade de Aceleração
- Protótipo com elevado potencial comercial

O último ponto não é de todo o principal, no entanto realça-se de que, os consumidores deste produto são exigentes e pertencem a um nicho de mercado, muito específico. Daí a sua inclusão nos principais objectivos do protótipo. Ao longo das secções seguintes será evidente que todas as opções de projecto terão como base os primeiros 5 pontos. Será necessário em determinados itens encontrar o melhor compromisso para que o funcionamento global do conjunto seja o mais eficaz.

## **1.4 Organização da Dissertação**

A organização da dissertação está de modo a que nos quatro primeiros capítulos são dados a conhecer as tecnologias existentes no mercado ao mesmo tempo que essa informação é suportada de forma técnica e teórica nos capítulos onde se abordam temáticas como motores eléctricos, sistemas de armazenamento de energia e os sistemas associados aos dois primeiros. Nos dois capítulos finais da dissertação apresenta-se o modelo teórico proposto e os resultados obtidos por simulação. Os resultados obtidos são comparados com os dados referentes ao protótipo FST-03 que é um protótipo dotado de um motor de combustão interna.

## **1.5 Estado da Arte**

### **1.5.1 Introdução**

A existência do veículo eléctrico remonta à 1834. Durante a última década do século XIX, um certo número de companhias produziram veículos eléctricos em França, Inglaterra e Estados Unidos. Devido à sua baixa autonomia, associada às limitações das baterias e ao rápido desenvolvimento dos veículos com motores de combustão interna (modelo T da Ford), os veículos eléctricos desapareceram completamente até ao ano de 1930. Foi necessário esperar 40 anos para que no início dos anos 70, devido à primeira crise energética, alguns países voltassem a estudar a viabilidade dos veículos eléctricos. De momento o veículo eléctrico é movido pelo facto de necessitarmos de diminuir as emissões dos gases de escape, tal como de criarmos um futuro mais sustentável do que aquele que até agora se avizinha a nível energético. No entanto reside uma grande questão: Será que os veículos eléctricos têm recursos para se evidenciar? De facto o custo dos veículos eléctricos é ainda elevado e a sua autonomia algo limitativa. Para resolver a questão da autonomia, o desenvolvimento de baterias como as de Hidretos Metálicos de Níquel (Ni-MH) e as várias tecnologias associadas aos iões de lítio, como polímeros de lítio ou lítio ferro fosfato, estão em constante progresso. Igualmente temos vindo a assistir ao desenvolvimento da tecnologia dos ultra-condensadores. No entanto, a energia específica e a densidade de energia das baterias é muito mais baixa que as apresentadas pela gasolina. Entretanto e para apresentar uma solução a curto prazo, estão a surgir no mercado vários modelos de veículos híbridos. Os veículos híbridos essencialmente têm uma autonomia superior e um desempenho superior aos veículos eléctricos, mas com um custo na complexidade de implementação e no custo do veículo, devido à fonte de energia adicional existente. Para diminuir os custos têm sido feitos esforços no desenvolvimento dos motores eléctricos, conversores, baterias, controladores e outro tipo de componentes. Das tecnologias relacionadas com a implementação de um veículo eléctrico, o sistema de armazenamento é o mais crítico e no momento presente é o que condiciona o seu sucesso. As restantes tecnologias que são igualmente importantes, de momento encontram-se numa fase madura. Efectivamente ainda existe um longo percurso a percorrer na evolução, mas estas tecnologias já permitem desempenhos iguais aos veículos actuais. Para combater as desvantagens a nível de autonomia, por parte dos veículos

eléctricos, têm sido canalizados esforços de modo a tornar acessível e apelativo o veículo eléctrico. A acessibilidade pauta-se pela colocação de veículos no mercado com preços competitivos e não muito elevados. A apelabilidade, tem sido feita de modo a demonstrar que o veículo eléctrico é totalmente seguro, fiável e que é igual ou até superior que os actuais veículos [17],[6],[7].

## 1.5.2 Estado da arte do Sistema de Propulsão Eléctrica

O sistema de propulsão eléctrica é o subsistema essencial de um veículo eléctrico. Os principais agentes no sistema de propulsão eléctrica são: o motor eléctrico, o conversor e o controlador. Nesta secção iremos incidir principalmente no motor eléctrico. Pretende-se que este sistema seja dotado das seguintes características [17]:

- Binário elevado para velocidades de rotação baixas, ou seja, para arranques, tal como pretende-se potência elevada para velocidades de rotação elevada.
- Binário com resposta rápida
- Vasta gama de velocidades de rotação que incluam regiões de potência constante.
- Eficiência elevada para reaproveitamento de energia
- Eficiência elevada para diferentes gamas de velocidade de rotação, tal como de binário
- Fiabilidade e robustez para diferentes tipos de utilização
- Baixo custo



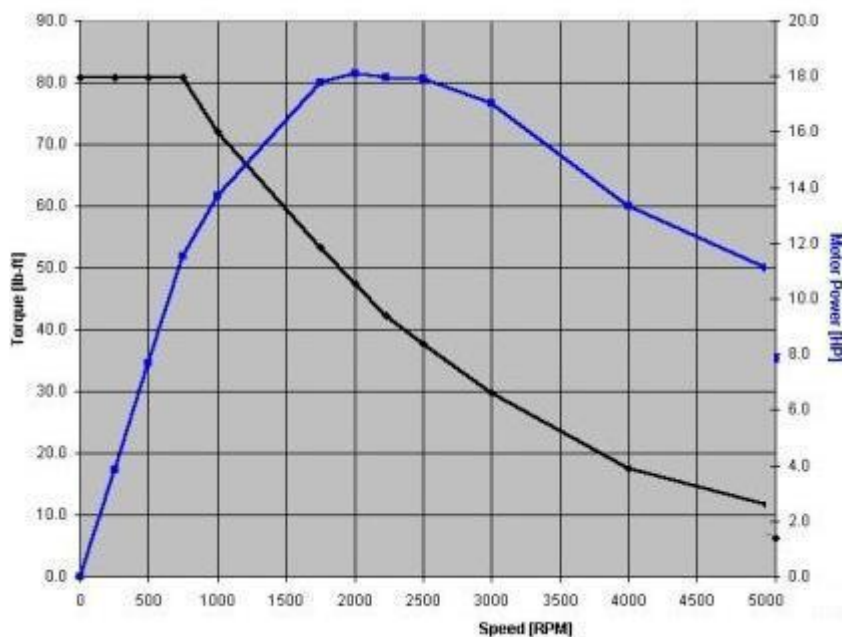


Figura 1 Curvas de RPM – Potência e RPM – Binário [16].

O desenvolvimento da propulsão eléctrica está baseado no crescimento de várias tecnologias, especialmente nos motores eléctricos, na electrónica de potência, na microelectrónica, e no controlo. Tradicionalmente os motores DC estiveram sempre relacionados com a tracção eléctrica devido à sua característica binário - velocidade adaptar-se para as solicitações da tracção de um veículo e o seu controlo ser relativamente simples. No entanto, motores DC têm colectores o que requer uma manutenção periódica.<sup>1</sup> Recentes avanços tecnológicos fizeram com que os motores sem colectores avançassem para uma nova era. Estes motores são dotados de eficiências e densidades de potência mais elevadas que os motores DC tradicionais. Estes motores são igualmente mais fiáveis, não necessitam de manutenção e operam a um custo mais baixo. Os motores de indução são aceites largamente pela comunidade científica como sendo um motor sem colectores devido à sua fiabilidade elevada e baixa manutenção. Alternativamente os motores de ímanes permanentes são bastante promissores devido à utilização de ímanes permanentes que produzem um campo magnético e que por essa razão atingem densidades de energia e eficiências bastante elevadas. Os motores de relutância variável têm também algum potencial devido a sua facilidade de construção e robustez [7].

Os motores de indução são neste momento uma das tecnologias mais maduras no que concerne a motores sem colectores. De modo a melhorar o seu desempenho dinâmico para a utilização em veículos eléctricos o controlo realizado por vectores de tensão é preferido. Apesar, deste método oferecer uma vasta gama de velocidades, de 3 a 4 vezes a velocidade de base, a eficiência do motor irá sofrer uma queda para as gamas de velocidade superior.

<sup>1</sup> Para o número de ciclos que o motor será utilizado na realização de uma prova de *Formula Student* a manutenção dos colectores não é uma questão crítica

Os motores de ímanes permanentes são os mais dotados para competir com os motores de indução para o sistema de propulsão de um veículo eléctrico. As suas principais vantagens classificam-se num peso e volume da máquina mais pequeno comparativamente às máquinas de indução. Isto porque o campo magnético é produzido por ímanes muito potentes, o que permite densidades de potência mais elevadas, do que nos motores de indução. Devido as baixas perdas no cobre e no rotor a sua eficiência é muito superior à dos motores de indução. Visto que a excitação dos ímanes permanentes não sofre de qualquer risco de defeitos de fabrico no que concerne a sobreaquecimento ou danos mecânicos, a sua fiabilidade é elevada. Devido ao baixo valor da constante de tempo electromecânica, a aceleração do rotor para uma dada entrada de potência pode ser facilmente aumentada [7],[8].

Os motores de relutância variável têm potencial para a utilização em tracção eléctrica. Estes motores derivam directamente dos motores de relutância variável passo a passo. Estes motores têm uma grande vantagem por serem muito fáceis de construir, terem um custo de produção muito baixo e curvas de binário – velocidade adequada para a tracção eléctrica. Apesar da sua facilidade de construção o mesmo não se pode dizer da sua controlabilidade. O seu controlo é difícil e subtil devido à elevada saturação dos pólos. Estes motores apresentam também problemas acústicos de ruído. Recentemente foram aplicados novas maneiras de concepção deste motor, que se baseia na análise de elementos finitos e que permite minimizar as perdas totais do motor. Igualmente na área da controlabilidade têm sido feitos desenvolvimentos para a simplificação do mesmo, com técnicas de lógica difusa (*fuzzy logic*). No entanto, estes motores não se encontram ainda numa fase madura, tal como o seu controlo não é simples, o que implica um aumento no tempo dispendido para controlar o motor, o que aumenta os custos do protótipo, ao mesmo tempo que a sua fiabilidade e funcionalidade é posta em causa. Pelas razões apresentadas, estes motores não serão considerados para a implementação do sistema de propulsão do protótipo. Na tabela 2, temos uma avaliação dos diferentes tipos de motores e que sumariza a nossa discussão anterior. Essa pontuação em cada item é dado de 1 a 5 sendo, que o valor 5 representa a melhor pontuação para uma dada característica. Portanto o motor DC tem o valor 5 para o custo, ou seja, é o motor mais barato.

**Tabela 2 Análise dos diferentes tipos de motores eléctricos.**

	Motor DC	Motor de Indução	Motor de ímanes permanentes	Motor de relutância variável
Densidade de potência	2	3,5	4,5	3,5
Eficiência	2	3,5	4,5	3,5
Controlabilidade	5	4	4	2
Fiabilidade	3	5	4	5
Maturidade	5	4	4	4
Custo	5	4	4	3
Total	22	24	25	21

Da análise da tabela anterior constata-se que entre o motor de ímanes permanentes e o de indução os resultados são muito idênticos. Tal como no passado pensou-se que existia uma configuração para um motor de combustão interna, que seria a melhor. No entanto, o que sucedeu foi que vários caminhos foram seguidos e nenhum levou a uma solução ideal e unânime. Efectivamente o que se encontrou foram motores mais adequados para certos tipos de utilização. O mesmo se passa com os motores eléctricos, concretamente com o motor de indução e o de ímanes permanentes. Cada um deles apresenta vantagens e desvantagens. Assim o que são estas duas tecnologias? Como funcionam? O que é que as diferencia? O que têm em comum? Começando pela máquina de ímanes permanentes, o rotor inclui dois ou mais ímanes permanentes que geram um campo magnético constante. Este campo magnético por sua vez interage com os enrolamentos do estator, onde circula a corrente (circuito da armadura) e cria um dado binário. A medida que o rotor aumenta a sua velocidade de rotação, é necessário que a magnitude e polaridade das correntes do estator variem continuamente, para que o binário permaneça constante e a transformação da energia eléctrica em mecânica seja feita de uma forma eficiente.

O motor de indução é virtualmente idêntico ao motor de ímanes permanentes. Ambos possuem três enrolamentos que se encontram no estator. A diferença essencial entre as duas máquinas está no rotor. Essa diferença centra-se no facto, de o motor de indução não ter ímanes. Portanto neste caso a corrente que circula nos enrolamentos cria um campo magnético que gira em torno do rotor. A razão pela qual os motores de indução são uma boa solução reside no facto de o motor poder funcionar directamente sobre uma carga. Uma das grandes limitações destes motores reside no facto de não poder operar em modo DC. Para ligar um motor de indução a um sistema de energia, ou seja, a uma bateria necessita-se de colocar um inversor. O inversor necessita de malhas de controlo de modo a que o seu funcionamento possa equiparar-se ao desempenho demonstrado por um motor de ímanes permanentes. Portanto, a questão mantém-se motor de ímanes permanentes ou de indução? Hoje em dia os veículos totalmente eléctricos são munidos de motores de indução, enquanto os veículos híbridos utilizam motores de ímanes permanentes. O *Tesla Roadster*, juntamente com outros veículos eléctricos, utilizam os motores da *AC-Propulsion* [1]. Uma das razões, onde o motor de ímanes permanentes se destaca é por gerar muito menos calor no rotor, pois o seu arrefecimento é mais simples de realizar. Como tal a sua densidade de potência é superior ao motor de indução, tal como a sua eficiência. Um motor de indução não consegue eficiências superiores a 90 % enquanto o motor de ímanes permanentes tem eficiências de 95 %, e em determinadas condições poderá operar muito próximo dos 98 %. No entanto, a máquina de ímanes permanentes a medida que aumenta a sua dimensão, a sua eficiência diminui. Tal já não se verifica para a máquina de indução [3].

Para a situação de um protótipo do tipo *Formula Student*, como o que pretendemos implementar a máquina a utilizar não é de grandes dimensões, devido à intenção de ter o menor peso possível para um protótipo deste tipo. Para se ter uma ideia, o último protótipo FST construído pela equipa pesa 230 kg. Assim sendo, a nossa opção irá recair sobre um motor de ímanes permanentes que a nível de custos, é quase idêntico a um motor de indução, isto porquê o aumento da produção de ímanes tem feito com que estes tenham vindo a ter um custo comercial cada vez mais baixo,

beneficiando assim o custo final deste tipo de motores. O facto de a sua eficiência ser superior ao motor de indução é uma razão que permite um maior desempenho por parte do protótipo, isto porque garante-nos utilizar menos células no sistema de armazenamento de energia, logo ter um menor peso no protótipo. Igualmente a densidade de potência do motor de ímanes permanentes é superior ao motor de indução. Ainda como, vantagem temos também o facto de o motor de ímanes permanentes ser mais fácil de controlar e assim não aumentar os custos de engenharia na implementação do controlo do motor, tal como garante uma maior funcionalidade e fiabilidade ao conjunto do sistema de propulsão do protótipo. No momento presente o mais importante para a equipa é ter a máxima eficiência possível em vez de um desempenho superior. Para além do mais inicialmente o protótipo competirá sem sistema de recuperação da energia cinética.

Para além das razões mencionadas as dimensões do motor são muito importantes, pois enquanto o motor de ímanes permanentes tem um comprimento de 18 cm o motor de indução tem 29 cm. Tendo em conta, que a largura de vias na traseira do protótipo é de 140 cm, a melhor opção a nível ergonómico e de acessibilidade aos componentes da traseira do protótipo é o motor de ímanes permanentes.

### 1.5.3 Estado da arte de Fontes de Energia

#### 1.5.3.1 Introdução

As fontes de energia para veículos eléctricos têm sido o principal obstáculo para a comercialização dos mesmos. Assim a principal área de desenvolvimento para o futuro dos veículos eléctricos prende-se com, como realizar o desenvolvimento das fontes de energia, de modo a que os veículos tenham autonomias superiores [2],[17]. De seguida sumariza-se as características que estão relacionadas com a autonomia das fontes de energia:

- Elevada energia específica (kWh/kg) e densidade de energia (kWh/litro)
- Elevada potência específica (kW/kg) e densidade de potência kW/litro)
- Capacidade de carregamento e descarregamento rápido.
- Ciclos de vida longos
- Auto-descarga mínima e eficiência máxima nas cargas
- Seguras e de baixo custo
- Sem necessitarem de manutenção
- Recicláveis

Em vez de utilizar uma única fonte de energia, a utilização de várias fontes de energia, minimiza o compromisso entre a energia específica e a potência específica. Quando se utilizam duas fontes de energia, uma é escolhida pela sua energia específica e a outra é escolhida pela sua potência específica.

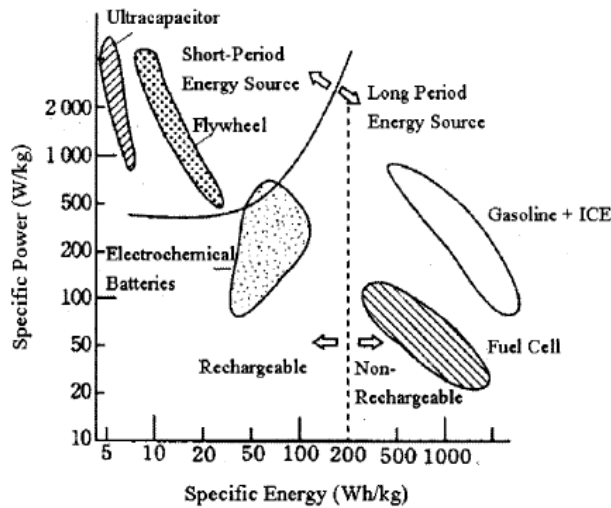


Figura 2 Curva da Energia e Potência específica de vários tipos de acumuladores [17].

### 1.5.3.2 Baterias

As condições de funcionamento de uma bateria variam consoante o tipo de veículo em que é usado. Portanto os requerimentos para o desempenho de uma bateria num veículo eléctrico necessitam de ser totalmente entendidos [20]. Na tabela, seguinte são comparadas as diferentes tecnologias de baterias (VRLA Valve Regulated Lead Acid; Ni-Cd Cádmium Níquel; Ni-MH Níquel Hidretos Metálicos; Li-Polymer Polímeros de Lítio; Li-Ion Iões de Lítio) tendo em conta os seus parâmetros mais relevantes. Estes dados foram recolhidos da USABC (*United States Advance Battery Consortium*).

Tabela 3 Parâmetros essenciais das várias tecnologias de baterias [17].

	<i>Energia Específica (Wh/kg)</i>	<i>Densidade Energia (Wh/l)</i>	<i>Potência Específica (W/kg)</i>	<i>Nº Ciclos</i>	<i>Custo (US\$/kWh)</i>
VRLA	30-45	60-90	200-300	400-600	150
Ni-Cd	40-60	80-110	150-350	600-1200	300
Ni-MH	60-70	130-170	150-300	600-1200	200-350
Zn/Air	230	269	105	N.A	90-120
Li-Polymer	155	220	315	600	N.A
Li-Ion	90-130	140-200	250-450	800-1200	>200

No presente as tecnologias de baterias viáveis para serem implementadas em veículos eléctricos são: as baterias de Níquel Cádmio (Ni-Cd), Hídretos, Metálicos de Níquel (Ni-MH), Polímeros de Lítio (Li-Polymer) e tipos de Iões de Lítio (Li-ion), pois são as únicas com energia e potência específica indicadas para a utilização em veículos. As composições detalhadas das baterias mencionadas podem ser encontradas na referência [2]. Deve realçar-se de que os parâmetros apresentados nas referências são puramente indicativos até porque os valores dos parâmetros mudam de fabricante para fabricante. Mesmo dentro do mesmo fabricante diferentes modelos de uma dada tecnologia de bateria os parâmetros diferem, por questões de compromisso com o número de ciclos e na energia e potência específica. Esses parâmetros estão em constante mudança, devido à constante evolução da tecnologia. De momento, as baterias com maior potencial de utilização são as de ácido chumbo e as de Ni-MH. Estas últimas estão a substituir as de Ni-Cd, por questões ambientais. As baterias de chumbo continuam a ser as que maior potencial apresentam a curto prazo devido ao seu custo e à sua maturidade, no entanto e para a nossa aplicação em concreto, a sua baixa energia específica faz com que o peso final para a energia necessária seja um factor negativo preponderante para o desempenho do protótipo. No entanto e devido à elevada maturidade desta tecnologia será em relação a esta que iremos comparar as outras tecnologias. As baterias de Ni-MH apresentam-se como um candidato de peso para tomar o lugar das baterias de chumbo no mercado, devido ao seu desempenho e custo. No entanto, a médio prazo a tecnologia de Iões de Lítio é considerada por todos os grandes fabricantes desta indústria como a tecnologia com maior capacidade para dominar os mercados nos anos vindouros, até porque tem um terço do peso das baterias de chumbo, e tem oito vezes o ciclo de vida das últimas. Outra tecnologia com potencial é, as baterias de Ar Zinco (Zn-Air) devido à sua elevada energia específica. Apesar de as baterias de Zn-Air serem as mais dotadas no campo da energia específica, este tipo de bateria não pode receber energia proveniente de uma travagem regenerativa. Como tal não será considerada como hipótese. Poderá ser uma opção no futuro, quando se implementar um sistema de armazenamento de energia híbrido, ou seja, com dois tipos de tecnologia. As tecnologias mais utilizadas actualmente são: as baterias de Ni-MH e Iões de Lítio. As baterias de Ni-MH são as que equipam o sistema de armazenamento dos *Toyota Prius*, no entanto, para os modelos futuros é muito provável de que devido à compra da *Sanyo* por parte da *Panasonic*, a primeira com um elevado conhecimento em baterias de Iões de Lítio e a última com contrato para equipar os sistemas de armazenamento de energia dos veículos da *Toyota*. Que os futuros veículos híbridos e eléctricos da *Toyota* sejam dotados desta tecnologia [5]. No entanto, esta compra por parte da *Panasonic* deveu-se essencialmente ao facto de actualmente as vendas de veículos híbridos da *Toyota* serem de tal forma elevados de que a marca provavelmente será obrigada a cancelar entregas pois a *Panasonic* não tem capacidade de produção para a procura que existe neste momento no mercado japonês, para o modelo *Prius*. Recentemente a *Toyota* anunciou que em parceria com uma Universidade Japonesa descobriu uma maneira de utilizar menos grafite na composição química das baterias de Iões de Lítio. Isto deixa mais espaço para armazenar os Iões que criam a carga eléctrica. Segundo a *Toyota* este avanço na capacidade de armazenamento é elevado e permitirá armazenar até 10 vezes mais Iões o que poderá resultar num aumento de 10 vezes na autonomia da bateria. No entanto a marca realçou

que ainda será necessário realizar mais testes e que só dentro de 5 a 10 anos é que a tecnologia poderá estar nos seus veículos de série.

O *Tesla Roadster* [2], veículo da *Tesla Motors* empresa que está sediada em *Sillicon Valley* utiliza baterias de íões de lítio neste seu primeiro modelo. O veículo é composto por pouco mais de 6800 células idênticas às que dotam os actuais portáteis ou telemóveis. Para fazer funcionar correctamente todas estas células que compõe o sistema de armazenamento do veículo, o grande trabalho por parte do departamento técnico da marca, centrou-se nos complexos sistemas de arrefecimento e de balanceamento para as cargas e descargas das células. O departamento técnico descobriu também que se diminuísse a carga da célula em 5 %, ou seja, em vez de ter cada célula à 4,2 V se as colocasse à 4,15 V, a equipa técnica conseguia aumentar a autonomia da bateria. Os números associados a esse aumento não são disponibilizados pela Tesla. Com os sistemas e técnicas mencionados, a marca maximiza o tempo de vida das células de modo a poder garantir aos consumidores uma longevidade de 5 anos e 160 934.4 km para o sistema de armazenamento de energia. A autonomia do veículo é anunciada pela marca como sendo de 390 km, mas dependendo do ciclo de utilização. Para atingir a dita autonomia o sistema de armazenamento pesa 408 kg e é composto por 11 módulos de 4,8 kW/h cada. A marca tem também, já planeado onde e como irá reciclar às suas baterias. As mesmas respeitam às directrizes ambientais impostas por: Directive on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment 2002/95/EC.

Concretamente no universo das competições *Formula Student*, a esmagadora maioria das equipas utiliza a tecnologia de íões de lítio. Realça-se a equipa de Hertfordshire por este ano ter vencido a competição e estar equipada com baterias de lítio ferro fosfato. Tecnologia que por ser a mais segura no universo das de lítio, tem vindo recentemente a ganhar terreno em relação as demais tecnologias do mesmo tipo. Embora a densidade de energia é um pouco inferior as células de lítio cobalto (tipo de células idênticas às dos equipamentos móveis) as  $\text{LiFePO}_4$ , são muito mais robustas e oferecem um ciclo de vida muito superior. Entre 2000 a 3000 ciclos. Esta característica torna-as mais seguras e economicamente mais viáveis. As baterias do veículo da faculdade de *Hertfordshire* são fornecidas pela *LiFeBATT* [4] são caracterizadas por uma autonomia de 10Ah. As baterias pesam 24,5 kg, já com o sistema de balanceamento para as células incluído. As células de  $\text{LiFePO}_4$  são seguras pelo facto do material do cátodo ser fosfato. O fosfato é extremamente estável em situações de curto-circuito ou de sobrecarga e para além do mais tem a capacidade de suportar elevadas temperaturas sem se decompor. A molécula de fosfato não é propensa a ter fugas térmicas e não arde. Em suma, apesar de uma densidade de energia menor que células de lítio dotadas de outros materiais no cátodo, as  $\text{LiFePO}_4$  são fundamentalmente mais seguras, devido ao fosfato.

### 1.5.3.3 Ultra-condensadores

Devido ao regime transiente em que o protótipo se encontra, o perfil de descarga da bateria é extremamente variável. O valor médio de potência requerido à bateria é relativamente baixo, enquanto nos picos de potência normalmente requeridos aquando das acelerações, esse valor é muito mais elevado. Como já foi anteriormente mencionado actualmente as baterias têm de encontrar o melhor compromisso entre o número de ciclos e entre a energia e potência específica. A dificuldade em encontrar valores elevados para estes três parâmetros levou a que se sugerisse que os veículos eléctricos fossem dotados de uma fonte de energia com dois tipos de tecnologia. Em que uma das fontes seria para maximizar a autonomia do veículo enquanto a fonte secundária seria utilizada nos momentos de aceleração. Esta fonte auxiliar seria também recarregada através de um sistema de reaproveitamento de energia, que seria mais eficiente pois a tecnologia apresenta uma potência específica elevada. É neste contexto que surgem os ultra condensadores. Os ultra-condensadores não podem ser utilizados como a única fonte de energia devido, à sua energia específica muito baixa. No entanto, num sistema em que disponha de duas fontes de energia os ultra condensadores com a sua elevada potência específica que permitem uma elevada capacidade de entrega de potência à carga, permitem correntes de descarga elevadas em curtos espaços de tempo, o que permite para situações de aceleração que se poupe a bateria e assim obter desta, um maior número de ciclos e uma maior autonomia. Como os ultra-condensadores têm a capacidade de entregar e receber maiores quantidades de energia comparativamente às baterias, são igualmente uma solução mais adequada para a questão da recuperação de energia, nas travagens [19],[22].

