



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia

Utilização de uma *flywheel* como sistema de armazenamento de energia para veículos elétricos/híbridos

António José Caldeira Madeiras

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António João Marques Cardoso
Co-orientador: Doutor Jorge Oliveira Estima

Covilhã, Outubro de 2015

Agradecimentos

Uma dissertação de mestrado é um trabalho de enriquecimento não só académico e científico, mas principalmente pessoal, decorrente do extenso percurso académico. Sendo assim, não poderia deixar de agradecer a todas as pessoas que durante o percurso académico e principalmente durante a elaboração desta dissertação de mestrado me apoiaram e nunca deixaram que as dificuldades me desviassem do meu objetivo.

Deste modo, gostaria de começar por expressar o meu agradecimento à Universidade da Beira Interior, pela criação de todas as condições de aprendizagem contínua ao longo do meu percurso universitário. Em particular ao diretor de curso, Professor Doutor José Carlos Páscoa Marques, e todos os docentes que de alguma forma se cruzaram no meu percurso académico, em particular os docentes do Departamento de Engenharia Eletromecânica e áreas auxiliares, assim como a todos os funcionários dos laboratórios pelos quais passei. Também gostaria de agradecer às pessoas afetas ao Laboratório de Sistemas Eletromecatrónicos e ao CISE-Centro de Investigação de Sistemas Eletromecatrónicos pelos meios, condições e disponibilidade com que me receberam.

Paralelamente, pela importância que determinadas pessoas tiveram durante esta etapa final, gostaria de salientar algumas pelo maior contributo que tiveram na realização deste trabalho.

Os meus sinceros agradecimentos ao Professor Doutor António João Marques Cardoso pela oportunidade de realizar este trabalho tão decisivo para a