De acordo com os objectivos que foram colocados pelo Departamento de energia dos EUA, (*US Department of Energy*) para a integração dos ultra-condensadores em veículos eléctricos os valores pretendidos de energia e potência específica, a curto - médio prazo são: 5Wh/kg e 500W/kg respectivamente. Enquanto a médio - longo prazo o objectivo é atingir os valores de 15Wh/kg e 1600W/kg, para a energia e potência específica. Até agora nenhum destes valores é atingido pelos ultra-condensadores disponíveis no mercado, não obstante os fabricantes continuam a investir no desenvolvimento desta tecnologia. A finalizar esta secção, deixamos uma pequena referência a uma tecnologia que surgiu recentemente, mas que até ao momento não reúne consenso na comunidade científica. De facto a maioria é céptica quanto ao funcionamento desta tecnologia porque até ao momento nada a funcionar foi demonstrado. Apesar de aqui enunciado, tecnologias do tipo dos ultra-condensadores não serão consideradas para implementação no protótipo. As tecnologias a ter em conta para a implementação no sistema de armazenamento do protótipo, serão as células de LiFePO<sub>4</sub> pelo seu elevado potencial a nível de autonomia e pela sua segurança.



## 2 Modelação da Dinâmica do Protótipo

### 2.1 Introdução

Para quaisquer veículos, uma previsão do seu desempenho quer a nível de capacidade de aceleração, velocidade e autonomia é importante. A questão torna-se ainda mais relevante quando o veículo é um protótipo em que se pretende ao mesmo tempo um elevado desempenho e uma autonomia suficiente para cumprir uma distância de 22 km no mais curto espaço de tempo. Como tal, questões como o peso dos componentes do grupo propulsor são de elevada importância. Basta por exemplo pensar que ao dotar o protótipo de um sistema de armazenamento de energia com uma capacidade superior, permitirá ao protótipo uma maior autonomia e dotá-lo de uma maior quantidade de energia para a distância a cumprir, no entanto essa opção tem um custo e esse custo é um peso superior por parte do protótipo. Como tal e como veremos ao longo desta dissertação, a opção terá de passar por gerir de forma eficiente todos os recursos energéticos. Pretende-se implementar um modelo que nos permita entender e explorar quais as melhores soluções a nível energético. Tendo sempre em conta, quais das soluções permitem um protótipo mais rápido, mas igualmente capaz de cumprir os 22 km da prova principal, o *Endurance*.

Pretende-se neste capítulo introduzir as várias forças que interagem com o movimento do protótipo mas só no campo longitudinal. Assim deste modo, pretende-se especificar um ciclo, no qual se descreve a velocidade do protótipo num dado instante de tempo e que corresponde à sua presença num dado ponto da pista. O ciclo foi criado tendo em conta dados recolhidos do protótipo FST-03 no circuito de *Hockenheim*, aquando da sua participação na FSG em 2008. Conhecendo a solicitação por parte do piloto, durante uma prova e tendo em conta as várias forças longitudinais que interagem com o movimento do protótipo, podemos calcular qual deverá ser o binário ou velocidade de rotação do motor num dado instante para que o mesmo disponha essa potência às rodas de modo a que a solicitação por parte do piloto, seja satisfeita.

### 2.2 Força de tracção

O primeiro passo para a modelação de um veículo sobre o seu desempenho é descrever a equação para a força de tracção. Esta força é, a força que irá propulsionar o protótipo para frente, força essa que é transmitida para o chão através das rodas. Na figura 3 é considerado um veículo de massa  $m$ , que se desloca a uma velocidade  $v$ , a subir uma dada inclinação com um ângulo  $\Psi$ , a força de tracção tem de ultrapassar as seguintes forças:

- Força de atrito de rolamento
- Força de arrasto aerodinâmico

Providenciar a força necessária para ultrapassar a componente do peso na subida de um plano inclinado com um ângulo  $\Psi$ .

Acelerar o veículo, caso a velocidade não seja constante

Vamos considerar cada uma delas individualmente na secção seguinte.

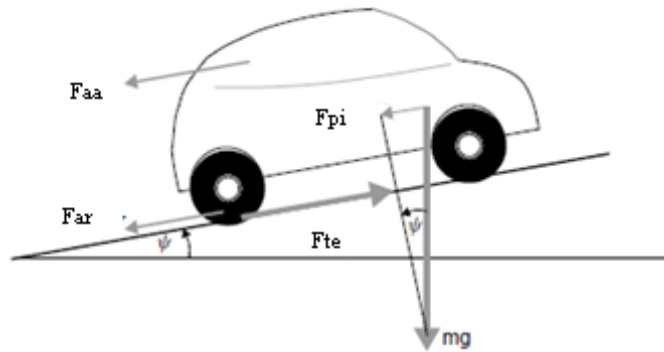


Figura 3 Projecção das forças num veículo a subir um plano inclinado.

### 2.2.1 Força de atrito de rolamento

A força de atrito de rolamento deve-se principalmente ao atrito entre os pneus e à superfície de contacto, ou seja, a pista. O atrito de rolamento é aproximadamente constante e raramente depende da velocidade do veículo. É proporcional ao peso do veículo, como se verifica na equação:

$$F_{ar} = \mu_{ar} mg \text{ [N]} \quad (2.1)$$

onde  $\mu_{rr}$  é o coeficiente de atrito. Os factores que mais influenciam o coeficiente de atrito são o tipo de pneu, ou seja, o seu composto e a pressão do mesmo. O valor de  $\mu_{rr}$  portanto mudará consoante o tipo de superfície, pressão e os pneus utilizados. No entanto para o estudo a efectuar basta-nos tomar um valor típico de referência. Esse valor é  $\mu_{rr} = 0,007$ . Este valor é o característico do composto utilizado pelo protótipo FST-03.

### 2.2.2 Força de arrasto aerodinâmica

Esta força deve-se ao atrito gerado entre o ar e o corpo do veículo. É função da área frontal, forma, da existência de entradas de ar ou espelhos, entre outro tipo de itens que possam influenciar a

forma como o ar atravessa o protótipo. A equação que descreve a força de atrito aerodinâmico é dada por:

$$F_{aa} = \frac{1}{2} A \rho C_d v^2 [\text{N}] \quad (2.2)$$

onde  $\rho$  é a densidade do ar,  $A$  é a área frontal do protótipo e  $v$  é a velocidade do veículo.  $C_d$  é uma constante chamada de coeficiente de arrasto. O coeficiente de arrasto pode ser reduzido com boa engenharia aplicada na concepção do veículo. Tipicamente o valor de  $C_d$  é de 0,3, no entanto os veículos eléctricos têm conseguido valores na ordem dos 0,19. Tal deve-se ao facto, de terem uma maior liberdade onde colocar os componentes, de necessitarem de menos entradas de ar e de não terem tubos de escape a passar por baixo do veículo. No caso em específico o valor de  $C_d$  é assumido com o valor de 0,36. A área frontal foi estimada em SolidWorks e a mesma tem o valor de  $0,72 \text{ m}^2$ .

### 2.2.3 Força para subir um plano inclinado

A força necessária para que um veículo suba um plano inclinado é dada pela componente do seu peso que trabalha ao longo do plano inclinado. Portanto a equação é dada por:

$$F_{hc} = mg \sin(\psi) [\text{N}] \quad (2.3)$$

No nosso caso em concreto esta força, não é tida em conta pois as pistas são completamente planas.

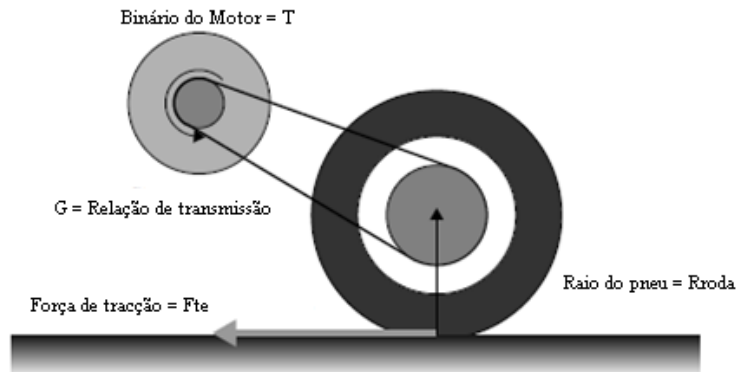
### 2.2.4 Força de aceleração

Se a velocidade do veículo está a mudar, então é claro, que será necessário aplicar uma força adicional à que vimos na figura 2.1. Esta força irá dar a aceleração linear do veículo e é dada pela conhecida equação de Newton, da sua 2ª lei,

$$F_{la} = ma [\text{N}] \quad (2.4)$$

No entanto, para que seja descrita de uma forma mais completa a força necessária para acelerar o veículo, deveremos considerar também a força necessária para fazer com que as peças que rodam, rodem mais depressa. Por outras palavras necessitamos de considerar a aceleração angular. A questão principal que se pretende levantar, tem a ver com o facto de o motor eléctrico ter rotações elevadas, ou seja, velocidade angular elevada. Olhando para a figura 4, claramente

identifica-se o eixo onde o binário é transmitido. Se  $G$  é a relação de transmissão do sistema, que liga o motor ao eixo e  $T$  é o binário do motor, então podemos dizer que:



**Figura 4 Representação simples da ligação entre o motor eléctrico e a roda.**

$$T = Fte \frac{r}{G} \text{ [N.m]} \quad (2.5)$$

$$Fte = \frac{G}{r} T \text{ [N]}$$

$$\omega_{veio} = \frac{v}{r}, \text{ [rad/s]} \quad (2.6)$$

Portanto a velocidade angular do motor é:

$$\omega = \frac{Gv}{r}, \text{ [rad/s]} \quad (2.7)$$

Do mesmo modo, a aceleração angular do motor é dada por:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{Ga}{r} \text{ [rad/s}^2\text{]} \quad (2.8)$$

Portanto o binário necessário para uma dada aceleração angular é:

$$T = \frac{IGa}{r} \text{ [N]} \quad (2.9)$$

Onde  $I$  é o momento de inércia do rotor do motor eléctrico. A força necessárias nas rodas para uma dada aceleração angular é determinada combinando a equação (7.9) com a equação (7.5). Assim temos:

$$F_{\omega a} = \frac{IG^2 a}{r^2} \text{ [N]} \quad (2.10)$$

Deve-se constatar, que nestas equações considera-se sempre que o sistema de engrenagens e velocidades é 100% eficiente, ou seja, sem perdas. Como o sistema será muito simples a sua eficiência será bastante elevada. No entanto nunca será de 100% e como tal devemos reescrever a equação anterior tendo em conta a eficiência do sistema  $\eta_g=0,97$ . Agora a força necessária será um pouco superior, devido às perdas. Assim a equação (2.10) é:

$$F_{\omega a} = \frac{IG^2 a}{\eta_g r^2} \text{ [N]} \quad (2.10)$$

Tipicamente a força da aceleração angular será muito menor que a força de aceleração linear. Normalmente para este tipo de protótipos a força de aceleração angular será 5 % o valor da força de aceleração linear [6].

## 2.2.5 Força de total de tracção

A força de tracção total é dada pela soma de todas as forças:

$$F_{te} = F_{ar} + F_{aa} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a} \text{ [N]} \quad (2.11)$$

Onde,

- $F_{ar}$  é a força de atrito de rolamento, dada na equação (2.1)
- $F_{aa}$  é a força de arrasto aerodinâmico, dado pela equação (2.2)
- $F_{pi}$  é a força necessária para subir um plano inclinado dado pela equação (2.3)
- $F_{la}$  é a força necessária para dotar o veículo de aceleração linear
- $F_{\omega a}$  é a força necessária para uma dada aceleração angular para o motor em rotação, a equação é dada por (2.10)

Deve-se ter em atenção de que  $F_{la}$  e  $F_{\omega a}$  serão negativas se o veículo estiver a desacelerar.

$$F_{te} = \mu_{ar} mg + 0.625ACd v^2 + \left(m + \frac{IG^2}{\eta_g r^2}\right) \frac{dv}{dt} \text{ [N]} \quad (2.12)$$

Substituindo a equação (2.5), em (2.12) tem-se:

$$\frac{G}{r}T = \mu_{ar}mg + 0.625ACdv^2 + \left(m + \frac{IG^2}{\eta gr^2}\right) \frac{dv}{dt} \quad (2.13)$$

Resolvendo em ordem à T tem-se:

$$T = \frac{\left(\mu_{ar}mg + 0.625ACdv^2 + \left(m + \frac{IG^2}{\eta gr^2}\right) \frac{dv}{dt}\right)r}{G} \text{ [N.m]} \quad (2.14)$$

## 2.3 Conclusão

Com estas equações que com o modelo totalmente completo, permitir-nos-á obter uma noção das necessidades energéticas do protótipo para uma dada solicitação em pista. Servirá também para compreender se os componentes que compõem o sistema de armazenamento de energia e os motores eléctricos são os mais indicados para a aplicação ou se os mesmos se encontram sob ou sobre dimensionados.

## 3 Sistemas de Armazenamento de Energia

### 3.1 Introdução

Embora existam há mais de um século as baterias são a tecnologia que têm a introdução do veículo eléctrico no mercado. Com a crescente necessidade de melhorar a eficiência energética, tem-se fomentado a procura de uma solução para o armazenamento de energia. As baterias, dispositivos electroquímicos que têm por base reacções de oxidação e redução, surgem como possíveis soluções. A nível das baterias existem varias tecnologias em que a diferença principal reside nos materiais constituintes do ânodo, cátodo e electrólito. Dos dispositivos actualmente disponíveis para armazenar energia eléctrica, são as baterias que possuem maior maturação. No caso de aplicação à locomoção nunca houve um desenvolvimento significativo devido ao uso sistemático dos combustíveis fósseis, caracterizados por uma elevada densidade de energia.

Nos últimos anos tem-se assistido a um grande desenvolvimento nas baterias de iões de lítio, procurando maior longevidade, segurança, desempenho e menor tempo de carga. Neste momento são estas as baterias mais promissoras, dado a grande densidade de energia e de potência, ausência do efeito de memória e necessidade de manutenção.

O carácter económico associado às novas tecnologias dificulta o acesso a informação técnica. Informações referentes as composições químicas das baterias ou outro tipo de informações poderão ser encontradas nas seguintes referências [2].



**Figura 5 Veículo eléctrico que em 1899, estabeleceu o record de velocidade.**

## 3.2 Factores que afectam o desempenho das baterias

A energia que uma bateria consegue fornecer é diferente da teoricamente armazenada, o seu desempenho pode variar completamente dependendo das condições a que está sujeita. Existem muitos factores com influências mútuas entre si que influenciam as características operacionais da bateria. Nos próximas subsecções apresentar-se-á alguns desses efeitos.

### 3.2.1 Nível de tensão

As células que compõem a bateria de um veículo têm uma tensão nominal, é esse o valor que apresenta aos seus terminais quando estão a fornecer uma dada potência. Quando uma corrente é fornecida a uma carga, a tensão cai; quando a bateria é carregada a tensão sobe. Este fenómeno é expresso em termos da resistência interna. A bateria é representada por ter uma tensão fixa  $E$ , mas a tensão aos terminais da bateria é um valor diferente devido a queda de tensão existente na resistência interna  $R$ . Assumindo uma corrente  $I$  constante que está a alimentar um dado circuito, podemos através da lei das malhas escrever:

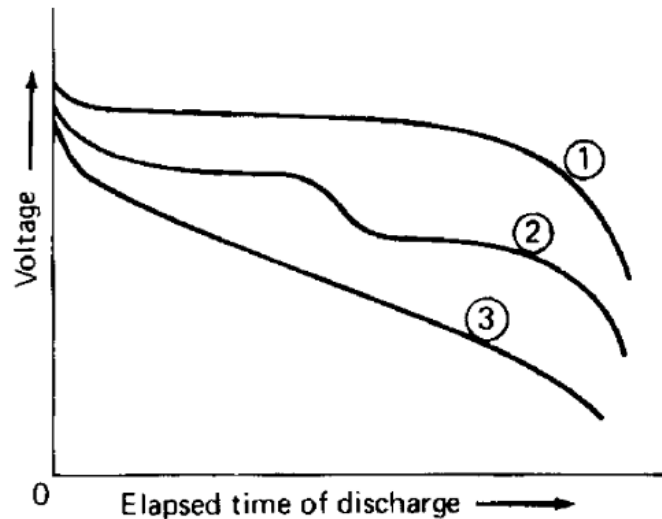
$$V = E - IR \text{ [V]} \quad (3.1)$$

Se a corrente  $I$  for zero então a tensão terminal é igual a  $E$ , como tal é usual chamar  $E$  de tensão de circuito aberto. Se a bateria esta a ser carregada então é claro que a tensão irá aumentar com um valor igual ao produto da corrente com a resistência interna. Para baterias de uso de tracção eléctrica é necessário que a resistência interna seja o mais baixo possível. No entanto, o valor da tensão de circuito aberto não é constante, pois depende de factores como o estado da carga e temperatura.

O nível de tensão influencia também as reacções que ocorrem ao nível das baterias. Há diferentes tipos de tensões referentes a uma bateria:

- tensão teórica, função dos materiais do ânodo e cátodo, em dadas condições
- tensão em vazio, tensão sem existência de qualquer carga
- tensão nominal, geralmente aceite para tensão típica de operação.
- tensão de corte, tensão em que se define bateria descarregada





**Figura 6 Perfil de descarga para 3 tipos de sistemas electroquímicos [2].**

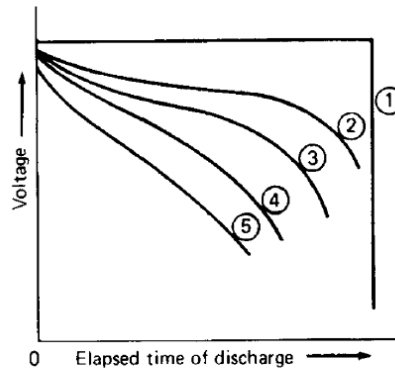
Usando como exemplo uma célula de chumbo, a tensão teórica é 2,1 V, a tensão nominal 2 V, a tensão de operação entre 1,8 V e 2 V, a tensão de corte 1,75 V para intensidades de corrente baixas e 1,5 V para intensidades de corrente elevadas. Em carga a tensão varia entre 2,3 e 2,8 V. A forma da curva de descarga ou carga pode variar com o sistema electroquímico, como se constata na figura 6.

- A curva 1 é a mais constante para valores de tempo intermédios, e representa um sistema electroquímico onde o efeito da mudança da concentração dos reagentes e dos produtos da reacção tem efeito mínimo até praticamente à descarga.
- A curva 2 representa um sistema com duas fases, indicando uma mudança no mecanismo das reacções. Um exemplo deste efeito acontece quando existe o enriquecimento de Li no cátodo, que acaba por alterar o potencial da bateria.
- A curva 3 é típica de um sistema em que a tensão e a resistência interna varia com a mudança na concentração dos reagentes e produtos.

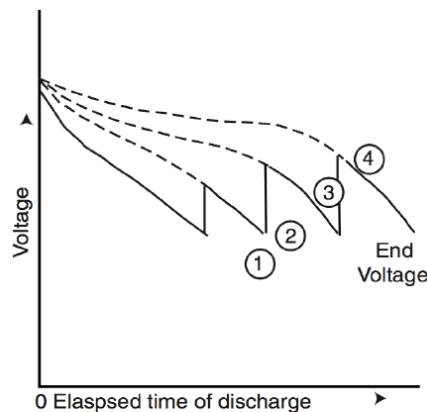
### 3.2.2 Corrente de descarga

O conjunto das perdas óhmicas e de polarização variam não linearmente com a intensidade da corrente, correspondendo a maiores perdas, como é ilustrado na equação 3.1. A maior corrente de descarga implica maiores perdas e também tensão de trabalho menor, o que torna a longevidade da bateria menor. Existem vários métodos para definir correntes de carga ou descarga nas baterias. É usual junto dos fabricantes referirem-se à corrente de descarga de uma bateria em função da

capacidade nominal da mesma, ou seja, se a capacidade nominal da bateria é 10 Ah então quer dizer que a mesma tem a capacidade de dar 10 A contínuos durante 1h, ou 1 A durante 10 h. No entanto, é necessário realçar que a medida que a corrente que é solicitada continuamente à bateria aumenta, provoca efeitos que levam a bateria a descarregar num intervalo de tempo menor ao que se esperava.



**Figura 7 Bateria descarregada a várias intensidades de corrente, intensidade crescente de 1 a 5 [2].**

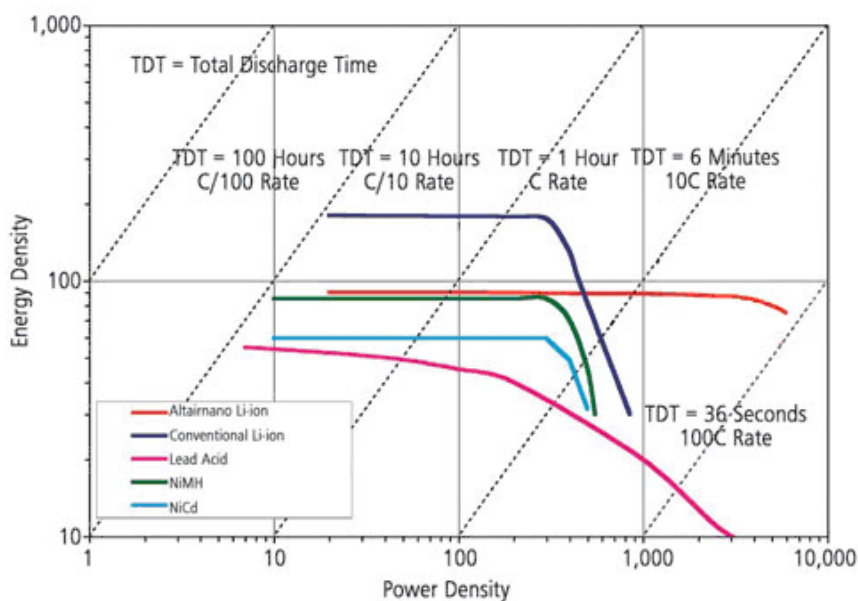


**Figura 8 Baterias descarregada a uma intensidade de corrente elevada (1) e mudança sucessiva para correntes inferiores quando se atinge tensão de corte [2].**

Na figura 7, tem-se uma bateria a ser descarregada a várias intensidades de corrente, intensidade crescente de 1 a 5. Na figura 8 tem-se um gráfico de uma bateria a ser descarregada a uma intensidade de corrente elevada (a corrente 1 é a mais elevada e 5 a mais baixa) e mudança sucessiva para correntes inferiores quando se atinge tensão de corte. Ou seja, quanto menor a corrente de descarga maior será a tensão da bateria o que por consequência permitirá uma maior autonomia por parte da mesma.

### 3.2.3 Potência e Energia específica

A energia específica é a quantidade de energia que é armazenada em cada kg de uma dada bateria. Tem as unidades em Wh/kg. Conhecendo as necessidades energéticas de um dado sistema é com este dado referente à tecnologia utilizada que se pode conhecer uma primeira aproximação do peso total do sistema de armazenamento de energia. A potência específica refere-se à quantidade de potência disponível por cada kg. É um parâmetro altamente variável e depende essencialmente da carga a que o sistema de armazenamento está sujeito. É altamente recomendável que não se opere com as baterias junto dos valores de potência máxima por mais do que alguns segundos, para garantir uma maior longevidade às baterias e para que as mesmas operem de uma forma mais eficiente. Os gráficos de Ragone são utilizados para comparar o compromisso que se assume num dado tipo de baterias no que concerne à potência e energia específica. Note-se que os gráficos são dispostos numa escala logarítmica. A figura 9 demonstra que a tecnologia de lítio detém a maior densidade de energia. As células da Altairnano são dotadas de uma elevada densidade de potência, mas de uma baixa densidade de energia, como se pode verificar na figura.



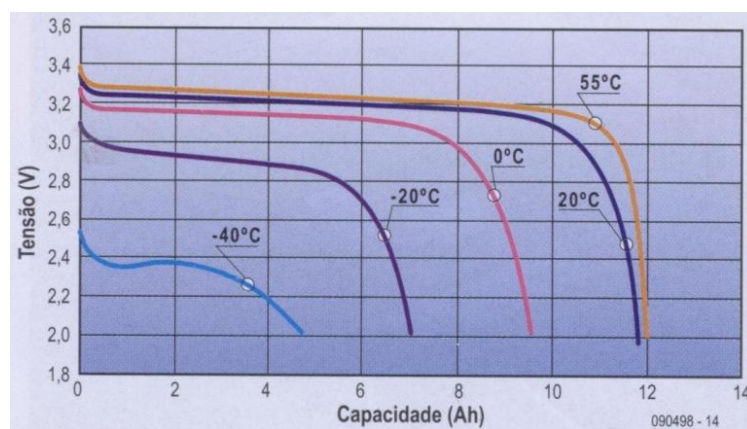
**Figura 9 Gráfico de Ragone para diferentes tecnologias [18].**

O gráfico de Ragone compara o desempenho de diferentes tipos de sistema de armazenamento electroquímicos. Constata-se que os ultra-condensadores têm a capacidade de entregar potências elevadas no entanto, a sua capacidade de armazenar energia é baixa. Os declives presentes no gráfico indicam o tempo relativo para a carga ou descarga de um dado tipo de dispositivo. Num extremo temos a potência que pode ser fornecida ou recebida em questões de micro - segundos. Isto permite que os mesmos sejam ideais para sistemas de recuperação de energia, tendo em conta que uma travagem é uma questão de um segundo. Por outro lado temos as células

de combustível que têm um desempenho dinâmico demasiado lento, pois demoram minutos para fornecer ou receber energia. As baterias de lítio surgem como a solução com o melhor compromisso, para armazenar energia e para fornecer/receber energia.

### 3.2.4 Temperatura

A temperatura a que uma bateria é sujeita tem influências ao nível da longevidade e das características da tensão, devido à redução ou aumento da actividade química. A baixas temperaturas a actividade é menor, a resistência interna é maior, o que implica maiores perdas e menor capacidade. Quando as temperaturas são elevadas existe em norma o efeito contrário.



**Figura 10 Variação da capacidade das células para diferentes temperaturas [22].**

É o que se constata na figura 10, para temperaturas superiores o tempo de descarga é maior, pois a actividade química é superior e a resistência interna é menor o que permite uma maior eficiência por parte da bateria. É por esta razão que em países nórdicos os veículos têm de ser ligados à rede para não permitir que os componentes atinjam temperaturas negativas.

### 3.2.5 Auto descarga

Todas as baterias descarregam sempre que não são utilizadas durante longos períodos de tempo. As taxas de descarga dependem do tipo de baterias, da temperatura a que estão sujeitas, tal como da idade das mesmas.

### 3.2.6 Ciclo de vida das baterias

A longevidade das baterias depende sobretudo da temperatura, do modo e amplitude da corrente de descarga. A figura 11 ilustra a dependência da idade (definida em termos de ciclos ou horas de funcionamento) em função da intensidade de corrente e da profundidade de descarga (Depth-of- Discharge (DOD)). A maior parte das baterias só têm capacidade de serem recarregadas algumas centenas de vezes. O número irá depender do tipo de tecnologia utilizada e modo de utilização. No entanto, a tecnologia de íões de lítio tem a capacidade até 2000 ciclos de descarga, ao contrário das de ácido chumbo que se quedam entre 300 a 500 ciclos, consoante o fabricante. Como tal é um parâmetro essencial na escolha da tecnologia a utilizar para uma dada aplicação, pois o custo pode ser amortizado ao longo dos vários anos de utilização.

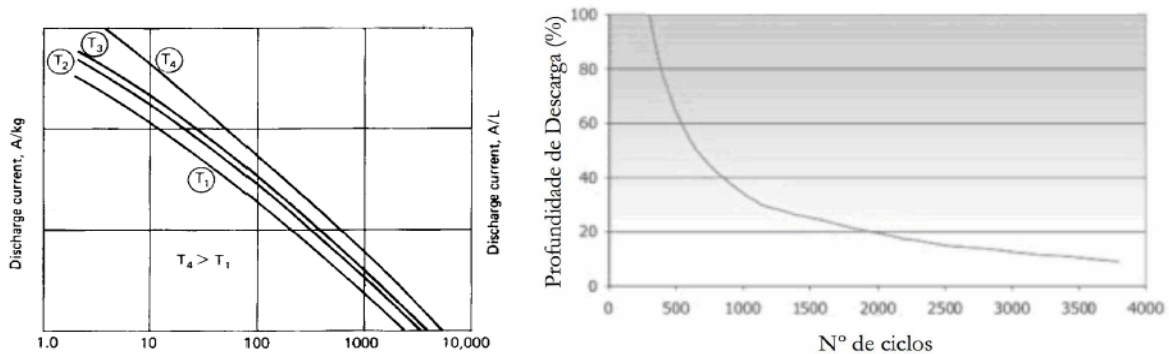


Figura 11 Influência da temperatura no número de ciclos [2].

A temperatura influencia o número de ciclos que uma bateria pode atingir, pelas mesmas razões que influencia a capacidade da mesma. É o que se verifica na figura da esquerda. Na figura da direita verifica-se que para 1000 ciclos, a profundidade de descarga é só de 40%. Ou seja, a capacidade da bateria é já só de 60%.

### 3.3 Tecnologias de baterias

Nesta secção iremos analisar dois tipos de tecnologia de baterias. Tendo em conta, que se pretende modelar um *Formula Student* eléctrico e que o seu objectivo consiste num veículo que se pretende rápido e com uma capacidade de aceleração elevada, a tecnologia a utilizar será à de baterias de lítio ferro fosfato (LiFePO<sub>4</sub>) por serem as mais seguras no universo das tecnologias de lítio. Assim e visto que as baterias de chumbo são a tecnologia com maior referência pois existem a mais de 100 anos, será com elas que iremos realizar todas as comparações em relação às primeiras.

Mas antes, iremos apresentar ambas as tecnologias, as suas reacções químicas mais conhecidas do ânodo e do cátodo, as suas vantagens e desvantagens, assim como as suas características técnicas. Iremos também abordar de uma forma sumária os ultra-condensadores, pois no futuro serão um sistema de armazenamento a ter em conta em versões futuras dos protótipos FST. Como se verifica na figura 12 as baterias de lítio são as que apresentam o melhor compromisso entre potência e energia específica. De igual modo, verifica-se que as baterias de chumbo são as que apresentam a menor quantidade de energia específica em relação as demais tecnologias.

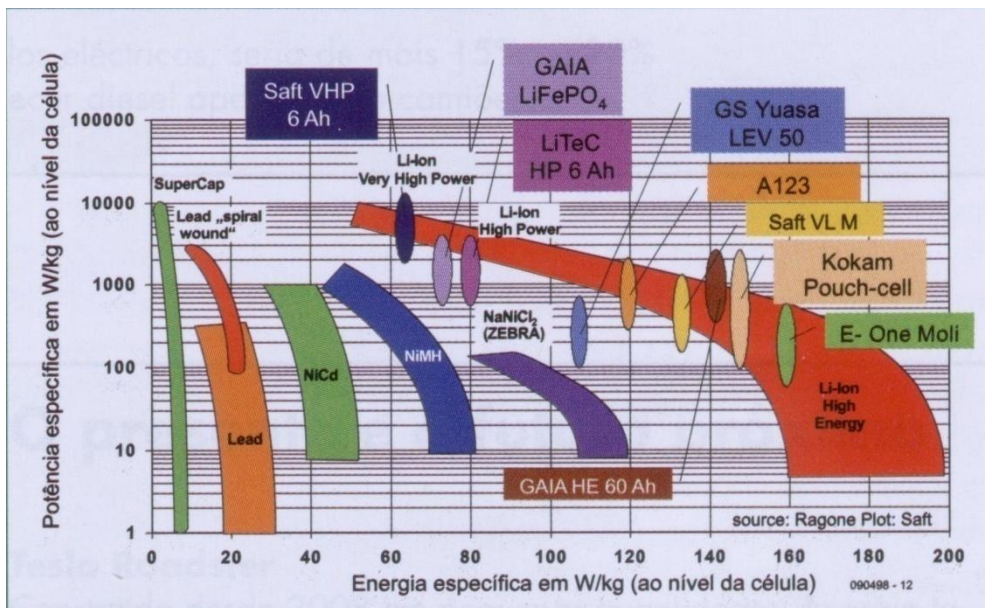


Figura 12 Densidade de potência e energia para diferentes tecnologias de baterias [19].

### 3.3.1 Baterias de Chumbo

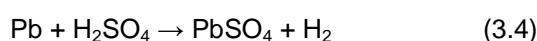
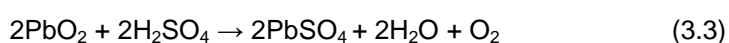
Cada célula de uma bateria de ácido chumbo carregada, contém eléctrodos de chumbo  $P_b$  e  $P_bO_2$  emersos num electrólito de ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ . Quando a bateria está descarregada ambos os eléctrodos se convertem em sulfato de chumbo  $P_bSO_4$ . As reacções no ânodo e no cátodo são as seguintes:

As baterias mais conhecidas e utilizadas em veículos eléctricos no passado foram as baterias de chumbo. Estas baterias foram e têm sido utilizadas nos veículos de motores de combustão interna. No entanto, para veículos eléctricos as baterias de chumbo utilizadas são compostas por um gel ao invés do comum líquido no electrólito. As placas estão submersas num electrólito que é composto por ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ . O ácido sulfúrico combina com o chumbo e com o dióxido de chumbo para produzir sulfato de chumbo  $P_bSO_4$  e água enquanto é produzida energia eléctrica durante o processo. A reacção total é:



Ambas as reacções resultam na formação de sulfato de chumbo. O electrólito gradualmente perde o ácido sulfúrico e torna-se mais diluído, ou seja, com mais água. Quando estas baterias são carregadas os eléctrodos revertem para chumbo e dióxido de chumbo. O electrólito recupera o ácido sulfúrico e a sua concentração aumenta.

Infelizmente as reacções apresentadas anteriormente não são as únicas que ocorrem. O chumbo e o dióxido de chumbo não são estáveis em ácido sulfúrico e decompõe-se embora muito lentamente com as seguintes reacções no eléctrodo positivo e negativo respectivamente:



O resultado é uma auto descarga considerável da bateria. A taxa a que esta descarga ocorre depende na temperatura da célula: mais rápido se mais quente. Depende também de outros factores, como a qualidade dos componentes. Estas reacções indesejadas, que também produzem oxigénio e hidrogénio como gases ocorrem quando a bateria esta a ser descarregada. De facto as reacções ocorrem mais rápido se a bateria esta a ser descarregada devido à quebra da tensão nas células. Isto resulta na perda de carga e que ocorre de uma forma mais acentuada quando a bateria é descarregada mais rapidamente. A descarga não será igual em todas as células que compõe a bateria, ou seja, haverá células mais descarregadas que outras. Isto tem consequências importantes, na maneira em como as baterias serão carregadas. Quer isto dizer que no momento de carregar a bateria haverá células que terão de tolerar o facto de serem sobrecarregadas, de modo a que todas as células sejam carregadas.

**Tabela 4 Vantagens e desvantagens das células de ácido de chumbo [17].**

Vantagens	Desvantagens
Fiabilidade mais de 100 anos de desenvolvimento	Peso e volume
Tolerante a cargas	Perigo de sobreaquecer durante a carga
Robusto	Não adequado a carregamentos rápidos
Resistência interna baixa	Químicos tóxicos
Pode fornecer correntes elevadas	Taxas elevadas de descarga provocam perdas de material no eléctrodos
Disponível em diferentes formatos e capacidades	

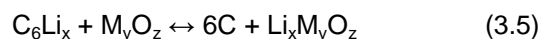
As características técnicas das baterias de chumbo encontram-se resumidas na tabela seguinte:

**Tabela 5 Características técnicas baterias de chumbo [17].**

Densidade de energia	30-40 Wh/kg
Energia/volume	60-75 Wh/l
Densidade de potência	180W/kg
Rendimento de carga/descarga	70% - 92%
Energia/custo – módulo	64,58 €/ kWh
Taxa de auto descarga	20% / mês
Número de ciclos de carga	500 - 700
Tensão nominal da célula	2.0 V

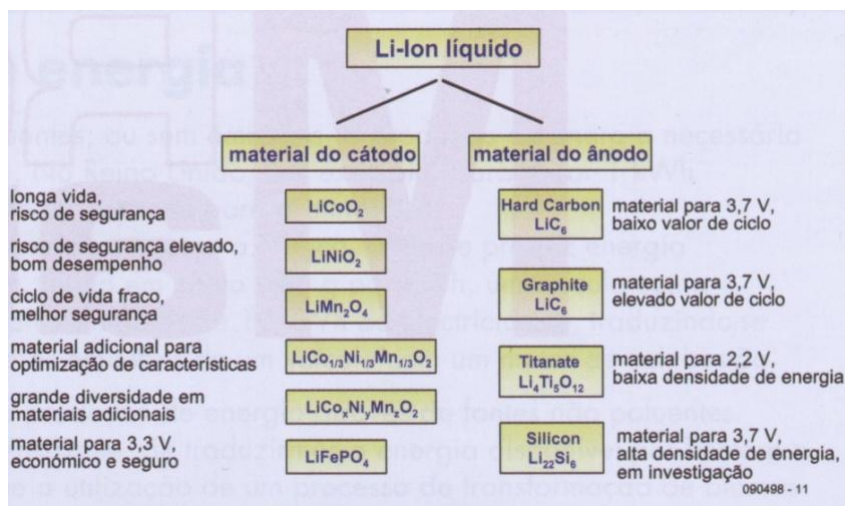
### 3.3.2 Baterias de Lítio

A tecnologia de iões de lítio foi introduzida no mercado no início da década de 90. A energia eléctrica é obtida a partir da combinação de carbono com o lítio e óxido de metal de lítio, que forma carbono e óxido de lítio. A reacção química é dada pela seguinte equação:



A carga eléctrica é transportada nas baterias de iões de lítio, precisamente por iões de lítio, sendo as suas duas maiores vantagens a elevada tensão de saída e a boa relação capacidade/peso. O eléctrodo e o separador podem ser feitos de vários modos, cada um com determinados custos e características, como se pode verificar na figura 13. Para o electrólito podem ser utilizadas soluções líquidas baseados em solventes orgânicos e sais de lítio condutores ou soluções sólidas ou em gel, tal como utilizado nas baterias de LiFePO<sub>4</sub>. Este tipo, em particular, está disponível em várias formas. A escolha do separador é importante, tanto para o custo de fabrico, como também para a segurança de utilização das baterias.





**Figura 13** Diferentes eléctrodos para diferentes tecnologias de lítio, com diferentes características.

O separador está no líquido do electrólito e a sua única razão é não permitir a mistura dos catiões com os aniões. Um dos aspectos importantes desta tecnologia de baterias, ao contrário das de Ni-MH, é o facto de, quando completamente carregadas, não suportarem mais carga, sob risco de danificarem ou provocar a explosão das células. Se a carga for demasiado baixa a célula poderá não carregar. Por outro lado, a sua eficiência é muito elevada (90% a 95%). As baterias de lítio ferro fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ) são as mais seguras, mas possuem uma densidade de energia e uma tensão aos terminais 10% inferior, em relação às baterias de iões de lítio que normalmente são compostas por lítio cobalto. Uma outra vantagem da tecnologia de iões de lítio em relação as demais tecnologias é o seu baixo peso o que a torna muito atractiva para a aplicação em veículos e em especial em veículos de competição.

**Tabela 6** Vantagens e desvantagens das células iões de lítio [2, 17].

Vantagens	Desvantagens
Tensão nominal da célula elevada	Impedância interna maior
Não possui electrólito líquido	Elevado custo para aplicações de alta potência
Densidade de energia elevada	Degradação quando é descarregado abaixo dos 2,1V.
Densidade de potência elevada	Degradação a altas temperaturas
Baixo peso	Medição do SOC mais complexa que nas outras tecnologias
Pode ser descarregada a taxas elevadas 20C (200A)	Necessita de circuitos de protecção
Taxa de auto descarga baixa	Químicos instáveis
Grande eficiência	
Não apresenta o efeito de memória	

**Tabela 7 Características técnicas baterias de lões de lítio [2,17].**

Densidade de energia	160Wh/kg
Energia/volume	270Wh/l
Densidade de potência	1800W/kg
Energia/custo - Módulo	1500€/kWh
Taxa de auto descarga	2 – 5 % / mês
Número de ciclos de carga	1500 – 2000
Tensão nominal da célula	3.6/3.7V

### 3.4 Ultra-Condensadores

Os condensadores são dispositivos constituídos por duas placas condutoras que são separadas por um isolador. Ao aplicar uma diferença de potencial as cargas opostas nas placas atraem-se e armazenam energia. A carga  $Q$  armazenada num condensador de capacidade  $C$  Farads a uma tensão  $V$  é dado pela equação seguinte:

$$Q = CV \text{ [C]} \quad (3.6)$$

Os condensadores permitem armazenar grandes quantidades de energia, os condensadores que armazenam elevadas quantidades de energia são os chamados ultra-condensadores. A energia armazenada no condensador é dada pela equação:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \text{ [J]} \quad (3.7)$$

Onde  $E$  é a energia armazenada em Joules. A capacidade  $C$  do condensador em Farads pode ser calculada pela equação que se segue:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \text{ [F]} \quad (3.8)$$

onde  $\varepsilon$  é a permeabilidade do material existente entre as placas,  $A$  é a área da placa e  $d$  é a distância que separa as placas. Os ultra-condensadores são dotados de uma distância de separação entre placas muito pequena, o que permite elevadas áreas que por consequência aumenta em muito o valor da capacidade. No entanto, o problema com esta tecnologia é que a tensão é bastante baixa,

situa-se entre 1 e 3,6 V. Este problema é claro analisando a equação 3.7 onde se constata que o baixo valor de tensão limita o valor da energia armazenada. De modo, a poder armazenar energia a uma tensão mais adequada é necessário associar em série vários condensadores. Para além de aumentar os custos, surgem outros problemas. Se dois condensadores C1 e C2 são ligados em série então a capacidade total é dado pela expressão que se segue:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \quad (3.9)$$

Assim por exemplo dois condensadores de 3 Farads ligados em série têm uma capacidade total de 1,5 Farads, ou seja, ao associar-se em série condensadores, a capacidade total diminui. Agora, a energia armazenada aumenta pois a tensão contribui ao quadrado, daí que a associação em série acaba por resultar num aumento de energia armazenada, apesar da diminuição da capacidade. Outro problema existente ao colocar condensadores em série é o facto de a carga não ser uniforme em todos os condensadores. Isto deve-se ao facto de em cada um deles existir uma dada taxa de auto-descarga e que não é igual em todos, pois o isolante entre ambas as placas não é perfeito. Como nas baterias de lítio, os ultra-condensadores necessitam de circuitos de balanceamento para não sobrecarregar as células que se encontram já à tensão de 3,6 V, quando é realizado o carregamento do sistema de armazenamento. Na tabela 9 sumariza-se as principais características técnicas dos ultra-condensadores.

**Tabela 8 Características técnicas ultra-condensadores [19].**

Densidade de energia	5Wh/kg
Energia/Volume	
Densidade de Potência	>3000W/h 23°C, 50% SOC
Rendimento	
Energia/Custo – Módulo	2000€ / kWh
Taxa de auto descarga	
Número de ciclos de carga	~1.000000 de ciclos
Tensão nominal da célula	3,6 V

### 3.5 Comparação entre as tecnologias estudadas

Quando se tenta comparar as células de lítio ferro fosfato com a química das células de ácido de chumbo constata-se que quimicamente a composição das baterias de iões de lítio com cátodos de ferro fosfato são dotados de uma capacidade superior para fornecer energia à carga. Isto deve-se ao

facto das células de lítio gerarem mais eficientemente a energia eléctrica, isto porque o movimento dos iões é mais eficiente que a reacção e transformação química que ocorre nas baterias de chumbo.

As baterias de chumbo têm uma resistência interna que varia consoante a solicitação que é feita a célula, assim, a medida que a corrente de descarga aumenta, o valor de tensão na célula diminui exponencialmente à medida que é retirada mais corrente e a resistência interna aumenta cada vez mais rapidamente com a transformação química. Uma descida exponencial da tensão reduz a capacidade da bateria para fornecer a potência solicitada pela carga de forma consistente. Por exemplo um conjunto de baterias de 260 Ah poderá fornecer corrente de forma contínua durante 20 horas desde que a corrente de descarga da bateria seja baixa. No entanto, se a solicitação da carga for um motor eléctrico que move um veículo, que durante 5 horas fornece corrente em regimes transientes e com picos elevados a tensão desce de forma acentuada e a resistência interna aumenta. Deste modo, o conjunto de baterias terá um rácio de utilização inferior aos 260 Ah por cada ciclo de descarga. Em suma, nas baterias de chumbo com o aumento da resistência interna a tensão desce exponencialmente o que obriga a que a corrente a fornecer ao sistema seja muito superior de modo a manter a igualdade no valor da potência. A corrente aumenta ao longo do tempo à medida que a resistência interna aumenta devido à reacção química que ocorre nos componentes da bateria resultando assim, numa descarga total da bateria muito mais rápida.

Como a composição química das baterias de lítio ferro fosfato é mais consistente ao longo de vários tipos de solicitações, permite que a queda de tensão da célula não seja tão acentuada o que permite fornecer de uma forma consistente a potência requerida pela carga. Como a tensão não cai tão rápido como nas células de ácido de chumbo a corrente não necessita de aumentar proporcionalmente com a queda da tensão para manter a potência necessária. Quer isto dizer que a potência será entregue de uma forma consistente até ao fim e haverá menos perda de potência aquando de solicitações superiores, ou seja, acelerações.

O efeito que se descreveu no parágrafo anterior pode ser compreendido pelo expoente de *Peukert*. No entanto, é necessário referir que comparar ambas as tecnologias com este expoente é complexo visto que ambas possuem características químicas distintas. O expoente de *Peukert* explica a capacidade que pode ser esperada por uma célula de ácido de chumbo para uma dada corrente de descarga. A equação é descrita por:

$$Ah = I^k t \text{ [Ah]} \quad (3.10)$$

Em que, no primeiro membro da equação se encontra a capacidade da bateria. No segundo membro  $k$  é o coeficiente de *Peukert*,  $t$  é o tempo em horas e  $I$  é a corrente em Ampere.

A figura 14 demonstra que a capacidade efectiva de uma bateria diminui para taxas de descarga mais elevadas. No entanto, com um uso intermitente a bateria tem tempo para recuperar durante os períodos de repouso quando a temperatura regressa à temperatura ambiente. Devido a esta possibilidade de recuperar, a redução da capacidade é menor e a eficiência é superior sempre que a bateria é utilizada em regimes intermitentes.

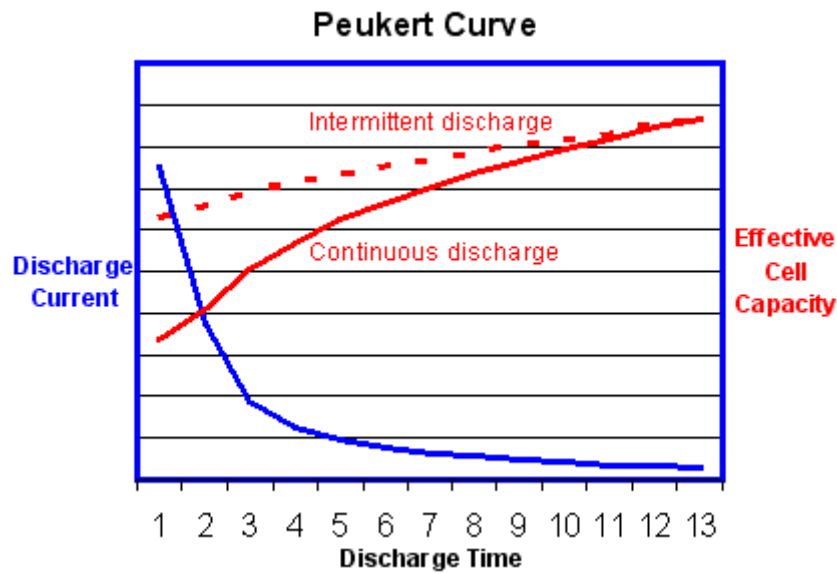


Figura 14 Variação da corrente de descarga em função do tempo de descarga [17].

A maioria das células de ácido de chumbo tem um expoente de *Peukert* entre 1,3 e 1,6. Células de ácido de chumbo têm um expoente que se aproxima de 1,15. No caso, das células de lítio ferro fosfato não pode ser-lhe atribuído este expoente devido as diferenças químicas entre ambas as tecnologias, mas uma aproximação desse valor para comparação, pode ser conseguido e toma o valor de 1,05. Como exemplo, isto quer dizer que uma bateria de 20 Ah da tecnologia de lítio consegue produzir a mesma quantidade de potência que uma bateria de ácido de chumbo de 50 Ah para a mesma tensão nominal.

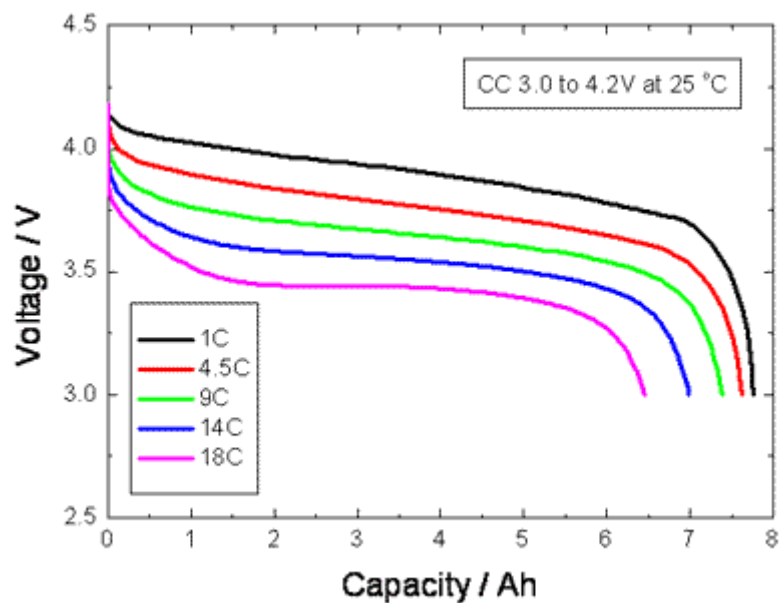


Figura 15 Variação da tensão em função da capacidade para diferentes correntes de descarga [22].

No que concerne, em relação a diferença entre ciclos de carga e descarga, as baterias de chumbo são capazes de 300 a 700 ciclos dependendo na qualidade do fabricante. No entanto, as taxas de descarga estão relacionadas com fenómenos associados à temperatura, condições meteorológicas e a idade das células. Quer isto dizer, que no caso das baterias de chumbo a sua substituição é feita ao fim de um ano ou dois de utilização. As baterias de lítio ferro fosfato conseguem garantir 1.500 ciclos até notar-se uma perda de 20 % da sua capacidade total à medida que se atingem os 2.000 ciclos. Se forem realizadas cargas quando o estado de carga da bateria não ultrapassar os 72 % da sua capacidade total, então poder-se-á aumentar o número de ciclos para 5.000, com pouca perda na capacidade total da bateria. Assumindo que por dia é realizado um ciclo por dia, após a descarga total da bateria ou seja, o tempo de vida da bateria são 2.000 ciclos então é possível utilizar as baterias durante 5,5 anos até notar-se alguma perda na sua capacidade.

Devido às características da sua resistência interna as baterias de chumbo descarregam automaticamente quando não utilizadas a uma taxa de 20 %. No mesmo período de tempo as células de lítio apresentam uma taxa de descarga de 2 % a 3 %.

Um efeito importante e que está associado ao reaproveitamento da energia é o facto das baterias de chumbo serem mais tolerantes a sobrecargas que as de lítio no entanto, as sobrecargas diminuem o tempo de vida das células que compõe as baterias. De facto as vantagens apresentadas pelas baterias de lítio em outros pontos fazem com que as mesmas, tenham exigências estritas para não exceder os limites máximos de tensão e de corrente especificados, pelo fabricante. Para além da sobrecarga, as baterias de lítio não podem ultrapassar o valor mínimo de tensão, caso contrário a célula fica inutilizável. É por isso que os sistemas de armazenamento de baterias que utilizam tecnologias de lítio são dotados de sistemas que monitorizam individualmente cada célula.

Relativamente à segurança, as células de lítio ferro fosfato não têm os mesmos problemas com fugas térmicas como outras células das demais tecnologias de íões de lítio. Em condições normais de funcionamento as células de lítio ferro fosfato operam a 55 °C. As células estão preparadas para lidar com 160 °C sem terem qualquer tipo de perda na sua capacidade total. A 180 °C as células emitem gases de lítio em pequenas quantidades, que não são tóxicas nas quantidades em que são emitidas. No entanto, esse cenário só ocorreria em condições extremas como por exemplo num incêndio.

### **3.6 Conclusão**

Apesar do seu elevado custo por kWh as baterias de lítio são como se verificou na figura 9 as que apresentam o melhor compromisso entre potência e energia específica, ao mesmo tempo que são no momento a tecnologia de baterias com maior energia específica o que lhe confere um menor peso em relação às demais. O seu menor peso é a principal razão para a sua utilização. Como foi referido no início, o peso é um dos aspectos essenciais do projecto do protótipo eléctrico pois menor peso confere-lhe uma maior capacidade dinâmica ao mesmo tempo que permite uma maior

autonomia ao protótipo, pois é necessária menos energia para mover o protótipo. É importante notar que apesar do seu custo elevado, a tecnologia de baterias LiFePO<sub>4</sub> apresenta a maior longevidade em relação às restantes. Assumindo um ciclo de descarga diário, esta tecnologia permite entre 1500 a 2000 ciclos de descarga, até se notar uma perda de 20 % da sua capacidade. Assim estas células durante 5.5 anos podem fornecer energia a um protótipo que funcionará aos fins-de-semana ao contrário dos 1.5 anos que duraria uma bateria de ácido de chumbo. Tendo em conta que a sua taxa de auto-descarga é bem menor que as de ácido de chumbo rapidamente compreende-se que o investimento nesta tecnologia é um investimento que é amortizado ao longo do tempo.

## 4 Motores Eléctricos

### 4.1 Introdução

O motor eléctrico é, claramente um dos componentes essenciais num veículo eléctrico. Neste capítulo iremos abordar particularmente o motor DC de ímanes permanentes, pois é o tipo de motor escolhido para a implementação do protótipo eléctrico. Abordar-se-á então o funcionamento do motor de ímanes permanentes, analisando os seus transitórios de arranque e assim compreender como se poderá controlar o motor. Para além disso, estudar-se-á os conversores e semicondutores a utilizar. Esta última temática surge na sequência da travagem regenerativa. As restantes topologias de motores como saem do âmbito deste trabalho não serão aqui referidas, no entanto poderão ser consultadas na referência [6].

### 4.2 O motor DC de ímanes permanentes

#### 4.2.1 Operação do motor DC básico

O motor eléctrico mais simples é o motor DC com escovas. Este tipo de motor é utilizado em vários tipos de aplicações, sendo uma delas, a propulsão de veículos. Apesar de ser cada vez mais comum a utilização de motores mais complexos e mais evoluídos. O motor DC com escovas é um bom ponto de partida pois é utilizado em inúmeras aplicações e o facto de necessitar de uma maior manutenção, em nada influencia negativamente para a aplicação em que será utilizado. Grande parte dos problemas a ter em conta em motores DC é explicado com maior facilidade neste tipo de motores. O motor DC clássico é apresentado na figura 16 e é equipado com ímanes permanentes e escovas. Este motor simplificado tem uma bobina e uma corrente que flui através do condutor que se encontra perto do íman que causa uma força que será gerada na bobina.

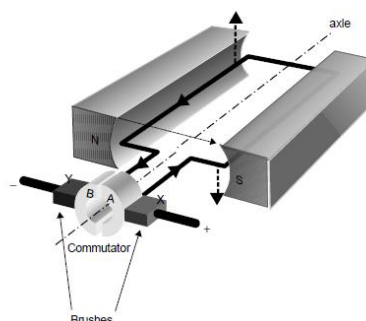


Figura 16 Motor simplificado de ímanes permanentes [23].



A corrente flui através da escova X, o comutador A, o comutador B e a escova Y, ou seja, realiza o percurso (XABY). De um lado (como na figura 16) a força é para cima e do outro a força é para baixo, porque a corrente flui no sentido contrário, ou seja, vai de encontro à escova e ao comutador. Ambas as forças fazem com que a bobina rode.

A bobina roda com o comutador e uma vez que os fios condutores estão livres do íman, o momento irá carregá-lo até a ligação dos anéis do comutador com as escovas. Quando isso acontecer, a corrente circula na mesma direcção em relação aos ímanes, e por conseguinte, as forças estarão com a mesma direcção, fazendo com que o motor continue girando, como antes. No entanto, a corrente irá agora circular através da escova X, em direcção à metade do anel B, e de seguida em direcção a A. O circuito fecha-se através de Y. De modo que a corrente actual estará a circular na direcção oposta à anterior (XBAY, corrente actual). A função do comutador é assegurar que a corrente na bobina mantenha a mudança de direcção, de modo a que a força continue com a mesma direcção, mesmo apesar da bobina ter sido mudada. É evidente que, num motor DC real existem muitos refinamentos sobre a disposição apresentada na figura 17. Os mais importantes, e a ter em conta são os seguintes:

- O rotor é uma peça redonda de ferro de modo que o campo magnético do íman não tem de atravessar um grande entre-ferro, que enfraqueceria o campo magnético.
- Mais do que uma bobina é utilizada, de modo a que o condutor que transporta a corrente esteja perto dos ímanes por um maior intervalo de tempo. Isto significa que o comutador não consiste em duas meias argolas (como na Figura 6.1), mas vários segmentos.
- Cada bobina é composta por vários fios condutores, de modo a que o binário seja superior (mais fios condutores, mais força).
- São utilizados mais do que um par de ímanes, para aumentar ainda mais a força com que o rotor roda.

#### 4.2.2 Característica do binário e velocidade angular

Um condutor com um comprimento  $l$  metros, transporta uma corrente de intensidade de  $I$  amperes, e gera um campo magnético de força  $B$  [ $\text{Wb}\cdot\text{m}^{-2}$ ], portanto a força no condutor é dada por:

$$F = BIl \text{ [N]} \quad (4.1)$$

Sendo o raio da bobina  $r$ , e o circuito da armadura com  $n$  voltas, então o binário do motor  $T$ , é dado pela equação:

$$T = 2nrIBl \text{ [N.m]} \quad (4.2a)$$

O termo  $2Blr = B \times \text{área}$  pode ser substituído pelo fluxo total que passa pela bobina, ou seja :

$$T = n\phi I \text{ [N.m]} \quad (4.2b)$$

No entanto, este é o binário máximo, que ocorre quando a bobina está totalmente magnetizada. Isto ocorre quando o fluxo é totalmente radial. Na prática, esta situação não se verifica sempre. Para além disso, não é tido em conta que pode haver mais do que um par de pólos magnéticos. Como tal definimos a constante  $K_{\text{iman}}$ , conhecida como a constante do motor, que irá relacionar a média do binário com a corrente e o fluxo da força magnética. O valor da constante do motor,  $K_{\text{iman}}$  depende unicamente do número de voltas em cada bobina, mas também sobre o número de pares pólo, e outros aspectos referentes à arquitectura do motor em si. Para além disso e visto que o motor que pretendemos estudar é um motor de ímanes permanentes, a constante é caracterizada pelo material que compõe os ímanes. Assim tem-se:

$$T = K_{\text{im}}I \text{ [N.m]} \quad (4.3)$$

em que,

$$K_{\text{im}} = K_i\phi \text{ [N.m/A]} \quad (4.4)$$

Da equação anterior retira-se que o binário do motor é directamente proporcional à corrente do rotor. No entanto, o que controla esta corrente? A corrente é controlada pela tensão imposta aos terminais do motor,  $E_s$ . A corrente dependerá igualmente da resistência eléctrica do circuito da armadura, tal como da bobina  $L_a$ , que representa o efeito indutivo existente no circuito. À medida que o motor roda, a armadura mover-se-á num campo magnético, quer isto dizer que poderá funcionar quer como gerador, quer como motor. Se considerarmos a máquina básica da figura 16, e considerando um dos lados da bobina, a tensão gerada é expressa por:

$$E_{\text{fcm}} = Blv \text{ [V]} \quad (4.5)$$

Esta equação representa o funcionamento do motor descrito na equação 4.1 no modo gerador. A tensão gerada é normalmente chamada de FCEM (força contra electromotriz),  $E_{\text{fcm}}$ . A FCEM depende da velocidade  $v$  do condutor que se move através do campo magnético. Para desenvolver mais a equação e para que se entenda a seguinte equação, constata-se que a velocidade do fio condutor que se desloca no campo magnético depende da velocidade angular  $\omega$  e do raio  $r$ , de acordo com a equação  $v = \omega r$ . Para além disso, a armadura tem dois lados, de forma que a equação (4.5) torna-se:

$$E_{fcm} = 2Blr\omega \text{ [V]} \quad (4.6)$$

No entanto, como existem  $n$  espiras, tem-se:

$$E_{fcm} = 2nrBl\omega \text{ [V]} \quad (4.7)$$

Esta equação deve ser comparada com a equação (4.2b). Com um raciocínio semelhante, pode-se simplificá-la a uma equação do tipo da equação (4.5). Uma vez que o motor é o mesmo, a constante  $K_{iman}$  é a mesma. Assim, a equação que transmite a FCEM gerada pelo efeito dínamo do motor, é dada por:

$$E_{fcm} = K_{im}\omega \text{ [V]} \quad (4.7)$$

Esta tensão opõe-se a tensão que é aplicada aos terminais do motor  $E_s$ . A FCEM tende a diminuir a corrente no motor. O somatório das tensões no circuito da armadura é a diferença entre a tensão  $E_s$  aplicada aos terminais do motor e a FCEM  $E_{fcm}$ . Assim a corrente da armadura é traduzida pela equação:

$$I = \frac{V}{R_a} = \frac{U - E_{fcm}}{R_a} = \frac{U}{R_a} - \frac{K_{im}}{R_a} \omega \text{ [A]} \quad (4.8)$$

Como podemos constatar na equação, a corrente diminui à medida que a velocidade angular aumenta. Pode-se agora, multiplicando a equação (4.8) por  $K_{iman}$ , obter a seguinte equação que relaciona o binário com a velocidade angular do motor.

$$T = \frac{K_{im}U}{R_a} - \frac{(K_{im})^2}{R_a} \omega \text{ [N.m]} \quad (4.9)$$

Esta equação é de elevada importância pois demonstra que o binário diminui à medida que a velocidade de rotação do motor aumenta. Realça-se que nestas equações foram sempre desprezadas qualquer tipo de perdas. A característica do motor está representada na figura 17. Os binários de arranque dos motores são controlados via os controladores electrónicos ou através da introdução de resistências de arranque, que à medida que o motor vai aumentando a sua velocidade vão sendo desligadas. A utilização destas resistências deve-se às elevadas intensidades que a corrente pode tomar nos momentos de arranque. Essas intensidades poderão ser até 14 vezes superior à corrente nominal do motor, o que pode comprometer a integridade da máquina.

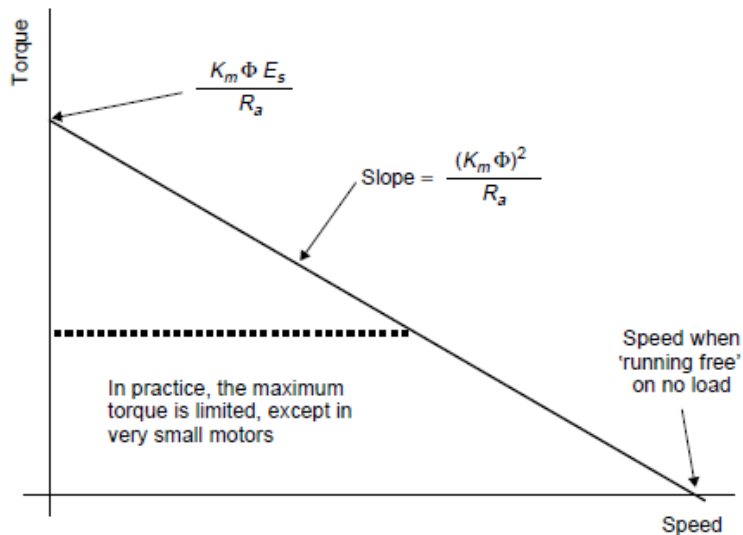


Figura 17 Curva de Binário- Velocidade de um motor de ímanes permanentes [6].

#### 4.2.3 Controlo do motor DC de ímanes permanentes

Recorrendo à figura 18 e a equação (4.9) pode-se compreender como se pode controlar um motor deste tipo. Se a tensão de alimentação  $E_s$  for reduzida, então o binário do motor diminui em proporção, e o declive da curva binário - velocidade de rotação manter-se-á inalterado. Por outras palavras qualquer binário e/ou velocidade de rotação do motor podem ser atingidos desde que sejam inferiores aos valores máximos. Veremos mais à frente que a tensão  $E_s$  é uma maneira simples e eficiente de controlar este tipo de motor.

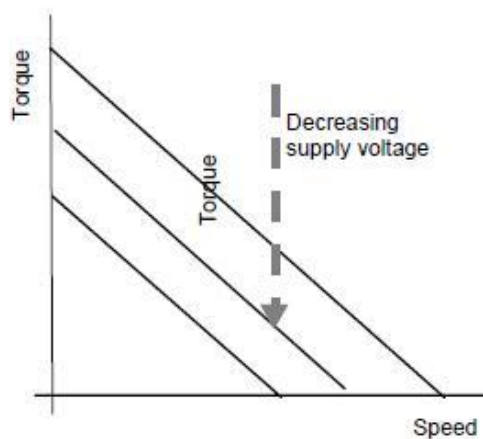


Figura 18 Variação da curva binário – velocidade diminuindo a tensão de alimentação do motor [6].

## 4.2.4 Modos de operação da máquina de ímanes permanentes

Do ponto de vista do fluxo de energia, a máquina não tem só uma entrada e uma saída, mas tem também a capacidade de armazenar energia. Energia essa que é cinética. Consoante o sentido do fluxo de energia, pode identificar-se dois modos de operação. A máquina é dita que funciona como motor quando é fornecida energia à máquina de uma fonte exterior. Essa energia proveniente da fonte exterior é depois transformada em energia mecânica que irá aumentar a energia cinética do rotor. É dito que a máquina está no modo gerador, quando energia mecânica dota o rotor de movimento e esse movimento é convertido em energia eléctrica. Energia essa que flui do circuito da armadura para um circuito exterior.

### 4.2.4.1 Funcionamento como motor

No modo de funcionamento, como motor ao aplicar-se uma tensão  $E_s$  aos terminais do circuito da armadura, injecta-se uma corrente na armadura  $I_a$ , contra a FCEM  $E_{fcm}$ . A corrente  $I_a$ , com o campo produzido pelo ímanes cria um binário electromagnético  $T_{em}$ . Ao funcionar como motor o rotor acelera no sentido do  $T_{em}$ , atingindo um valor de velocidade permanente, assim que o seu valor iguala o binário de perdas e o binário mecânico,  $T_{perdas}$  e  $T_m$ , respectivamente.

Com a FCEM  $E_{fcm}$ , a contrariar a corrente da armadura  $I_a$ , a equação da tensão no circuito da armadura é dado por:

$$E_s = E_{fcm} + R_a I_a + V_{esco} + L \frac{dI_a}{dt} \text{ [V]} \quad (4.10)$$

Onde  $R_a$  é a resistência da armadura,  $V_{escova}$  é a queda de tensão nas escovas e  $L$  é a indutância do circuito da armadura. Ao funcionar como motor, a corrente circula da fonte de energia para os enrolamentos do circuito da armadura. Escrevendo a equação do binário de aceleração do rotor (binário electromagnético), tem-se:

$$T_{em} - T_{perdas} + T_m = J \frac{d\omega}{dt} \text{ [N.m]} \quad (4.11)$$

Multiplicando a equação da tensão no estator por  $I_a$  tem-se:

$$E_s I_a = E_{fcm} I_a + R_a I_a^2 + V_{esc} I_a + \frac{L}{2} \frac{dI_a^2}{dt} \text{ [W]} \quad (4.12)$$

Realizando o mesmo à equação mecânica (4.11), tem-se:

$$P_{em} = P_m - P_{perdas} = \frac{J}{2} \left( \frac{d\omega^2}{dt} \right) \text{ [W]} \quad (4.13)$$

Combinando ambas as equações, obtemos a relação que descreve o fluxo de potência que ocorre na máquina:

$$E_s I_a + P_m = \frac{d\left(\frac{J\omega^2}{2} + \frac{Li_a^2}{2}\right)}{dt} I_a^2 R_a + I_a V_{esc} + P_{perdas} \text{ [W]} \quad (4.14)$$

O primeiro membro representa a potência de entrada, no segundo membro a primeira parcela representa a energia que é armazenada e a segunda parcela as perdas.

#### 4.2.4.2 Funcionamento como gerador

No modo de funcionamento como gerador, uma fonte exterior dota a máquina de um dado binário mecânico,  $T_m$ , que faz com que o rotor rode. Devido ao movimento do rotor surge uma corrente no circuito da armadura  $I_{ag}$ , que terá um sentido contrário ao da secção anterior, ou seja, será uma corrente que circula da armadura para um circuito exterior. Corrente essa, que fornece energia da  $E_{fcm}$  para o restante circuito da armadura. As equações apresentadas na secção anterior serão as mesmas, simplesmente ter-se-á de alterar  $I_a$ , por  $I_{ag}$ , que tem sentido contrário ( $I_a = -I_{ag}$ ). No modo de funcionamento como gerador, o binário mecânico ( $T_m$ ) tem sentido positivo, enquanto que o binário de perdas ( $T_{perdas}$ ) e o binário electromagnético ( $T_{em}$ ) têm sentidos negativos, ou seja, o binário mecânico ( $T_m$ ) tem a oposição dos dois últimos. A equação da tensão no circuito da armadura é, então dado por:

$$E_{fcm} = E_s + R_a I_{ag} + V_{esc} + L \frac{dI_{ag}}{dt} \text{ [V]} \quad (4.15)$$

Como foi já referido anteriormente, quando a máquina opera como gerador, a energia flui dos enrolamentos da armadura para um circuito exterior, que está ligado à armadura. Multiplicando a equação 4.15 por  $I_{ag}$ , temos:

$$E_{fcm} I_{ag} = E_s I_{ag} + R_a I_{ag}^2 + I_{ag} V_{esc} + \frac{dLi_{ag}^2}{2 dt} \text{ [W]} \quad (4.16)$$

Igualando a potência electromagnética  $P_{em}$  da equação (4.13) com a FCEM  $E_{fcm}$  e a corrente da armadura  $I_{ag}$ , temos a equação (4.17), que descreve as potências de saída, de perdas e de entrada na máquina quando esta funciona como gerador:

$$P_m - R_a I_{ag}^2 + I_{ag} V_{esc} + P_{perdas} - \frac{d\left(\frac{J\omega^2}{2} + \frac{LI_{ag}^2}{2}\right)}{dt} = E_s I_{ag} \text{ [W]} \quad (4.17)$$

Sendo que no primeiro membro a primeira parcela representa a potência de entrada, a segunda parcela as perdas e a terceira a energia armazenada. No segundo membro temos a energia na saída, ou seja, a energia que poderá ser armazenada.

## 4.2.5 Eficiência de um motor DC

As fontes de perdas num motor DC são de 3 tipos. São elas perdas no cobre, perdas no ferro e perdas por atrito.

As perdas no cobre são causadas pela resistência dos condutores e pelas escovas do motor. Com a passagem da corrente alguma da energia eléctrica é transformada em calor que se dissipa. O efeito do calor numa corrente eléctrica é proporcional ao quadrado da corrente. No entanto sabemos da equação (4.3) que a corrente é proporcional ao binário que é fornecido ao motor, portanto tem-se:

$$P_{erdascobre} = KcT^2 \text{ [W]} \quad (4.18)$$

Onde Kc é uma constante que depende da resistência das escovas e da bobina do induzido. As perdas no ferro, são caracterizadas por efeitos magnéticos existentes no rotor do motor e são explicados com as perdas por histerese do material do rotor que está constantemente a magnetizar e a desmagnetizar-se. As outras perdas devem-se as correntes induzidas que circulam no rotor. Para minimizar estas perdas, o rotor do motor é feito em várias peças que posteriormente são coladas ou aparafusadas. Cada placa que constitui uma peça do rotor é pintada com uma camada de tinta. Com isto pretende-se diminuir as correntes induzidas, pois a resistência do ferro é superior. De realçar que estas perdas aumentam com a frequência pois existem mais ciclos de magnetização e de desmagnetização e como tal há mais perdas por histerese. As correntes induzidas também aumentam pois as variações do campo magnético no rotor induzem correntes superiores. As variações no campo magnético estão relacionados com a velocidade com que a máquina roda, assim as perdas no ferro são dadas pela equação:

$$P_{erdas\ no\ ferro} = K_i \omega \text{ [W]} \quad (4.19)$$

$K_i$  tem um valor constante. No entanto, pode ser determinado por um valor típico que dá uma boa indicação das perdas no ferro.

As perdas por atritos e atritos do vento devem-se a atritos nos rolamentos e escovas do motor. A resistência por parte do vento será tanto maior, quanto maior for a velocidade de rotação do motor, pois a oposição por parte deste, no rotor, varia com o quadrado da velocidade. Portanto as perdas deste tipo são descritas pelas seguintes equações:

$$P_{\text{perdas atrito}} = T_f \omega \cdot [\text{W}] \quad (4.20a)$$

$$P_{\text{perdas vento}} = K_w \omega^3 [\text{W}] \quad (4.20b)$$

onde  $T_f$  é o binário de atrito e  $K_w$  é uma constante que depende principalmente do tamanho e da forma do rotor e se tem ou não uma ventoinha para fins de arrefecimento. Colocando todas as perdas numa única equação, tem-se:

$$P_{\text{perdas total}} = K_c T^2 + K_i \omega + K_w \omega^3 [\text{W}] \quad (4.21)$$

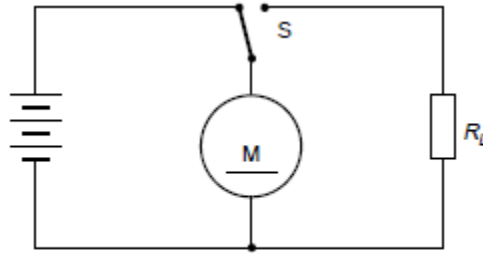
Enquanto é óbvio que as perdas afectam a eficiência do motor, não é tão óbvio que as perdas têm um impacto crucial na potência máxima que pode ser retirada de um motor com uma dada dimensão. Num motor de ímanes permanentes a potência extraída pode ser superior, aumentando o valor da corrente e aumentando assim o binário. Esse aumento tem um dado limite, ou seja, há um valor para o qual não se consegue extrair mais potência da máquina. O factor limitativo para a potência máxima extraída do motor é a temperatura. A partir de um certo ponto a potência é tão elevada que o calor gerado através das perdas dado pela equação (4.13) é tão elevado para poder ser dissipado, pelo que o motor sobreaquece. Aqui surge uma das grandes desvantagens deste tipo de motor. No motor de ímanes permanentes todas as perdas ocorrem no rotor e como o mesmo encontra-se numa posição central do motor a remoção do calor gerado pelas perdas torna-se difícil de dissipar. Esta questão da potência do motor estar limitado pela capacidade de dissipar o calor explica o porque de se poder utilizar, só durante pequenos períodos de tempo potências superiores as nominais. Instantes desses, são por exemplo os momentos em que se acelera o veículo.

### 4.3 Travagem dinâmica e regenerativa

#### 4.3.1 Motores DC como travões

O facto de um motor eléctrico poder ser utilizado para converter energia cinética em energia eléctrica é uma das suas principais características. Considerando um motor DC ligado a uma bateria de resistência interna desprezável, uma tensão de alimentação  $E_s$  e dotando o motor de um dado binário  $T$  e uma dada velocidade  $\omega$  que lhe permite estar em regime permanente, as variáveis poderão ser descritas pela equação (4.9). Supondo-se agora que o interruptor é colocado para o lado direito, o motor continuará a rodar com a mesma velocidade angular. Isto irá causar que uma tensão seja gerada, tal como na equação (4.7). Esta tensão estará aos terminais da resistência  $R_L$  tal como se constata na figura 20, com a corrente a ser limitada pela resistência do circuito da armadura.





**Figura 19 Motor Ímanes permanentes com resistência para travagem dinâmica.**

O resultado é que a corrente será dada pela fórmula:

$$I = \frac{K_i \omega}{R_a + R_L} \text{ [A]} \quad (4.22)$$

Esta corrente estará a circular para o exterior do motor, portanto irá resultar num binário negativo. O valor desse binário será dado pela expressão seguinte:

$$T = -\frac{(K_i)^2 \omega}{R_a + R_L} \text{ [N.m]} \quad (4.23)$$

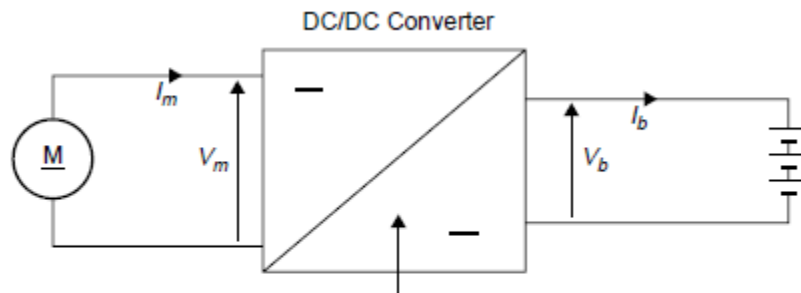
Temos assim um binário negativo que pode ser controlado pelo valor de  $R_L$ . Como se pode verificar pela equação (4.23), este binário negativo será tanto mais pequeno, quanto mais baixo for a velocidade de rotação do motor. Portanto sendo  $R_L$  constante pode-se esperar que a velocidade diminua de uma maneira exponencial para zero. Esta maneira de travar um motor eléctrico, utilizando uma resistência, é conhecida como travagem dinâmica. Note-se que a energia cinética do motor é toda ela transformada em calor, tal como num sistema de travagem normal. No entanto, agora tem-se controlo onde esse calor está a ser produzido. Portanto agora pretende-se colocar essa mesma energia que de momento está a dissipar-se numa resistência, num sistema de armazenamento, ou seja, num ultra-condensador ou numa bateria. Supondo que agora em vez da resistência temos uma bateria, como se verifica na figura 21, tem-se um sistema que se conhece como sistema de reaproveitamento de energia. No entanto, a ligação directa da bateria ao motor não é de todo prática.

Supondo que a tensão na bateria é de  $V_b$  e que o motor está a rodar a velocidade  $\omega$ , então a corrente que é debitada pelo motor é dada pela seguinte equação:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{K_i \omega - V_b}{R_a} \text{ [A]} \quad (4.24)$$

O binário de desaceleração será proporcional à corrente. Uma vez que o valor de  $\omega$  atinja o valor de  $V_b$ , ou seja,  $V_b = K_i \omega$ , não haverá mais efeito de travagem. A não ser que o valor de  $V_b$  seja bastante baixo, então rapidamente deixará de haver o efeito de travagem. Se a tensão na bateria for

muito baixa, será muito difícil utilizar a energia nela armazenada e o efeito de travagem poderá ser muito brusco para velocidades elevadas. A solução passa por ter um conversor DC-DC como o que está representado na figura 21.



**Figura 20 Sistema de aproveitamento de energia.**

A tensão aos terminais do motor irá variar com a velocidade do motor. A corrente por sua vez varia com o binário de travagem. O conversor tem aos seus terminais de entrada uma tensão  $V_m$  e uma corrente  $I_m$ . À saída do conversor tem-se uma tensão superior e uma corrente inferior, mantendo-se assim, a igualdade no produto  $I \times V$ . Isto é feito de modo a que a tensão corresponda à tensão do sistema de armazenamento de energia. O ponto essencial, é que a tensão do motor pode ser inferior à do sistema de armazenamento, mas poderá ainda assim fornecer carga ao sistema de armazenamento.

Estes circuitos não são 100% eficientes, porque alguma da energia da travagem do protótipo é perdida. Como tal, a eficiência dos conversores situa-se entre os 90 a 95 %.

#### **4.4 Circuitos de drive para motores DC**

No seguimento da secção anterior, vamos nesta secção abordar o tema referente aos conversores DC-DC. Vamos começar por analisar o conversor de quatro quadrantes. Um esquema simplificado deste conversor encontra-se na figura 22.

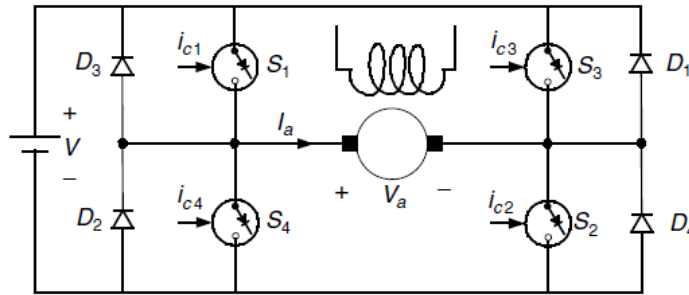


Figura 21 Conversor de 4 quadrantes.

Como o nome sugere este tipo de conversor funciona, nos 4 quadrantes nos quais o motor pode funcionar, ou seja, a corrente da armadura pode ser negativa ou positiva, tal como a tensão pode tomar valores superiores e inferiores a zero. Se a tensão na armadura  $V_a$  é positiva e a corrente na armadura  $I_a$  é negativa, então estamos no 4º quadrante. Se  $\omega$  é positivo (sentido anti horário), a máquina está a operar como gerador. Por outro lado se  $V_a$  é negativo e  $I_a$  é positivo então a máquina está a operar no 2º quadrante e se  $\omega$  é negativo, ou seja, sentido horário temos a máquina a funcionar novamente como gerador.

No entanto, para a aplicação do sistema que pretendemos implementar, os modos de funcionamento pretendidos são o de motor e gerador. Necessita-se que a corrente possa ter valores positivos e negativos. Não se necessita que a tensão no circuito da armadura seja negativo, pelo que um conversor de dois quadrantes é suficiente. Assim sendo, vamos concentrar-nos no funcionamento de um conversor de 2 quadrantes.

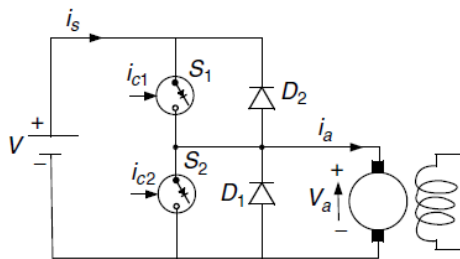
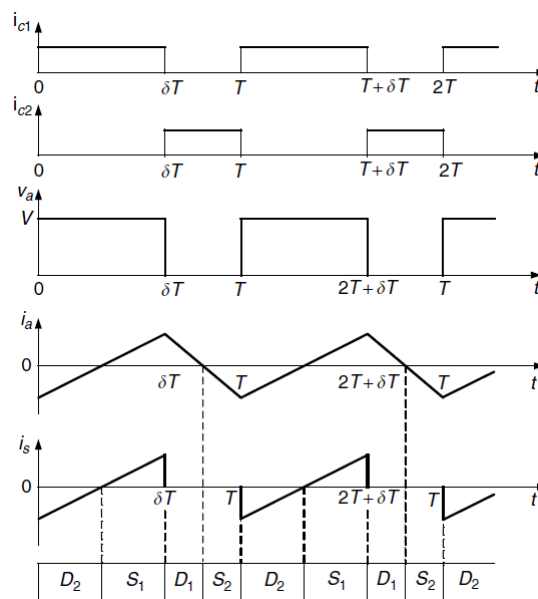


Figura 22 Conversor de 2 quadrantes.

Um esquema simplificado de um conversor de 2 quadrantes ligado a uma máquina DC está representado na figura 23, igualmente na figura 24 estão representadas as formas de onda típicas de um conversor deste género. Num conversor deste tipo a tensão da armadura nunca poderá ser inferior a zero. Já a corrente poderá tomar valores positivos e negativos. Os valores de  $I_{c1}$  e  $I_{c2}$  representados nas formas de onda podem tanto ser ambos positivos, ambos negativos ou como no caso da figura,  $I_{c2}$  positivo e  $I_{c1}$  negativo. Quando ambos são positivos, a máquina está a funcionar como motor; quando ambos são negativos, então a máquina funciona como gerador. No caso representativo da figura 24 o valor médio da corrente é positivo e como tal, estamos perante o

funcionamento do conversor no 1º quadrante. Se  $\omega$  é positivo (sentido anti-horário), então a máquina está a funcionar como motor. Num conversor deste tipo, temos dois semicondutores que na figura são representados por dois interruptores ideais. Temos dois díodos, colocados em paralelo com cada um dos interruptores para permitirem a condução, quando o interruptor estiver aberto. O controlo da abertura e fecho dos interruptores é feito através de *Pulse Width Modulation* PWM. É importante referir que a comutação de interruptores electrónicos tem tempos diferentes, ou seja, o tempo de 'off' é normalmente superior ao tempo de 'on'. Tal deve-se ao facto de que para suprimir a energia no instante de 'off' é muito mais difícil do que permitir a circulação da corrente quando o interruptor fecha. Pensando em termos de derivada chega-se à mesma conclusão, pois o  $\frac{dU}{dt}$  e o  $\frac{dI}{dt}$  não pode ser infinito e como tal necessita de mais tempo para garantir a condição de continuidade de energia no instante em que ocorre o 'off' do interruptor. No entanto no modelo que aqui será implementado assume-se que esse tempo é idêntico, no entanto, fica feita a referência pois caso não haja essa compensação no PWM, onde são dados os sinais de impulso para a polarização dos semicondutores corre-se o risco de efectuar um curto-circuito no conversor.



**Figura 23** Variação das grandezas eléctricas num conversor de 2 quadrantes.

Analisando o funcionamento do conversor e tendo em consideração as formas de onda, da figura 24 verifica-se que durante o intervalo de tempo A,  $S_1$  está fechado e  $S_2$  está aberto, e como tal  $I_a$  só pode circular através de  $D_1$ . A corrente na armadura ( $I_a = I_1$ ) começa com um valor negativo porque no instante anterior ao período A (0 a  $\delta T$ ), decorreu um período B ( $\delta T$  a  $T$ ), onde  $S_2$  estava fechado e  $S_1$  aberto. Com  $S_2$  fechado os terminais da armadura encontram-se em curto-circuito e a FCEM obriga a corrente a ser negativa. Portanto, quando  $S_1$  é fechado e  $S_2$  é aberto, para a execução de um novo período A, a tensão da fonte tem de suportar o valor negativo de  $I_a$ . Como o valor médio de  $I_a$  é positivo,  $V_s$  é maior que a FCEM. Assim, que a corrente é zero o diodo  $D_1$  bloqueia a circulação da corrente, quer isto dizer que  $I_{D_1}$  não pode ser positivo. No entanto,  $S_1$  está fechado

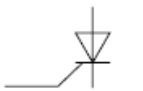
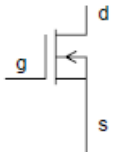
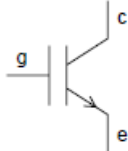
desde o início do período (0 a  $\delta T$ ) e como  $I_{S1}$  só pode ser positivo, o interruptor  $S_1$  está pronto para deixar circular a corrente  $I_a$ , que é agora positiva. A corrente na armadura que é a mesma que passa pelo interruptor 1,  $I_{S1}$  continua a subir até ao fim do intervalo de tempo A. No intervalo de tempo B,  $S_1$  é aberto e  $S_2$  é fechado, no entanto  $S_2$  não pode conduzir a corrente da armadura  $I_2$ , que é positiva. Como tal, a corrente da armadura tem de passar pelo diódo  $D_2$ , que coloca em curto-circuito os terminais da armadura. A FCEM tem de vencer a corrente  $I_2$ . É claro que, caso os terminais da armadura estejam sempre em curto-circuito, a FCEM obriga a corrente da armadura a ser negativa. No início do período B a FCEM faz isso mesmo (obriga a corrente a ter um sentido negativo); no entanto, quando  $I_a$  é nula, o diódo  $D_2$  bloqueia  $I_{D2}$  e a corrente da armadura começa a fluir por  $S_2$ , que encontra-se fechado desde o início do intervalo de tempo B. Este processo continua até ao fim do período B, onde se inicia um novo período A.

## 4.5 Regulação e conversão da tensão

### 4.5.1 Semicondutores

A tensão de todas as fontes de energia eléctrica depende da temperatura e muitos outros factores, especialmente a corrente. A tensão nas baterias é muito bem regulada, no entanto poderá haver momentos em que se pretende aumentar ou baixar o seu valor, normalmente para se controlar a velocidade do motor. Como se sabe de secções anteriores para reaproveitar energia a partir da travagem, tem-se de subir o valor da tensão e baixar o valor da corrente de uma forma contínua e variável. Isto é conseguido usando os circuitos chamados de “switching” e “chopping”. Na tabela seguinte temos os principais semicondutores utilizados nos circuitos mencionados.

**Tabela 9 Características dos diferentes Semicondutores [6].**

Type	Thyristor	MOSFET	IGBT
symbol			
Max. voltage (V)	4500	1000	1700
Max. current (A)	4000	50	600
Switching time ( $\mu s$ )	10–25	0.3–0.5	1–4

É cada vez mais comum no tipo de aplicação que se pretende implementar, utilizar circuitos de conversão (“chopping”) de modo a aumentar-se o desempenho dinâmico da máquina, para se controlar eficientemente nas frequentes travagens e acelerações, ou seja, nas transições entre os diferentes modos de operação do motor. Os semicondutores têm todos em comum o facto de

conduzir corrente com o sentido positivo e de suprimir correntes com o sentido contrário, ou seja, negativo. Os diferentes semicondutores são caracterizados pela sua capacidade de comutação entre os estados de “on” e “off”. Os dispositivos são caracterizados também pela sua capacidade de supressão da tensão no momento de *off*. As suas limitações para tais supressões estão relacionadas com a máxima variação de corrente  $\frac{di}{dt}$  e de tensão  $\frac{du}{dt}$  nos momentos de comutação. Vamos então analisar os semicondutores existentes, mais indicados para a nossa aplicação.

O MOSFET é ligado quando lhe é aplicado uma tensão, normalmente na ordem dos 5 a 10 V na porta. Quando está no estado “on”, a resistência entre o dreno e o emissor é bastante baixa. A potência necessária para que se assegure uma resistência bastante baixa é pequena, já que a corrente na porta é baixa. O caminho seguido pela corrente quando o MOSFET está no estado “on” é como percorrer uma resistência  $R_{DS(on)}$ . O valor desta resistência, para sistemas de 1 kW é de aproximadamente 0.1  $\Omega$ . O *Insulated Gate Bipolar Transistor* IGBT é essencialmente um circuito integrado com um transístor bipolar e um MOSFET, que detém as vantagens de cada um deles. Os IGBT’s necessitam de uma tensão baixa e de uma corrente desprezável para que a porta fique polarizada directamente, ou seja, no estado “on”. A corrente desloca-se essencialmente do colector para o emissor, onde a junção é do tipo p-n. Quer isto dizer que a tensão não sobe mais do que 0.6V para os valores de corrente dentro da classificação do componente. Isto faz do IGBT, o semiconductor preferido para sistemas onde a corrente é superior a 50 A. Os mesmos podem ser fabricados para suportar tensões superiores. Os seus tempos de comutação são superiores ao MOSFET, efectivamente os IGBT’s tem uma desvantagem para sistemas de baixa potência (< 1 kW). No entanto para sistemas superiores a 1 kW e até centenas de kW o IGBT é a solução mais utilizada, sendo que os seus valores limite aumentam anualmente. Na tabela 9 está também representado o tiristor, no entanto não iremos incidir nenhum tipo de referência no mesmo pois o mesmo é mais utilizado para circuitos de rectificação AC.

Para a aplicação pretendida, torna-se evidente que com as potências envolvidas o IGBT é a opção mais indicada. A sua capacidade de supressão da tensão e da corrente nos momentos de comutação, como veremos mais a frente é a mais adequada para o que se pretende. Igualmente as potências suportadas estão na gama nas quais o sistema irá operar.

## 5 MODELO TEÓRICO PROPOSTO

### 5.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se apresentar o modelo proposto para simular o comportamento do protótipo eléctrico. O modelo construído tem como principal objectivo avaliar o desempenho do protótipo tendo sempre como referência o desempenho de um veículo idêntico mas propulsionado por um motor de combustão interna. Para além do seu desempenho a nível de potência é com este modelo que se pretende avaliar a capacidade que o protótipo terá para cumprir a prova de *endurance* para uma dada quantidade de energia armazenada no sistema de armazenamento de energia. Deste modo, poder-se-á minimizar o peso final do protótipo utilizando um sistema de armazenamento de energia o mais pequeno possível. Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos vai ser realizado uma apresentação dos vários subsistemas que compõem o modelo da cadeia de propulsão eléctrica.

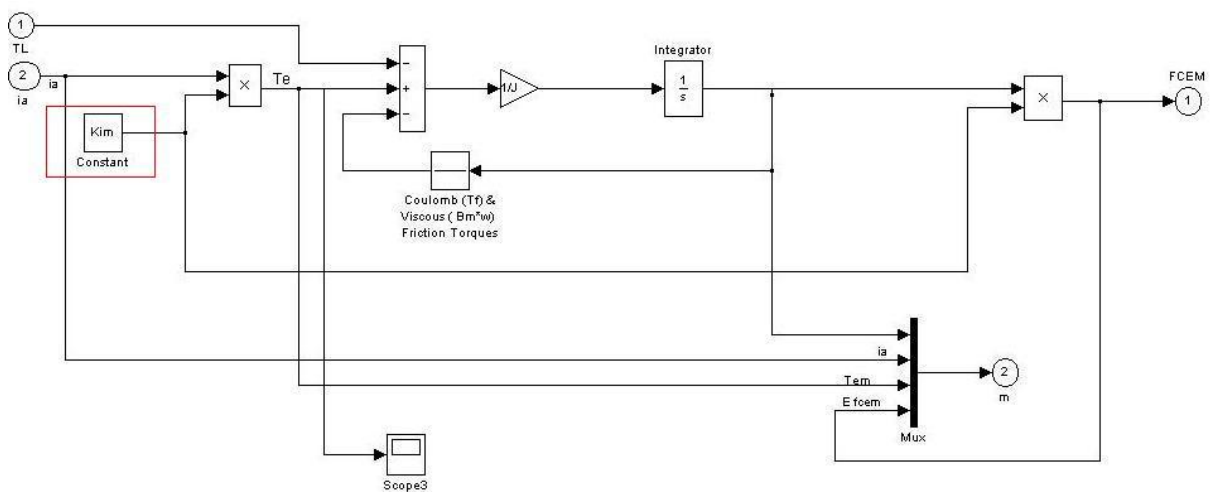
### 5.2 Modelo Proposto

O modelo proposto é composto por 5 subsistemas, que interagem entre si com o objectivo de simular as várias grandezas eléctricas que se encontram aplicadas ao motor eléctrico e sistema de armazenamento de energia. O ciclo a que toda a cadeia de propulsão está sujeita é dado por um vector de entrada que para cada instante de tempo tem uma dada velocidade associada, ou seja, nesse vector encontra-se a velocidade solicitada pelo piloto para um dado ponto da pista. Estes dados são referentes a uma volta ao circuito de *Hockenheim*, onde o Projecto FST participou em 2008 com o FST-03. Para realizar a simulação da prova de *endurance* realiza-se a reprodução do vector para 27 voltas, pois a pista onde os protótipos da *Formula Student* competem é um traçado de 830 metros com forma similar ao circuito original de *Hockenheim*. Ao cumprir 27 voltas ao traçado de 830 metros os veículos cumprem uma distância de 22 km.

#### 5.2.1 Motor Eléctrico

O motor eléctrico utilizado é um motor de ímanes permanentes. No entanto, em MATLAB existe o modelo do motor com circuito de excitação independente. É necessário proceder-se a algumas alterações, de modo a que o motor funcione como um motor de ímanes permanentes. Assim, todas as ligações referentes ao circuito magnético são substituídas por um bloco que contém um valor típico para a constante dos ímanes do motor. Na figura 25 realça-se esse mesmo bloco. É a partir do mesmo que com o valor da corrente e com o valor da velocidade de rotação do motor que se calcula o binário electromagnético e força contra electromotriz do motor, respectivamente. Assim,

toda a dinâmica quer da parte mecânica como da parte eléctrica do motor, encontra-se representada no modelo utilizado. É importante realçar que a dinâmica referente à parte eléctrica do motor é muito mais rápida que a dinâmica da parte mecânica. Na secção 5.2.3, referente ao controlador esta questão é esclarecida. Juntamente com o modelo MATLAB/Simulink é posto a correr um ficheiro de texto com a extensão do tipo .m que contém as características técnicas do motor como das constantes físicas necessárias e dos parâmetros referentes ao protótipo eléctrico. Este modelo é totalmente ideal e como tal não contempla as perdas explicadas na secção 4.2.5. Para tornar o modelo do motor mais próximo do real, o binário de referência exigido ao motor é acrescido de um factor de 1,1. Este factor provém da informação do fabricante, na qual este indica uma eficiência de 92 %.



**Figura 24 Modelo da dinâmica do motor eléctrico em ambiente Simulink.**

O motor a utilizar é um motor da *Lynch* que foi concebido por *Cedric Lynch* que detém a patente. Neste motor as lâminas de ferro são rectangulares, o que torna possível que este tipo de motor seja mais barato, ao contrário dos outros motores de ímanes permanentes. O baixo custo destes motores deve-se ao facto de não ser necessário uma ferramenta especial de estampagem. Realça-se que o motor pesa cerca de 21 kg, tem um binário nominal de 66 Nm para uma corrente de 200 A. A tensão de alimentação é de 144 V. Segundo dados do fabricante a constante dos ímanes é de 0.382 [9]. Na figura seguinte, encontra-se uma imagem de um motor real e que é idêntico ao modelado. O motor na figura 26 encontra-se instalado na traseira do protótipo da Universidade de *Dartmouth*, equipa que em 2008 apresentou um protótipo híbrido.



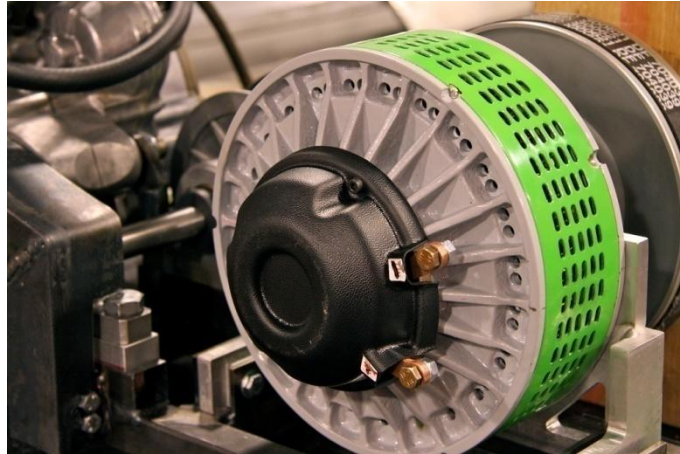


Figura 25 Motor de ímãs permanente montado na traseira de um *Formula Student* Híbrido.

## 5.2.2 Dinâmica de Veículos

Este subsistema é o primeiro a realizar cálculos na simulação, isto porque é a partir deste bloco que será calculado o valor do binário solicitado ao motor eléctrico, consoante a solicitação do piloto, ou seja, via o ficheiro que contém os dados referentes a uma volta ao circuito de *Hockenheim*. Neste subsistema pretende-se essencialmente, através do vector de entrada que contém os dados referentes à solicitação do piloto, calcular qual será a força de tracção necessária para propulsionar o protótipo à velocidade pretendida, de modo a que o veículo eléctrico apresente o desempenho pretendido. Na figura 27, encontra-se representado o subsistema em *MATLAB/Simulink* onde os blocos que compõem o subsistema são descritos pelas equações referentes ao capítulo 2. Neste subsistema teve-se o cuidado para que os valores de aceleração e desaceleração longitudinal não ultrapassassem os 1.6 G e os 2 G respectivamente. Por questões de simplicidade o veículo a simular não será dotado de uma caixa de velocidades, ou seja, terá uma transmissão simples e de uma única relação. Como tal, é necessário encontrar o melhor compromisso entre velocidade e poder de aceleração do protótipo. Para além disso, é necessário ter em conta que o motor eléctrico escolhido tem uma velocidade de rotação máxima de 3600 RPM. Como o traçado onde o protótipo compete é sinuoso e limitado por médias horárias de 50 km/h (limitação regulamentar) optou-se por um compromisso em que a velocidade máxima é de 100 km/h. Sendo  $R_{roda}=0,25$  m,  $G = 3.5$   $\omega = 3600$ RPM ou 377 rad/s substituindo na equação seguinte (5.1), onde  $\omega$  corresponde a velocidade de rotação da roda em rad/s,  $G$  é a relação de transmissão e  $R_{roda}$  corresponde ao raio do pneu utilizado em metros, tem-se:

$$v = \frac{\omega \cdot R_{roda}}{G} \text{ [m/s]} \quad (5.1)$$

Calculando, obtém-se uma velocidade igual a 26.92 m/s, o que corresponde a uma velocidade de 97 km/h. Quanto maior for a relação de transmissão menor será a velocidade que o protótipo poderá atingir. O melhor compromisso para este valor terá de ser encontrado via testes em pista, no entanto

e comparando em relação ao último protótipo, o FST-03, o veículo eléctrico tem uma relação de transmissão superior, o que lhe confere uma maior capacidade de aceleração apesar de em termos de velocidade máxima estar mais limitado. Neste, subsistema as acelerações laterais não são tidas em conta, porque saem do âmbito de desenvolvimento deste trabalho. No entanto, e para o futuro poderá ser um dos melhoramentos a introduzir no subsistema de modo a simular de uma forma mais completa o comportamento total do protótipo eléctrico.

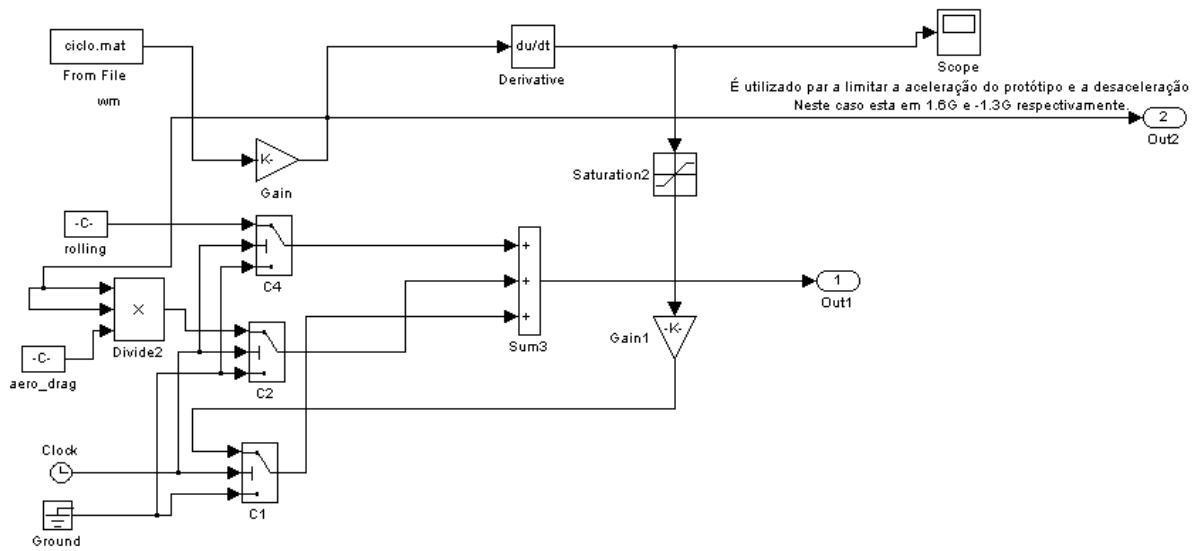


Figura 26 Modelo com as grandezas físicas que condicionam a propulsão do veículo eléctrico.

### 5.2.3 Controlador

O controlador de corrente é outro dos subsistemas que compõe o sistema modelado. O objectivo deste subsistema consiste em controlar a tensão disponibilizada ao motor. Efectivamente, com o controlo da tensão de alimentação do motor controla-se de uma forma mais eficiente e suave a curva característica de binário - velocidade. Este controlo é feito recorrendo a um controlador do tipo Proporcional – Integral, PI. Neste tipo de controlador é feita a integração do erro existente entre o valor da referência de corrente e o valor de corrente lido aos terminais do circuito da armadura do motor eléctrico. Neste subsistema é necessário colocar blocos de saturação de modo a que o valor máximo de alimentação do motor não seja ultrapassado. Coloca-se igualmente o bloco de *anti-windup* para evitar atrasos no sistema, ou seja, é necessário limitar o crescimento da tensão  $u(t)$  de modo a que o mesmo não ultrapasse o valor nominal. Caso isso aconteça para além de ultrapassar o valor nominal, quando o sinal de erro  $e(t)$  inverter a polaridade a resposta do sistema não será correcta pois como se ultrapassou o limite dos valores de saída, o sistema demorará alguns instantes até regressar aos valores pretendidos. Para uma mais fácil compreensão, na figura 28 tem-se uma resposta de um sistema com e sem *antiwind-up*.

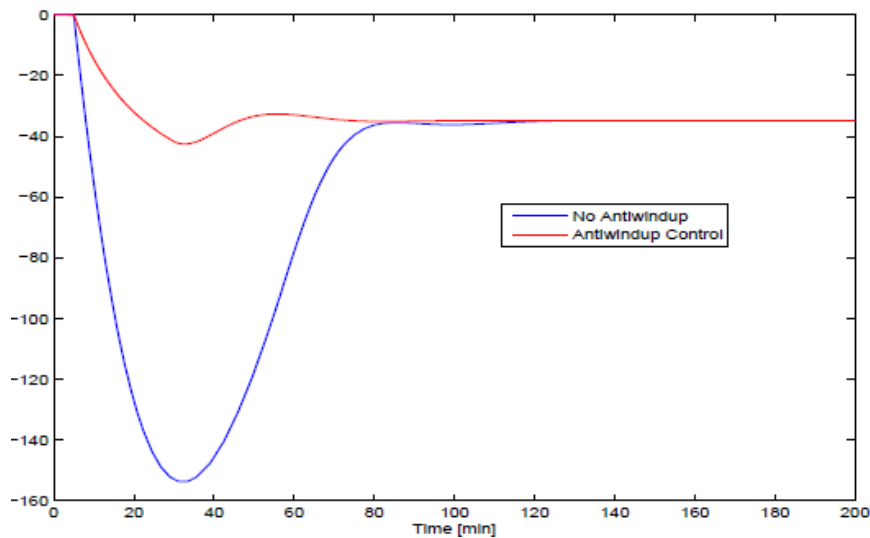


Figura 27 Resposta de um sistema com e sem *anti-windup* [23].

A frequência de aquisição no bloco de *antiwindup* tem de ser ajustada de modo a que seja um múltiplo inteiro da frequência de aquisição do sistema total. Na figura 29, tem-se a topologia do controlador projectado em ambiente MATLAB/Simulink. Na secção seguinte demonstra-se os cálculos necessários para a realização do projecto do controlador.

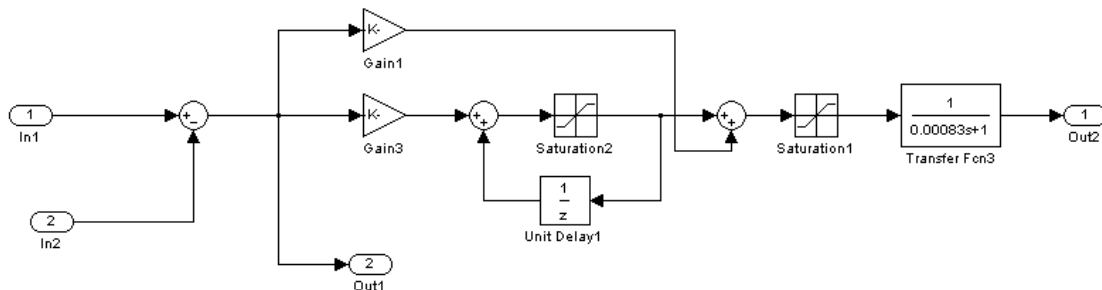


Figura 28 Controlador Proporcional Integral em ambiente Simulink.

## 5.2.4 Dimensionamento

Para um correcto dimensionamento da malha de corrente é necessário decidir qual o tipo correcto de controlador a utilizar, ou seja, utilizar um controlador P, PI ou PID. Um controlador do tipo P, controlador de ganho proporcional amplifica directamente o valor do erro. Erro positivo causa uma tensão positiva, enquanto um erro negativo causa uma tensão negativa. No entanto, a queda de tensão na resistência requer uma tensão em estado permanente de valor  $U^*=I^*R$ . Pelo teorema do valor final tem-se que:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left( \frac{sI^* - 1}{s(1+PG(s))} \right) = \frac{I^*}{\left(1 + \frac{P}{R}\right)} \quad (5.2)$$

Ou seja, necessitamos de uma parte integral, para que o erro seja somado de modo a que um erro positivo gere uma tensão positiva maior, que por sua vez obrigue a uma corrente maior e assim que se aproxime do valor de corrente de referência. Deste modo elimina-se o erro. A acção derivativa não é utilizada pois a mesma para altas frequências aumenta o *ripple* do binário e corrente, tendo em conta as elevadas frequências de comutação dos semicondutores, a acção derivativa poderá levar o sistema para uma situação de instabilidade. Assim o controlador do tipo PI é o mais adequado para o controlo da corrente. Este controlador garante uma resposta de elevado desempenho para sistemas transientes, um amortecimento adequado e erro nulo em regime permanente. A função de transferência do controlador é:

$$G_{PI}(s) = K_i + \frac{K_i}{s\zeta} \quad (5.3)$$

O controlador do tipo PI tem dois parâmetros que têm de ser calculados.  $K_i$  e  $\zeta_i$  que dependem do motor eléctrico, com a função de transferência do motor a ser dada por:

$$G = \frac{1}{R} \frac{1}{\tau s + 1} \frac{1}{s\zeta\sigma + 1} \quad (5.4)$$

Na equação anterior referente ao motor, não é tido em conta a perturbação que a FCEM tem na tensão de saída do controlador. Tal deve-se ao facto de a FCEM variar em função da velocidade de rotação da máquina. Como se pretende um controlo rápido vai admitir-se que esta velocidade não variará substancialmente durante o transitório de corrente e portanto a variação da FCEM será nula. Podemos fazer esta simplificação visto que a constante de tempo eléctrica é muito mais rápida que a constante de tempo mecânica, esta última dita a variação da velocidade de rotação do motor o que por sua vez implica que a FCEM varia com a constante de tempo mecânica. Os valores de ambas encontram-se no fim da secção onde são apresentados os cálculos dos vários parâmetros do controlador. Juntando ambas as equações anteriores, temos a função de malha aberta do sistema:

$$G = K_i \frac{s\zeta_i + 1}{s\zeta_i} \frac{1}{R} \frac{1}{\tau s + 1} \frac{1}{s\zeta\sigma + 1} \quad (5.5)$$

Normalmente, a constante de tempo do controlador PI  $\zeta_i$  é escolhida de modo a que neutralize a constante de tempo maior do sistema.

$$\tau = \zeta i \quad (5.6)$$

Se  $\tau > \zeta i$  temos um sistema em que a parte integral é demasiado baixa. Consequentemente, a compensação para o regime permanente é muito mais lento. Se  $\tau < \zeta i$ , temos um sistema com pouco amortecimento, para além de que a constante de tempo maior continua a influenciar a malha. Com a igualdade 5.6 a ser aplicada na equação 5.5 tem-se a equação da seguinte forma:

$$G = K_i \frac{1}{\zeta s} \frac{1}{R} \frac{1}{\zeta \sigma s + 1} \quad (5.7)$$

Pretende-se que o amortecimento  $\xi$  seja igual a 0,707. Assim, e sabendo que a equação anterior é de 2ª ordem e pode ser escrita na sua forma geral, como se apresenta:

$$\frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (5.8)$$

Portanto, especificando que o tempo de estabelecimento do sistema é  $t_s = 0,005$  s e com as seguintes constantes  $L = 19\mu H$ ;  $R = 17,5m\Omega$ ;  $\xi = 0,707$ , tem-se as seguintes equações de onde se calculam os valores necessários para determinar  $K_i$  e  $\zeta_i$ , os principais parâmetros do controlador.

$$\omega_n = \frac{3}{ts\xi} = 848.7 \text{ [rad/s]} \quad (5.9)$$

$$\zeta\sigma = \sqrt{\frac{1}{2\omega^2}} = 0.00083 \text{ s} \quad (5.10)$$

$$K_i = \frac{\zeta R}{4\xi^2\tau} = 0.011449 \quad (5.11)$$

$$\zeta_e = \frac{L}{R} = 0.000743 \text{ s} \quad (5.12)$$

$$\zeta_m = \frac{JR}{K^2} = 0.011848 \text{ s} \quad (5.13)$$

Sabendo que a equação do controlador PI é dado por:

$$G_{PI}(s) = K_i + \frac{K_i}{s\zeta} \quad (5.14)$$

Substituindo os valores calculados, vem que  $K_p = 0.00783$  e  $K_i = \frac{0.00783}{0.000743} = 10.5$ . De referir, que o valor de  $\zeta_e$  é ajustado de modo a que seja um múltiplo inteiro do tempo de amostragem do sistema global.

Mais detalhe quanto ao dimensionamento da malha de controlo de corrente pode ser encontrado na referência [8].

## 5.2.5 Sistema de Armazenamento – Baterias

O sistema de armazenamento de energia é como já foi referido anteriormente o subsistema crítico de toda a cadeia de propulsão. Sabe-se do capítulo 3 que uma bateria tem inúmeros efeitos a decorrer quer em funcionamento, quer em repouso e que alguns desses efeitos estão relacionados directamente uns com os outros. No entanto, para o modelo que se está a construir os efeitos mais importantes a ter em conta são: as correntes de carga, descarga e o nível de tensão das células em função do estado de carga da bateria. Modelos que contemplem o número de ciclos que a bateria suporta e quais os seus níveis de auto-descarga são desnecessários uma vez que se admite que a utilização das baterias será para uma prova que dura entre 30 a 35 minutos, onde a taxa de auto-descarga não é significativa. Iguamente o número de ciclos em nada influenciará o desempenho do sistema, pois assume-se que o sistema de armazenamento não tem mais do que 100 ciclos completos de descarga. Portanto com os efeitos mencionados inicialmente poder-se-á estimar qual será o estado de carga da bateria no final de uma prova de *endurance*. Contemplando estes efeitos poder-se-á compreender até que ponto o desempenho da cadeia de propulsão é afectada, pois a partir de uma dada profundidade de descarga da bateria, a carga retirada da mesma é maior para uma mesma corrente que se pretende na carga. À medida que o estado de carga diminui, a tensão aos terminais de cada célula diminui e a corrente retirada da bateria aumenta pois a resistência interna aumenta. Na figura 30, demonstra-se o efeito e como se pode verificar à medida que a corrente de descarga da bateria aumenta a capacidade em Ah da célula diminui.

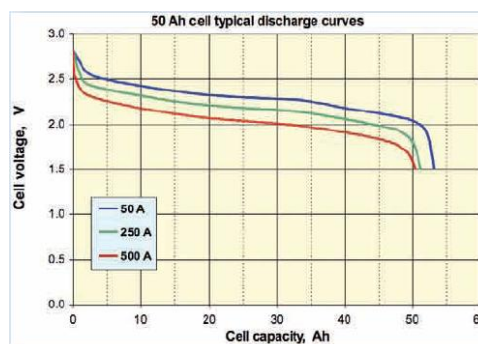


Figura 29 Variação da tensão em função da corrente de descarga aplicada à célula.

Para reproduzir o efeito da tensão das células e correntes de descarga e carga em função do estado de carga, é necessário recorrer a uma tabela tridimensional para as correntes de carga e descarga. Juntamente da *LiFeBatt* [4] fabricante de baterias de lítio ferro fosfato, obteve-se curvas referentes à tensão da célula em função do estado de carga da bateria, para quatro correntes de descarga. Sendo cada célula dotada de uma capacidade de 10 Ah e tendo em conta que os dados obtidos referem-se a taxas de descarga de 1C; 5C; 10C e 14C (1C = 10 Ah) é possível através desta tabela tridimensional extrapolar qual será o valor de tensão do sistema de armazenamento, para um dado estado de carga e corrente de descarga. Como se verifica na figura seguinte, o modelo implementado em MATLAB/Simulink a tensão aos terminais do motor vai diminuindo à medida que o estado de carga vai diminuindo. Por sua vez, o estado de carga vai diminuindo à medida que é retirada carga da bateria. Essa carga retirada é tida em conta na malha de retroacção que existe no modelo e na qual é calculado o integral da carga utilizada até ao instante em que se está. Esse resultado está em Ah. Portanto o estado de carga num dado instante é dado pela seguinte equação:

$$SOC = \frac{I_s - \int_{3600}^{I_u}}{C \times 100} [\%] \quad (5.15)$$

Em que:

- $I_s$ , corresponde a corrente solicitada pelo motor.
- $I_u$ , corresponde ao somatório da corrente usada pelo motor até ao momento
- $N$  corresponde ao número de conjuntos de baterias que estão associados em paralelo.
- $C$  corresponde à carga total que a bateria dispõe. Esse valor é dado por  $N \times 10$  Ah pois cada célula tem uma carga de 10 Ah.

Quando o carro trava, parte da energia cinética do protótipo pode ser recuperada a fórmula anterior em vez de estar a subtrair, passa a ser dotada do sinal de mais, pois passa-se a ter uma corrente com um sentido contrário e que circula do motor para a bateria, carregando deste modo esta última.

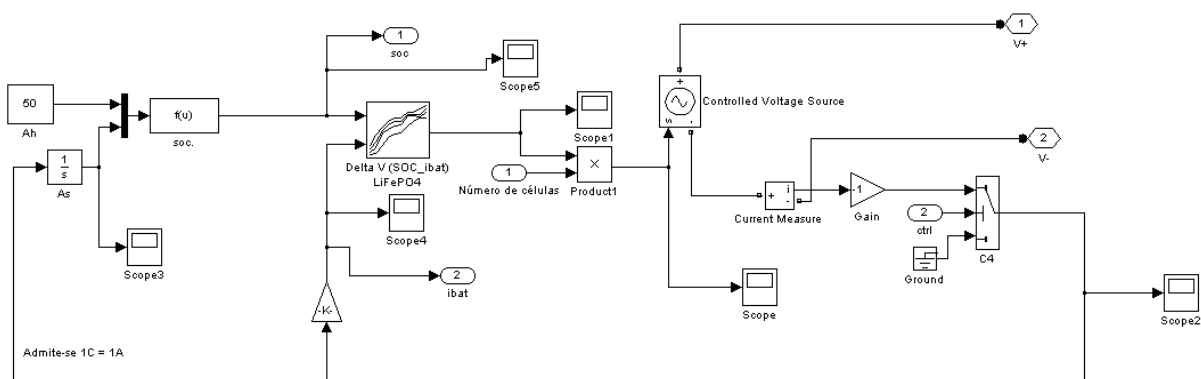
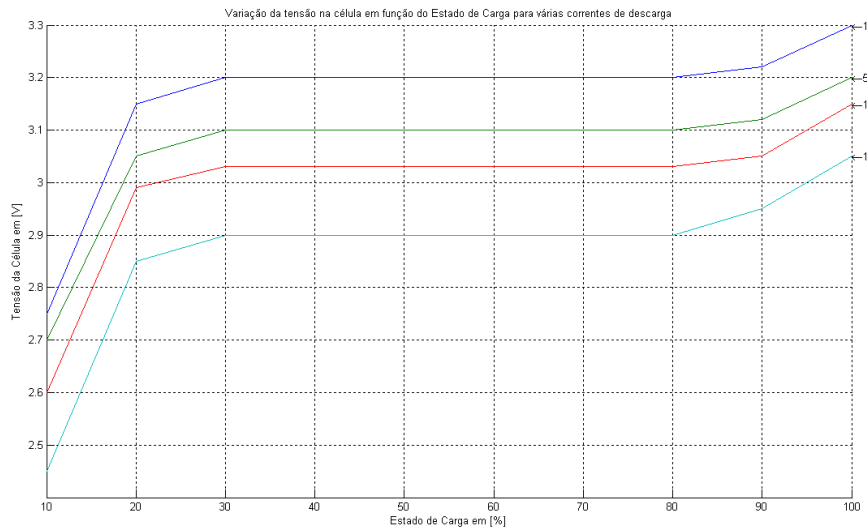


Figura 30 Modelo do sistema de armazenamento de energia em MATLAB/Simulink.

Os efeitos da temperatura, na capacidade da célula e na tensão da célula não estão contemplados no modelo, devido à muito pouca informação existente e que se deve à grande competitividade existente entre as várias empresas do ramo e que tentam ao máximo não disponibilizar informação que possa ser utilizada pela concorrência.



**Figura 31** Variação da tensão em função do estado de carga, para várias correntes de descarga.

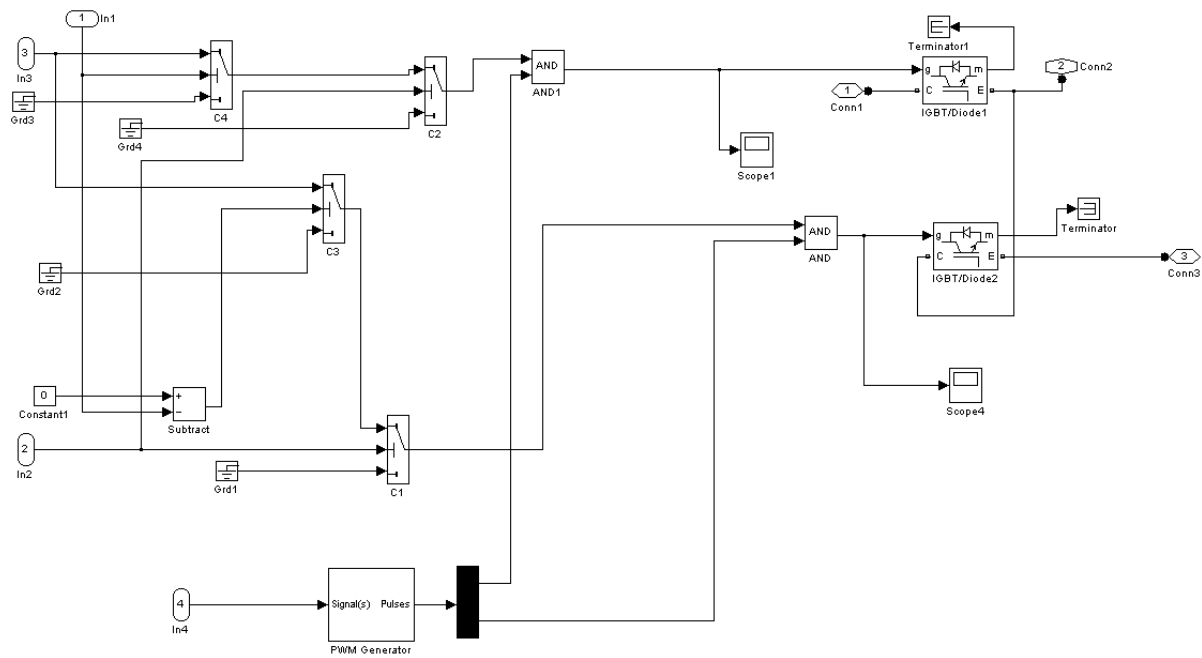
Na figura 32 encontram-se representadas as diferentes curvas utilizadas para a realização da tabela tridimensional, para a situação de descarga, com correntes de 10 A; 50 A; 100 A e 140 A. Como se pode verificar a tensão da célula diminui à medida que o estado de carga diminui. Igualmente observa-se que quanto maior for a corrente de descarga mais rapidamente a tensão da célula cairá para os 2,1 V, valor mínimo nominal de uma célula de LiFePO<sub>4</sub>. Para garantir uma maior longevidade ao sistema de armazenamento, não se permite que a tensão diminua para baixo de 2,4 V.

## 5.2.6 Conversor de 2 Quadrantes

O conversor de 2 quadrantes foi modelado de modo a que realizasse as comutações dos semicondutores, nos instantes em que o modo de funcionamento da máquina transita de motor para gerador ou vice-versa. O IGBT 1 está ligado quando a máquina está a funcionar como motor, ou seja, o veículo está a acelerar enquanto que, o IGBT 2 está desligado. Quando há uma travagem o IGBT 1 é desligado e o IGBT 2 é ligado de modo a permitir que a corrente possa fluir do circuito da armadura para o sistema de armazenamento de energia. A corrente de carga permitida por cada conjunto de células associadas em paralelo é de 30 A, por exemplo se tivermos 3 bancadas associadas em



paralelo será possível recuperar até 90 A numa travagem. Na figura 33, encontra-se o modelo do conversor de 2 quadrantes implementado em ambiente MATLAB/Simulink.



**Figura 32** Conversor de 2 quadrantes em ambiente Simulink.

Os interruptores ideias comandam a polarização dos semicondutores. Os interruptores C1 a C4 garantem que os IGBT's estão devidamente polarizados consoante o piloto acelere ou trave. Como se viu anteriormente, a tensão aos terminais do motor não necessita de ser sempre 144 V, mesmo quando se está a acelerar. Viu-se igualmente, que o controlador calcula qual o valor de tensão necessário para alimentar o motor numa dada situação/regime. Assim coloca-se à entrada da porta do IGBT uma porta lógica AND que para além do sinal referido anteriormente que indica se o piloto está a acelerar ou a travar, recebe um sinal proveniente de um PWM. O bloco do PWM recebe o sinal proveniente do controlador e compara esse sinal com uma onda portadora que é gerada internamente no bloco PWM. Ao realizar a comparação destes dois sinais, é emitido um sinal que comanda o disparo dos IGBT's controlando assim o valor de alimentação entregue à carga. A frequência de funcionamento do PWM é de 16 kHz.. Na equação (5.16) demonstra-se matematicamente o que foi referido no parágrafo anterior:

$$U_{medio} = \frac{1}{T_{PWM}} \int u_{contro} dt \quad (5.16)$$

A portadora utilizada no PWM é uma onda triangular, tal opção deve-se à simetria deste tipo de onda o que permite que sejam geradas menos harmónicas de corrente e tensão, ao contrário do que sucede, em relação a uma portadora de dente de serra. Neste subsistema não é contabilizado as perdas por cada comutação nos semicondutores, no entanto é um dos melhoramentos que deverá ser introduzido ao modelo, visto que é importante quantificar a quantidade de energia dissipada nos semicondutores de modo a não danificá-los por má utilização.

### 5.2.7 Sistema completo

Para a realização da simulação pretendida, tem de se juntar todos os elementos previamente definidos. Na figura 34, encontram-se os elementos essenciais do sistema, num fluxograma que se pretende que seja elucidativo da interacção dos diferentes subsistemas que compõem o modelo. Assim, como se verifica na figura 34, a solicitação realizada por parte do piloto dá os devidos sinais de referência em binário e corrente para o motor eléctrico e controlador de corrente respectivamente. Consoante os valores de saída por parte do motor eléctrico em corrente, haverá um sinal de erro associado entre a referência e a dita saída no controlador. Desse sinal de erro sairá o valor de tensão que deverá alimentar o motor eléctrico, controlando deste modo o seu comportamento para que o valor de saída seja idêntico ao da referência. O sistema de armazenamento de energia fornece/recebe energia para/do sistema. O sentido do fluxo de energia é controlado pelo conversor de 2 quadrantes. Este comando do fluxo de energia é realizado pelo PWM que emite os impulsos que comandam os IGBT's, sendo que estes últimos apresentam à carga o valor médio de tensão e corrente solicitado por esta última.

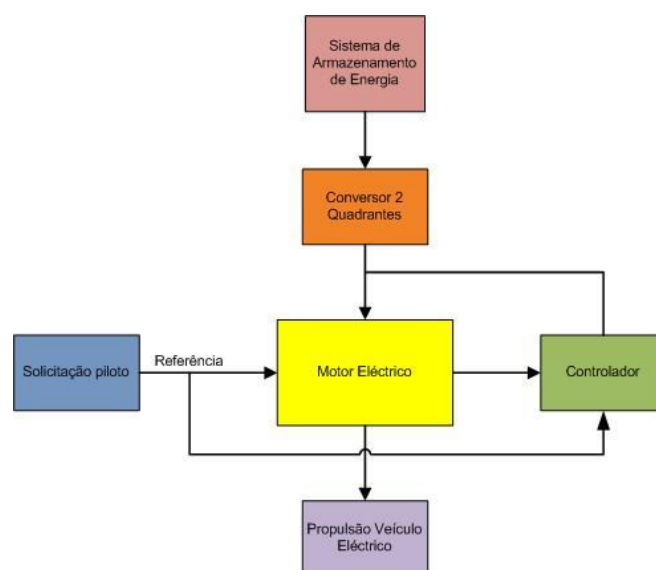


Figura 33 Diagrama de blocos do Sistema de Propulsão Eléctrica.

A frequência de amostragem do sistema total é de 371.5 $\mu$ s. O sistema para realizar uma simulação de uma volta a pista, retira 153432 pontos, pois são 2692 pontos por segundo. A frequência de amostragem do sistema é duas vezes superior à frequência do controlador. Na figura 35 está representado o sistema global, com os principais subsistemas, implementado em MATLAB/Simulink.

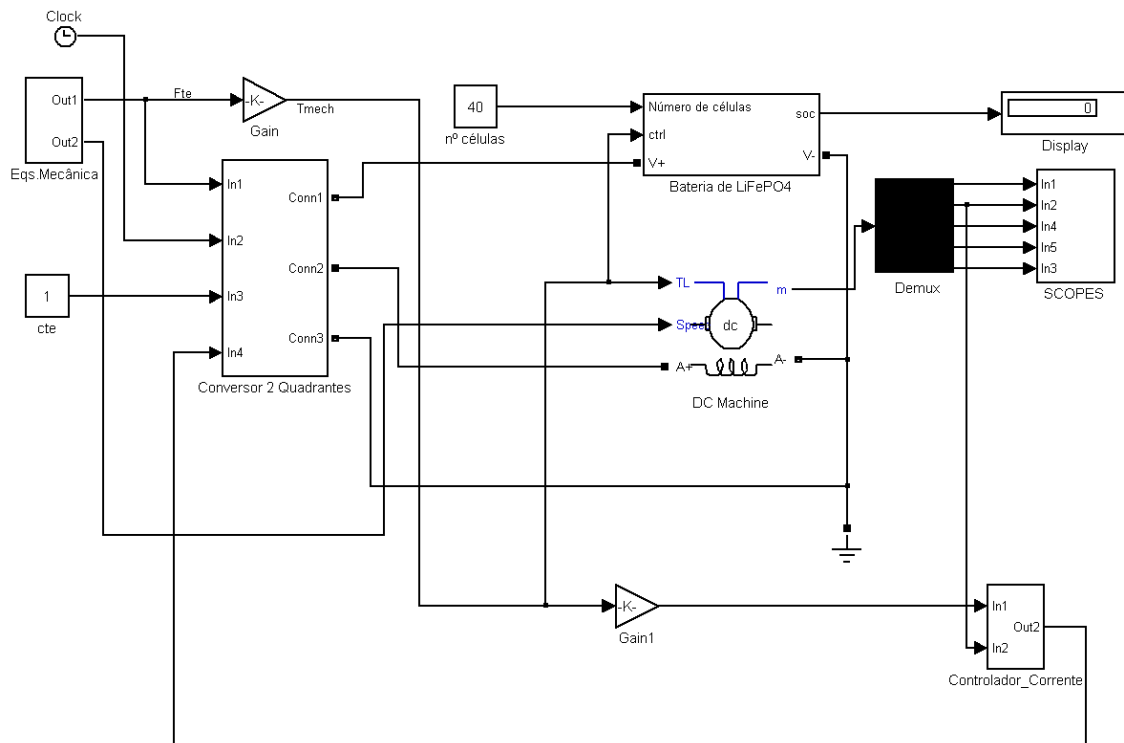


Figura 34 Sistema completo em ambiente MATLAB/Simulink.

### 5.3 Conclusão

À semelhança do que se estabeleceu inicialmente para os objectivos do projecto, o modelo proposto visa essencialmente calcular a força de tracção necessária para propulsionar o veículo eléctrico à velocidade solicitada pelo piloto. É com essa força que se obtém o valor do binário mecânico e corrente de referência, necessários para que o motor desenvolva o binário e potência necessária. A este nível tem-se a possibilidade de compreender se o motor é capaz de desenvolver os regimes que a carga lhe solicita. Ao mesmo tempo, com o sistema de armazenamento de energia, pretende-se estimar um valor da energia necessária para propulsionar um protótipo deste tipo, numa pista com as especificações da SAE num regime transiente durante uma distância total de 22 km. Efectivamente é este último resultado, o mais importante e que será conhecido no capítulo seguinte. Se o protótipo não apresentar capacidade de finalizar o *Endurance* terá de se colocar uma maior quantidade de energia no protótipo com o custo adicional de se aumentar o peso do veículo. Mais energia armazenada implica aumentar o peso a transportar, o que por sua vez significa aumentar a

energia a entregar à carga para propulsionar o veículo. Assim, ter-se-á de comprovar qual a melhor solução, se aumentar a quantidade de energia ou se diminuir a velocidade a que o protótipo se desloca. Fundamental será no futuro, após a aquisição de um motor eléctrico caracterizá-lo em testes de bancada de modo a melhorar os modelos até agora implementados. Outra área onde se poderá evoluir, é tornar o sistema de reaproveitamento de energia mais completo e que o mesmo tenha em conta onde é que seria realizada a recuperação de energia, ou seja, se o mesmo está implementado no eixo traseiro ou dianteiro. Sabe-se de experiências de outras equipas que a recuperação de energia tem um rendimento superior se implementado no eixo dianteiro. Tal deve-se à transferência de peso da traseira para a dianteira que ocorre em qualquer travagem.

## 6 Resultados obtidos por Simulação

### 6.1 Introdução

Neste capítulo, vai-se por simulação verificar qual é a autonomia que o protótipo eléctrico pode alcançar. Os dados serão repetidos 27 vezes de modo a que sejam percorridos os 22 km da prova de *endurance*. Apesar desta última ser a prova mais importante, vamos também simular qual será a velocidade atingida pelo protótipo na prova de aceleração, bem como qual será o tempo que o protótipo demorará a cumprir os 75 metros. Iremos também analisar em maior detalhe os dados referentes a uma volta à pista, pela sua utilidade. Todos estes dados serão comparados com os dados que a equipa detém do protótipo FST-03. Um protótipo dotado com um motor de combustão interna. Realça-se para já que a pista tem os seus pontos de maior velocidade em pontos intermédios e que a autonomia apresentada pelo protótipo em muito dever-se-á à solicitação imposta pelo piloto. Será portanto, importante que, durante a prova de *endurance*, o piloto faça uma gestão inteligente da energia disponível e aliar à energia disponível o estilo de condução mais adequado. Assume-se de que o sistema de propulsão eléctrica mantém uma eficiência constante ao longo do tempo. Para finalizar, é necessário ter em conta, que ao longo das várias simulações não é tido em conta as capacidades cinemáticas do veículo, ou seja, efeitos relativamente à transferência de massa e outros efeitos que saem fora do âmbito desta dissertação.

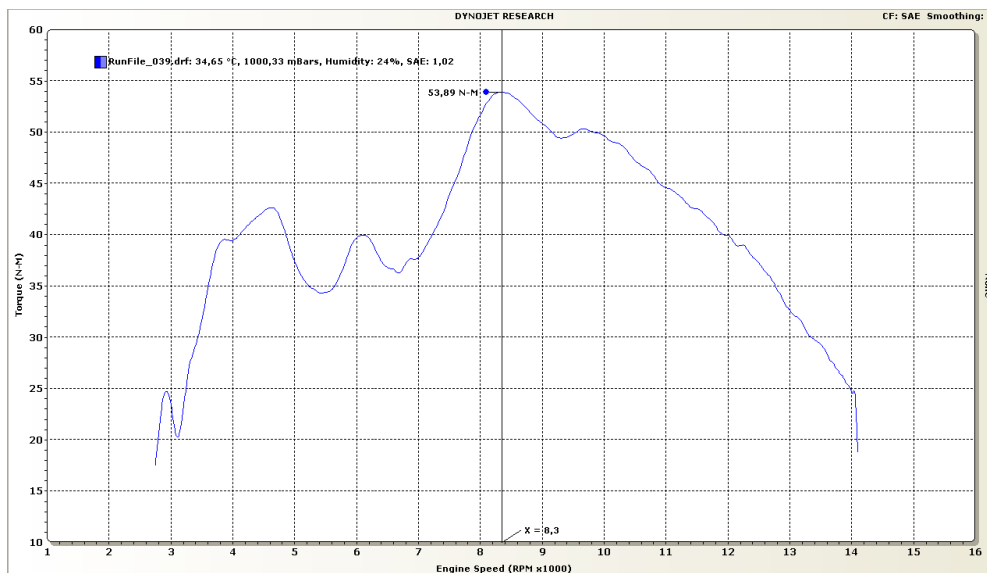


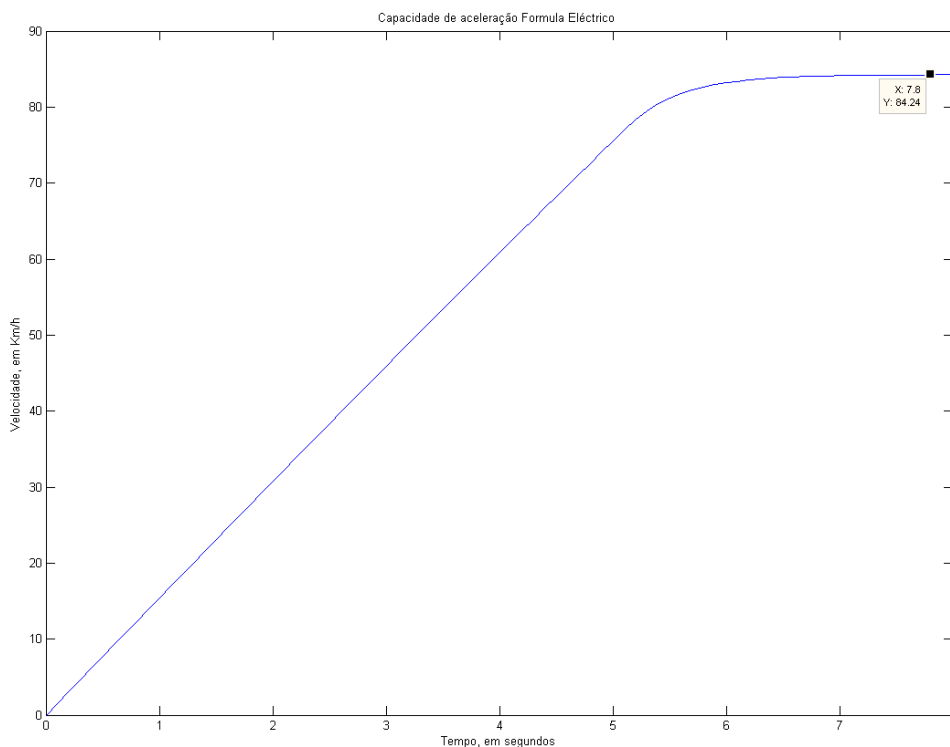
Figura 35 Curva de Binário em função das RPM do motor de combustão interna.

Na figura 36, o binário máximo do motor de combustão interna é de 53.89 N.m às 8300 RPM. O motor eléctrico simulado é caracterizado por um binário nominal de 66 N.m, sendo que esse binário

diminui à medida que a velocidade de rotação aumenta, como é descrito pela equação (4.9). A velocidade de rotação máxima do motor eléctrico é de 3600 RPM.

### 6.1.1 Prova de aceleração

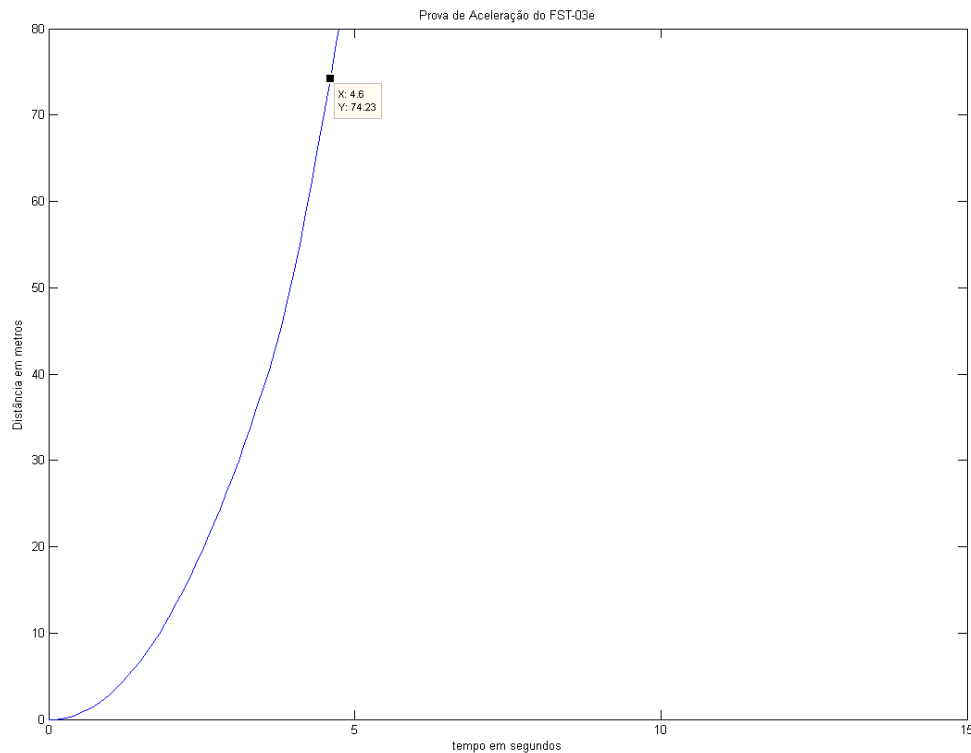
A prova de aceleração é uma prova em que é pretendido avaliar a capacidade de aceleração do protótipo. Assim a prova consiste em acelerar o mais rápido possível numa distância de 75 metros. Na figura 37 tem-se a velocidade do protótipo em função do tempo. Consta-se que pelo facto de o protótipo estar a utilizar uma relação de transmissão de 4, a velocidade máxima atingida pelo protótipo é de 84.24 Km/h. Essa velocidade é atingida ao fim de 5 segundos.



**Figura 36 Velocidade do protótipo em função do tempo, Prova de Aceleração.**

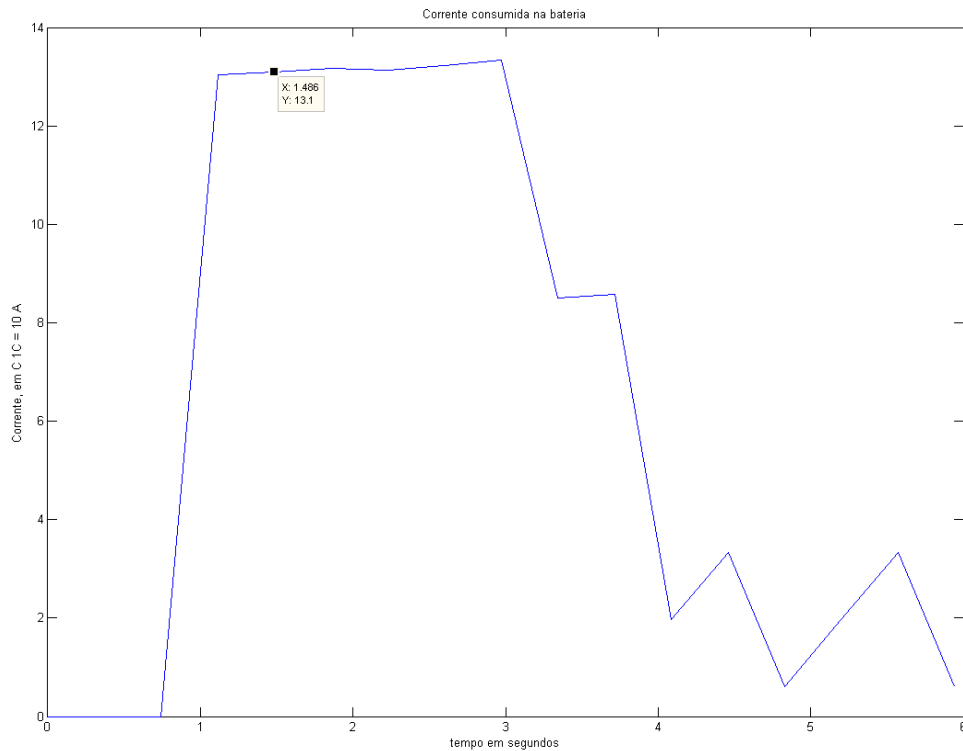
Por sua vez, na figura 38 constata-se que o protótipo percorre os 75 metros em 4,6 segundos. Pelo que a velocidade máxima é atingida nos metros finais da prova. Como é visível o protótipo eléctrico é ainda 0,65 segundos mais lento que o protótipo convencional, pois o FST-03 tem a capacidade de realizar a prova de aceleração em 3,95 segundos. Tal razão deve-se ao maior peso do protótipo eléctrico que pesa com piloto 330 kg enquanto que o protótipo a gasolina pesa 295 kg. Esta maior diferença de peso deve-se ao sistema de armazenamento de energia, que num veículo eléctrico é mais pesado, devido à menor densidade de energia das baterias. No entanto, analisando de uma forma mais atenta, verifica-se que o protótipo eléctrico é 14 % (0.65 / 4.6) mais lento que o protótipo a combustível, ao mesmo tempo que o primeiro é 13 % (30 / 330) mais pesado que o segundo. Quer isto dizer que o desempenho do veículo eléctrico em kg/cv é muito idêntica à do

protótipo convencional. Para corroborar este resultado é necessário ter em conta que o protótipo eléctrico é em tudo idêntico ao protótipo FST-03 à excepção do sistema de propulsão. Como está claro, está-se a desprezar contribuições dos centros de gravidade e distribuições de massa, no entanto, tais parâmetros saem fora do âmbito desta dissertação.



**Figura 37 Distância percorrida em função do tempo na Prova de Aceleração.**

Analisando a figura 39 verifica-se o comportamento da corrente no circuito da armadura do motor eléctrico, ao longo de uma tentativa, na prova de aceleração. A corrente máxima é de 655 A. Das especificações técnicas do motor eléctrico, dadas pelo fabricante, sabe-se que o motor eléctrico utilizado suporta correntes de 400 A durante um período de tempo de 1 minuto. O que corresponde a uma energia total de 168 kJ. Portanto, pode-se alimentar o motor eléctrico com uma corrente tão elevada quanto se queira, desde que não se ultrapasse os 168 kJ de energia. Sendo a cadeia de propulsão alimentada por um sistema de armazenamento de energia real, a corrente que pode ser fornecida ao motor é limitada pelas próprias células. Isto é, desprezando os IGBT's. Assim, a corrente máxima é de 700 A para um período de 18 segundos. Esta corrente é conseguida pois cada conjunto de 144 V x 10 Ah tem a capacidade de fornecer 140 A, ou seja, o sistema de armazenamento de energia do protótipo eléctrico tem uma energia total de 7,2 kWh (144 V x 50 Ah). No caso da figura 38 a corrente fornecida ao motor é de 655 A, durante 4 segundos o que produz um total de 22,5 kJ de energia excessiva na forma de calor, pois o motor não será capaz de por si próprio dissipar essa energia. No entanto, como se pode verificar o valor de energia produzido não coloca em risco a integridade do motor.



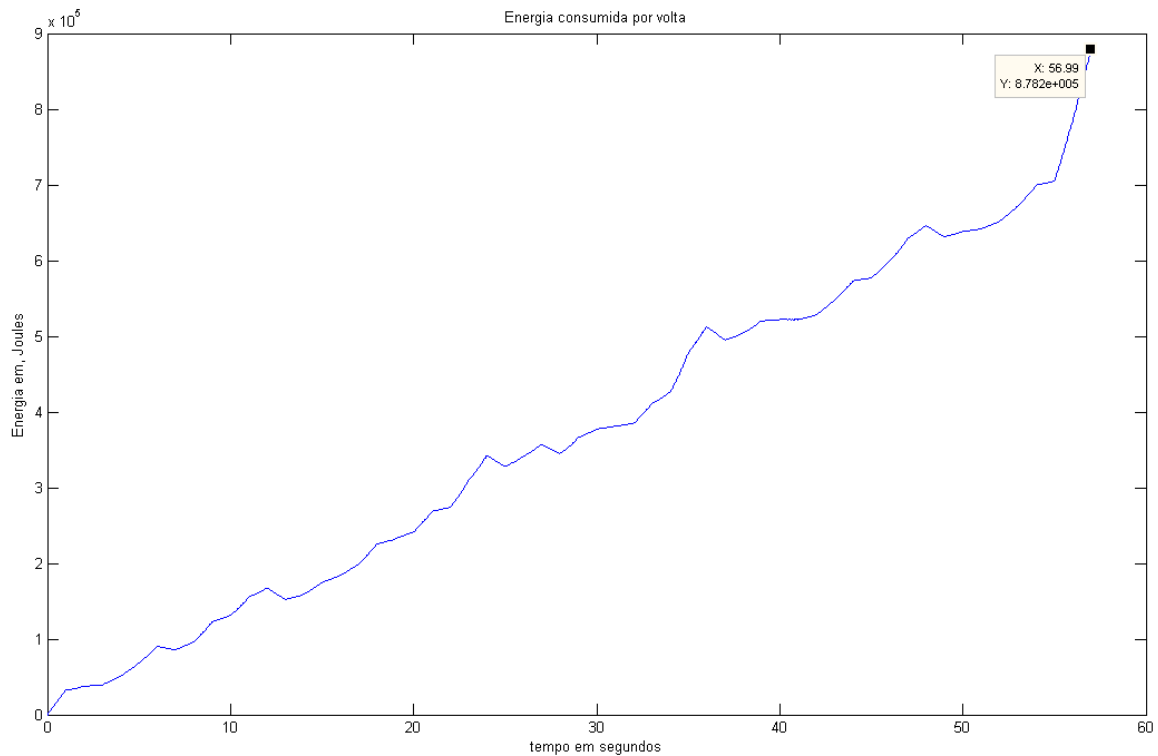
**Figura 38 Variação da corrente na Prova de Aceleração.**

### 6.1.2 Prova de Qualificação - *Sprint*

Nesta secção e na próxima, é realça-se que o ciclo imposto ao protótipo eléctrico, é idêntico à melhor volta do protótipo a gasolina durante a competição em 2008, mas que não traduz as capacidades dinâmicas máximas a que o protótipo convencional é capaz de desenvolver. Isto não invalida os resultados que se irão demonstrar, pois o objectivo é calcular o valor mínimo de energia necessário para o sistema de armazenamento de energia.

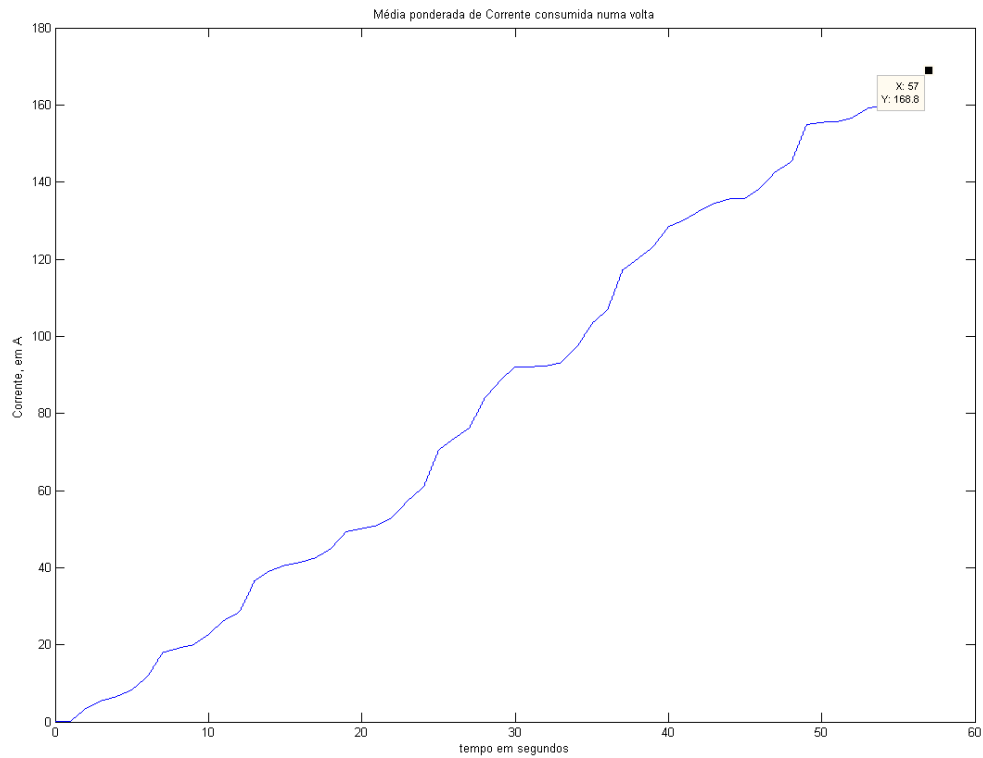
Esta prova tem por objectivo avaliar dinamicamente o comportamento global do protótipo. A pista tem uma distância total de 830 metros e é idêntica à do *Endurance*. São utilizados os dados recolhidos pela equipa aquando da participação em 2008 no circuito de *Hockenheim* na *Formula Student Germany*.





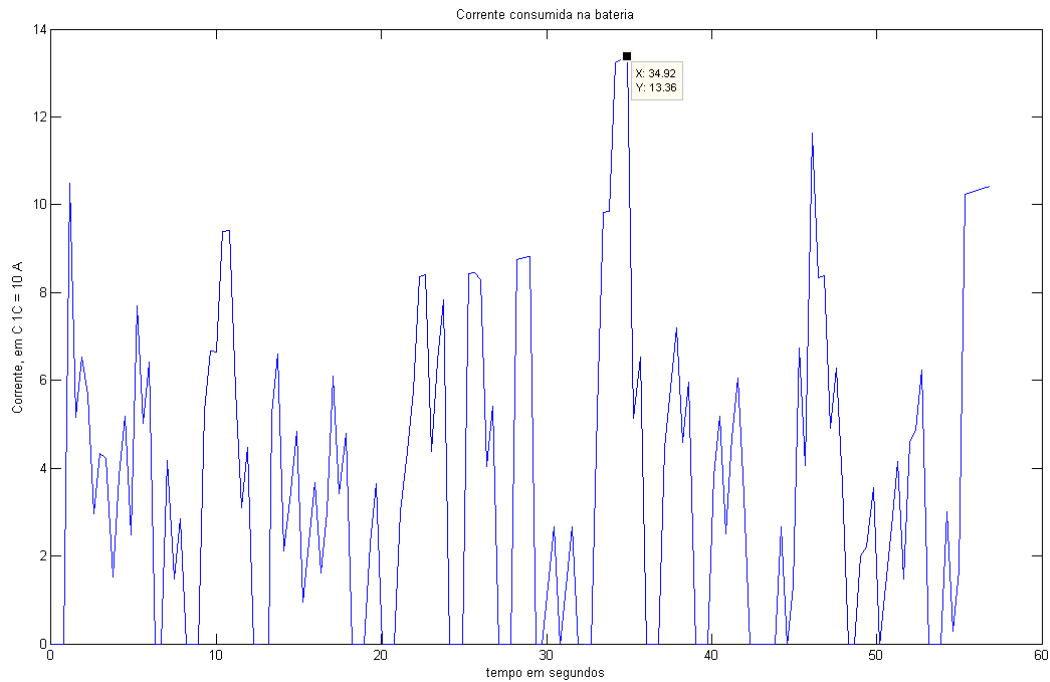
**Figura 39** Energia consumida ao longo de uma volta no *Sprint*.

Os resultados servem para calcular a quantidade de energia que o protótipo necessita para cumprir uma volta à pista e o valor médio de corrente consumido pelo motor eléctrico. Com este último, poder-se-á concluir se o motor eléctrico utilizado está correctamente dimensionado ou não para a *performance* solicitada pelo piloto. Como se pode constatar na figura 40, o protótipo consome 878.2 kJ por volta o que corresponde a 0.244 kWh por volta, ou seja, o estado de carga é de 96,61%. A média de corrente que é fornecido ao motor eléctrico é de 168.8 A, como se pode verificar na figura 41. Este resultado demonstra, que para um desempenho idêntico ao demonstrado pelo protótipo convencional, o protótipo eléctrico apesar do seu maior peso consegue desenvolver a potência e binário solicitados sem que o motor eléctrico ultrapasse o seu valor de corrente nominal, que é de 200 A.



**Figura 40 Corrente média consumida numa volta, na Prova de *Sprint*.**

Como se constata na figura 42, a corrente máxima debitada pelo sistema na prova de sprint é 660 A ( $13,36 C = 133,6 A$ , por cada conjunto de baterias), durante 0,2 segundos. Este pico ocorre quando o protótipo entra na recta interior do circuito, ou seja, é num ponto em que o piloto exige o máximo do protótipo.



**Figura 41 Corrente consumida na bateria – *Sprint***

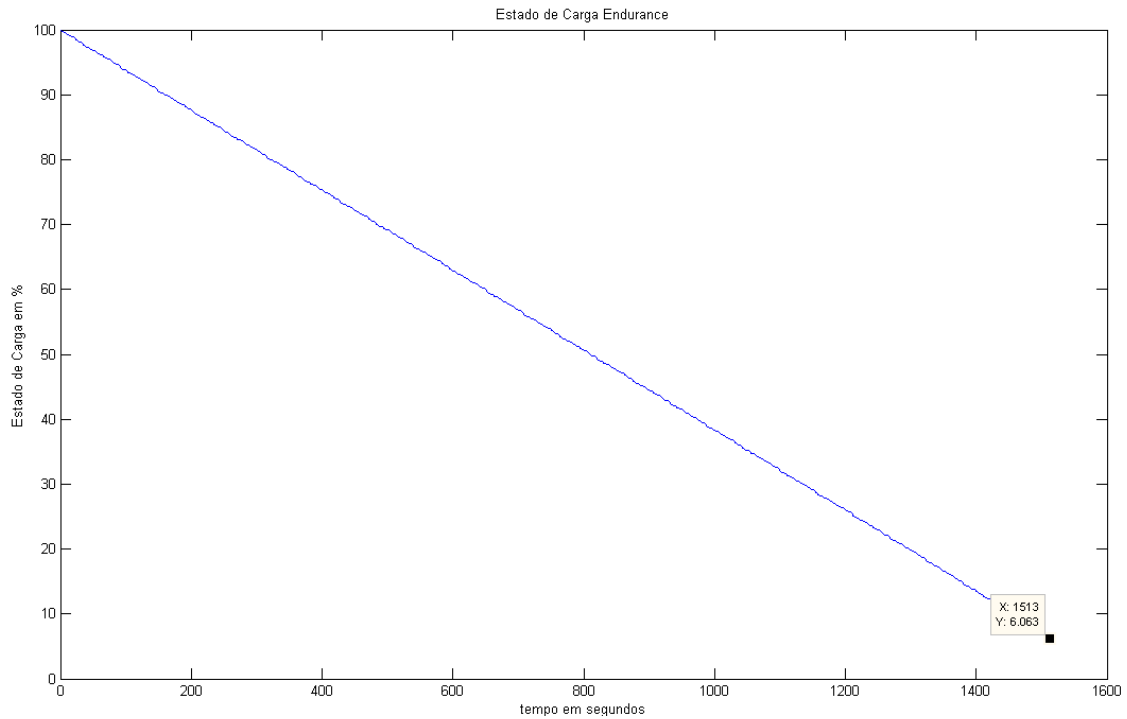
### 6.1.3 Endurance sem regeneração de energia

Esta prova constitui 42.5 % da pontuação total possível de atingir na competição. Como tal é a prova mais importante e é imperioso que o protótipo finalize a prova. Para tal, é necessário garantir que a quantidade de energia que o protótipo eléctrico armazena no sistema de armazenamento de energia é suficiente para cumprir os 22 km, com o desempenho pré-definido. Visto não existirem dados reais referentes a um protótipo eléctrico deste tipo, inicialmente analisa-se a quantidade de energia que o protótipo FST-03 utilizou no ano de 2008 no traçado de *Hockenheim*. Assim e para cumprir a prova de 22 km o protótipo FST-03 consumiu 3.67 l de combustível. Sabendo que a densidade de energia da gasolina é de 34 MJ/l, apresentando este resultado em termos de Wh/l tem-se:

$$\frac{34.6 \times 10^6}{3600} J/l = 9611,1 Wh/l \quad (6.1)$$

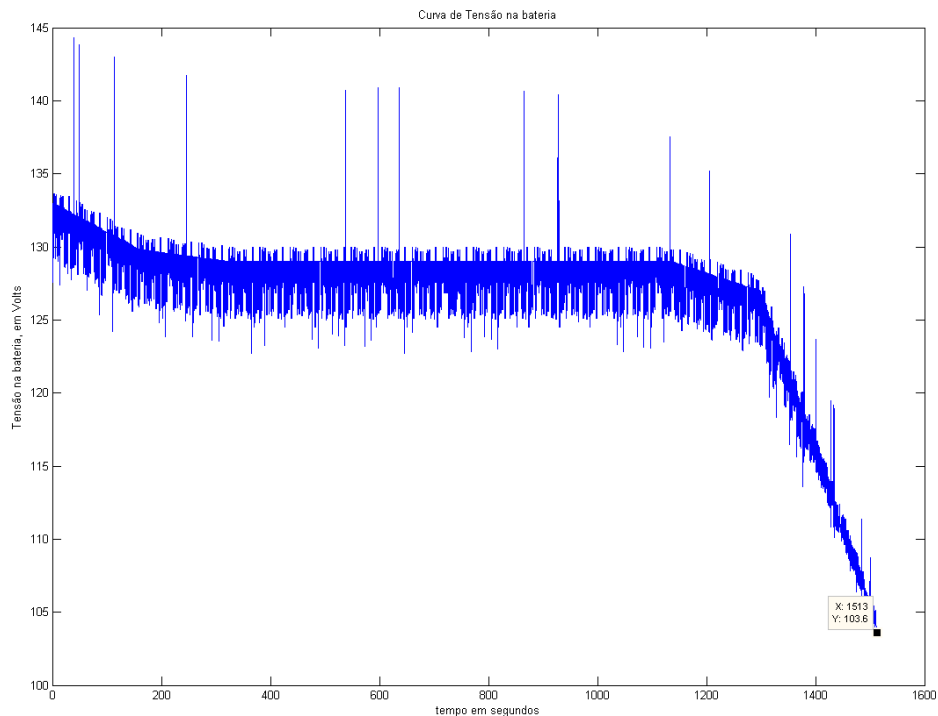
Assumindo que o protótipo FST-03 tem um rendimento de 20 % e multiplicando a equação (6.1) por 3.67 l tem-se que dos 35.273 kWh de energia consumidos pelo protótipo, só 7,1 kWh é que foram efectivamente utilizados para mover o protótipo, sendo a restante energia desperdiçada em perdas existentes no sistema, desde a admissão até ao contacto dos pneus com o asfalto. É com este resultado que se justifica a escolha da quantidade de energia estipulada para o sistema de armazenamento de energia. Repetindo o ciclo utilizado na prova de *Sprint* por 28 vezes cumpre-se a distância da prova de *Endurance*. Na figura 43 pode-se verificar que o protótipo eléctrico consome 94

% da energia total. Quer isto dizer, que o protótipo ao longo dos quase 30 minutos de prova consome 6.8 kWh de energia.



**Figura 42 Estado de Carga da bateria na Prova de *endurance*.**

Comparando este resultado com o que foi obtido, na volta de qualificação verifica-se que, se se multiplicasse o resultado da prova de Sprint por 28 voltas o total de energia utilizado seria de 6 kWh. Como se pode verificar o protótipo acaba por consumir mais energia. Tal deve-se a que à medida que o estado de carga diminui a corrente que é retirada da bateria vai aumentando, isto porque a resistência interna da bateria aumenta e a tensão nas células diminui, o que obriga a que a carga retirada da bateria seja superior. Este efeito pode ser verificado na figura 44.



**Figura 43 Curva de tensão da bateria ao longo da prova de *endurance***

Como se verifica na figura 44, a tensão na bateria tem um valor de 125 V e cai até aos 100 V, no intervalo de tempo compreendido entre os 1300 a 1513 segundos. A queda de tensão, no intervalo referido cinge-se em 25 V enquanto que, no intervalo até aos 1300 segundos a queda de tensão que ocorre no sistema de armazenamento de energia é de 10 V. O que demonstra, que o consumo de energia no sistema de armazenamento não é linear. Ambos os protótipos estiveram sob o mesmo tipo de solicitação por parte do piloto. Apesar do veículo eléctrico ser 30 kg mais pesado, ou seja, 11 % mais pesado que o protótipo convencional, verifica-se que o primeiro consome menos 5.6 % de energia que o segundo. Verifica-se que a energia possível de recuperar é 20 % da energia total consumida, ou seja, é possível recuperar até 1.44 kWh, o que corresponde a retirar um conjunto de baterias de 144 V x 10 Ah e que poderia representar numa diminuição de 20 kg de peso no protótipo. No entanto, é necessário ter em atenção que este resultado é meramente teórico e necessita de ser comprovado. Efectivamente o sistema de recuperação de energia terá no futuro, de ser muito mais elaborado, isto porque necessita de ter em conta a transferência de massa que ocorre em qualquer travagem. No Anexo A são apresentados o modelo utilizado e os resultados obtidos para o estado de carga e a curva de tensão em função do tempo, na prova de *Endurance*.

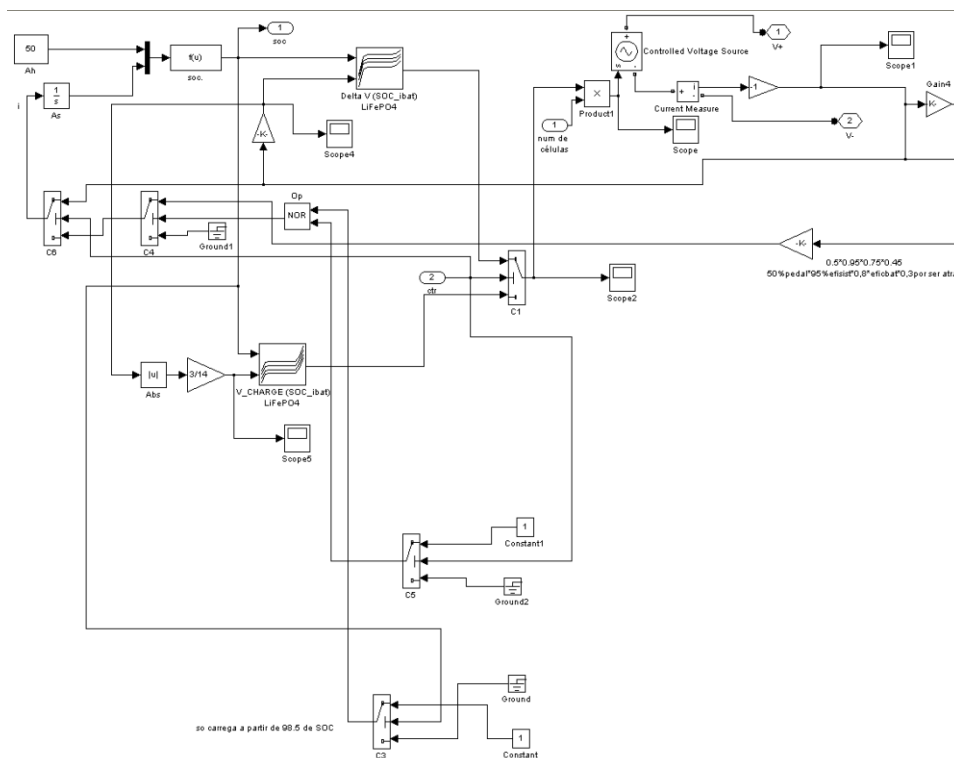
#### 6.1.4 Endurance com regeneração de energia

O modelo do sistema de armazenamento de energia, com sistema de reaproveitamento de energia está representado na figura 45. Como se verifica o modelo é meramente teórico e matemático. É acrescentado um bloco que contém a curva de tensão da célula em função do estado

de carga para diferentes correntes de carga, de modo a que seja realizado o reaproveitamento de energia quando o protótipo efectua uma travagem. Os vários interruptores C são utilizados para garantir que o protótipo só regenera energia se o estado de carga é inferior a 98 %. Da corrente total que o motor gera numa dada travagem devido a energia cinética que nele existe, só 17,1 % é considerado de poder ser recuperada, isto porque:

Só 50 % da energia que o veículo tem num dado instante é permitida [10] de ser aproveitada, dessa energia, assume-se que só 80 % é que será aproveitada, devido às perdas nos condutores, nas baterias e semicondutores. Desses 40 % só 95 % é que será entregue ao sistema de armazenamento de energia, devido às perdas que se assumem de 5 % no conversor de 2 quadrantes. Desses 38 % só 17,1 % será efectivamente reaproveitado numa travagem, isto porque assume-se que a força de travagem na traseira é de 45 %. O protótipo FST-03 tem para um setup base uma repartição de travagem de 55% - 45% na frente e traseira respectivamente.

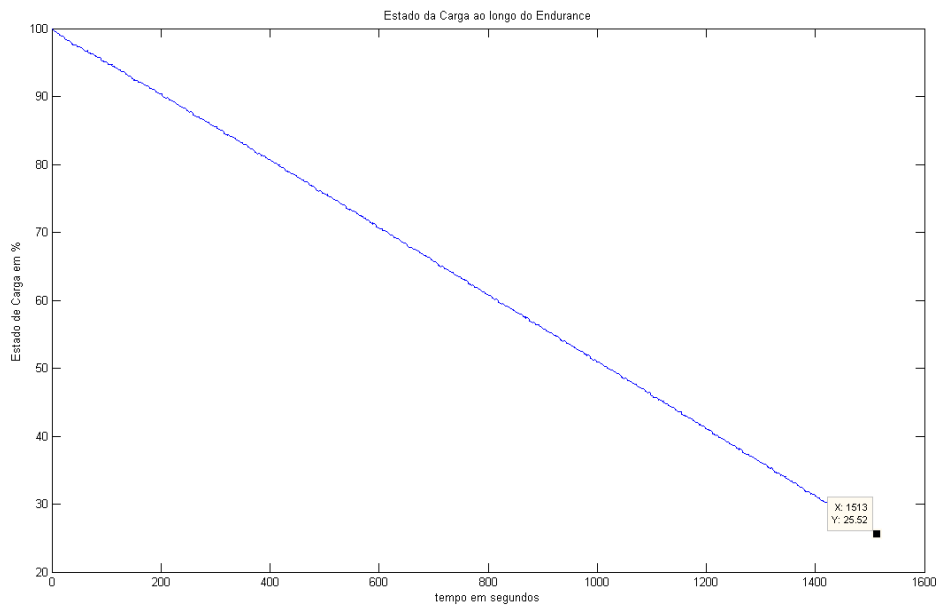
O modelo carece de um estudo muito mais elaborado onde se possam supor ou até estimar as contribuições negativas das grandezas em jogo. É importante que no futuro seja tenha em conta a transferência de peso durante uma travagem e encontrar o melhor compromisso para a repartição da travagem entre o eixo dianteiro e o traseiro [26].



**Figura 44 Modelo do sistema de armazenamento de energia com a recuperação de energia em MATLAB/Simulink.**

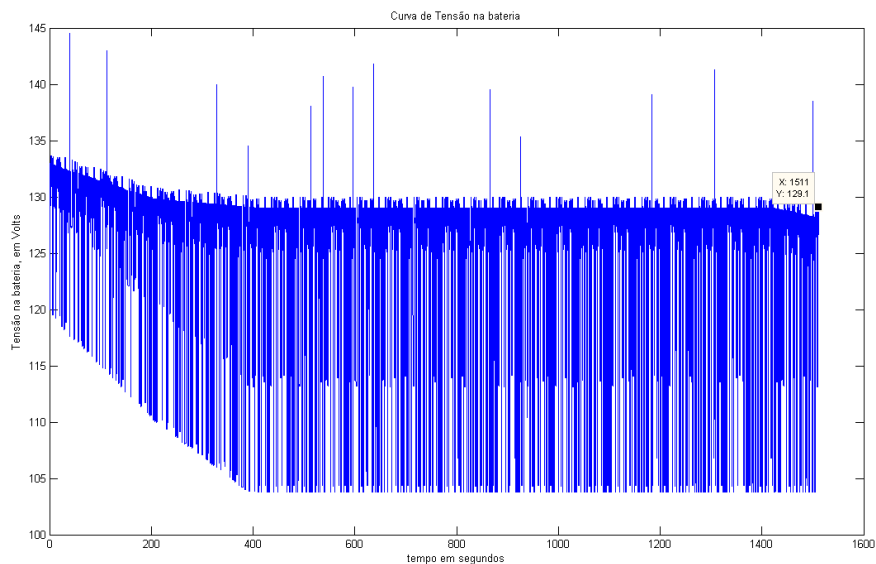
Na figura 46 observa-se que o protótipo eléctrico consome 74,48 % da energia total. Quer isto dizer, que o protótipo ao longo dos quase 30 minutos de prova consome 5.36 kWh de energia, ao

contrário dos 6.8 kWh que consome sem sistema de reaproveitamento de energia. Assim conclui-se que o protótipo consome menos 20 % de energia.



**Figura 45 Estado de carga da bateria, com sistema de reaproveitamento de energia**

Como se verifica na figura 47, a tensão do sistema de armazenamento de energia varia entre 136 V e 129 V. Como se observa, pela forma de onda o estado de carga da bateria está quase a atingir o ponto em que a tensão de cada célula deixará estar na zona plana da curva, que a descreve.



**Figura 46 Curva de tensão da bateria ao longo do *endurance***

## 6.2 Conclusão

Conclui-se de que o sistema de propulsão eléctrica dimensionado com as suposições tomadas ao longo do seu projecto garantem que o projecto atinja o seu maior objectivo, que é o do protótipo finalizar a prova de *endurance*. Assim o sistema final que se propõe ao fim desta primeira iteração do projecto, é o que se encontra na tabela 10

**Tabela 10 Componentes escolhidos e os seus respectivos custos.**

Componentes	Custo (€)
Baterias de LiFePO4 LifeBATT [4]	*1,44 kWh = 2664 \$ ~1782x 5 = 8910 €
Controlador Alltrax 2 Quadrantes, DCX 750 [24]	~1500 € *
Motor LMC 2D127Lynch Motors [9]	~3.000 €*
Cablagem de Alta Tensão e sistemas de segurança	Não estimado
Total	13.410 €

\* qualquer um dos preços indicados estão em constante alteração e não contém IVA nem custos de transporte.



## 7 Conclusões finais

### 7.1 Conclusão

Para melhor acompanhar esta fase de conclusões finais é importante recordar os principais objectivos para o protótipo eléctrico, que são::

- Segurança
- Custo final
- Funcionalidade, fiabilidade facilidade de implementação
- Peso
- Autonomia suficiente para a prova de *endurance*
- Capacidade de aceleração
- Protótipo com elevado potencial comercial

Estas características foram tidas em conta em todas as decisões do projecto da cadeia de propulsão eléctrica. O motor eléctrico de ímanes permanentes foi escolhido em detrimento da máquina de indução, pela sua maior densidade de potência, pela sua menor dimensão e pela sua superioridade em termos de eficiência. Isto porque nos primeiros 4 pontos dos objectivos, ambas as máquinas apresentam o mesmo desempenho.

O sistema de armazenamento de energia, seguiu a mesma heurística que as máquinas eléctricas. No entanto, sendo o sistema de armazenamento de energia o sistema crítico da cadeia de propulsão, é necessário encontrar os compromissos correctos de modo a que o conjunto final não seja penalizado. Assim, é necessário ter especial atenção às densidades de energia e potência das várias tecnologias de baterias, relegando para um segundo plano, o custo. Isto porque, a nível regulamentar o peso mínimo não é imposto, pelo que quanto mais leve o protótipo for, menos energia necessitará para ser movido. Como tal, das tecnologias disponíveis no mercado a que apresenta o melhor compromisso entre densidade de energia e potência é a tecnologia de íões de lítio. Após esta escolha, foi necessário garantir que a tecnologia escolhida não incorresse em riscos desnecessários para os utilizadores, como tal enveredou-se pela tecnologia de lítio ferro fosfato. Apesar do seu custo mais elevado, esta tecnologia tem uma maior longevidade do que as baterias de chumbo (PbA) ou as baterias de Hidretos Metálicos de Níquel (Ni-MH), ao mesmo tempo que garante maiores capacidades dinâmicas ao protótipo pela sua maior capacidade de fornecer energia à carga e pelo facto de ter uma maior densidade de energia (menor peso), o que permite mesmo sem a utilização de um sistema de reaproveitamento de energia, projectar um protótipo 30 kg mais pesado que o protótipo munido de um motor de combustão interna. No capítulo 6 verificou-se que apesar do veículo

eléctrico ser 13 % mais pesado o mesmo é 14 % mais lento que o protótipo movido a combustível. Isto na situação da prova de aceleração em que as capacidades do protótipo a combustível foram levadas ao máximo. Pode-se concluir que o desempenho de ambos os protótipos é aproximadamente semelhante em termos de kg/cv.

Igualmente, conclui-se que o sistema de propulsão (máquina eléctrica) está devidamente dimensionado para o efeito, pois numa volta à pista, na prova de *Sprint*, a média de corrente consumida é de 168.8 A, o que nos garante que o valor de corrente nominal não é ultrapassado e como tal o motor de ímanes permanentes é capaz de propulsionar o veículo eléctrico com as potências solicitadas numa prova de *Formula Student*. É importante referir que o ciclo com os dados referentes à prova de *endurance*, o protótipo a gasolina não foi submetido à sua máxima capacidade dinâmica, quer isto dizer que, o tempo necessário para cobrir a distância por volta seria menor. Daí que o protótipo eléctrico tenha a capacidade de nestas provas obter performances idênticas às do veículo convencional. No entanto, nestas provas o pretendido nunca foi comparar a performance pura que o protótipo eléctrico poderia ter, mas sim calcular as necessidades energéticas do mesmo.

Na prova de *endurance*, conclui-se, de que o protótipo eléctrico necessita de 6,8 kWh de energia para cumprir os 22 km e que o protótipo convencional necessita de 7.1 kWh. Assim, verifica-se que o protótipo eléctrico apesar dos seus mais de 13 % de peso necessita de menos 5.6 % de energia para cumprir os 22 km, assumindo-se que o protótipo convencional tem uma eficiência de 20 %.

## 7.2 Trabalho Futuro

Nesta secção apresenta-se algumas das sugestões para trabalhos futuro, que poderão continuar a ser desenvolvidos no âmbito do Projecto *Formula Student Técnico*:

- Os resultados obtidos da simulação da prova de *endurance*, revelam que o sistema de armazenamento de energia tem a capacidade suficiente para finalizar a prova. No entanto, é necessário ter em conta que se assume que o sistema mantém uma eficiência constante ao longo do tempo. Ora essa suposição é demasiado optimista, apesar de que devido à falta de experiência e de dados não é assumido qualquer valor para quantificar o efeito. Assim, no futuro e para um primeiro protótipo, a opção correcta é a de dimensionar o sistema de armazenamento de energia com uma capacidade de 144 V X 60 Ah, o que corresponde a um total 8,64 kWh de energia para o acumulador. A inclusão de mais um conjunto de baterias implicará um aumento de aproximadamente 20 kg no peso total do protótipo.
- Modelar a variação da temperatura do sistema de armazenamento de energia para várias correntes de descarga e carga.

- Modelar os efeitos da temperatura no motor eléctrico. Modelar a variação da potência de perdas em função da carga. Modelar a variação da força desenvolvida pelos ímanes em função do regime (carga) em que a máquina se encontra.
- Quantificar as perdas nos semicondutores e quantificar as temperaturas que os mesmos atingem para as cargas impostas.
- Estudar e implementar as novas técnicas de PWM para diminuir as potências de perdas por comutação nos semicondutores e aumentar o tempo de vida da bateria [25].
- Estudar e implementar um sistema de reaproveitamento de energia completo e mais próximo do real.
- Implementar um ambiente gráfico para o modelo criado e criar uma base de dados com diferentes tipos de hardware, tecnologias e equipamentos, como por exemplo motores, baterias e controladores.

## 8 Referências

- [1]. <http://www.acpropulsion.com/>
- [2]. Handbook of Batteries third edition 2008
- [3]. <http://www.teslamotors.com/>
- [4]. [http://www.lifebatt.co.uk/technical\\_overview.html](http://www.lifebatt.co.uk/technical_overview.html)
- [5]. <http://green.autoblog.com/2007/01/31/more-on-eesors-ultracapacitor-can-we-believe-the-hype/>
- [6]. M.Ehsani,Y.Gao,A. Emadi “Modern electric, hybrid and FC vehicle fundamentals,theory and design ” CRC Press
- [7]. P.Krause, O.Wasynczuk, S.Sudhoff “Analysis of Electric Machinery and Drive Systems,” 2<sup>nd</sup> edition Wiley-Interscience.
- [8]. G.Terörde, “Electrical drives and control techniques” acco
- [9]. <http://www.lemcoltd.com/>
- [10]. <http://www.formulastudent.de/electric/rules/>
- [11]. <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/>
- [12]. Chee Mun Ong “Dynamic Simulation of Electric Machinery” Prentice Hall 2006
- [13]. Marques Gil “Controlo de Motores Eléctricos”,IST 2008
- [14]. Marques Gil, “Dinâmica das máquinas Eléctricas”, IST , 2002
- [15]. Bernhard Schweighofer, Klaus M. Raab, and Georg Brasseur, “Modeling of High Power Automotive Batteries by the Use of an Automated Test System”, IEEE 2003
- [16]. Ma Zi-lin, Mao Xiao-jian, Wang Jun-xi, Qiang Jia-xi, Zhuo Bin, “Research on SOC Estimated Strategy of Ni/MH Battery Used for Hybrid Electric Vehicle”, IEEE 2008
- [17]. C.C Chan, “The State of the Art of Electric Vehicles”, IEEE 2004
- [18]. Guzella Lino, Sciarretta Antonio, “Vehicle Propulsion Systems Introduction to Modelling and Optimization ”, Springer, 2005
- [19]. M. Miller John, “Propulsion System for Hybrid Vehicles ”, IET, 2003

- [20]. B. G. Kim, F.P. Tredeau, Z. M. Salameh, "Performance Evaluation of Lithium Polymer Batteries for Use in Electric Vehicles" IEEE, 2008
- [21]. Min Chen, *Student Member, IEEE*, and Gabriel A. Rincón-Mora, *Senior Member, IEEE* "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting run time and I-V Performance", IEEE 2006
- [22]. A. Vincent Colin, Scrosati Bruno, "Modern Batteries an Introduction to Electrochemical Power Sources", Butterworth- Heinemann 1997 second edition
- [23]. Valentine Richard, "Motor Control Handbook ", McGraw-Hill, 1998
- [24]. [http://www.alltraxinc.com/Products\\_AXE.html](http://www.alltraxinc.com/Products_AXE.html) [http://www.alltraxinc.com/Products\\_DCX.html](http://www.alltraxinc.com/Products_DCX.html)
- [25]. <http://www.irf.com/indexnsw.html>
- [26]. Keith W. Benson, Douglas A. Fraser, Sarah L. Hatridge, Curt A. Monaco, Raymond J. Ring, Charles R. Sullivan, Philip C. Taber "Hybridization of a Formula Race Car" IEEE, 2005
- [27]. <http://www.newkellycontroller.com/>
- [28]. [www.autobloggreen.com](http://www.autobloggreen.com)
- [29]. [www.ecogeek.com](http://www.ecogeek.com)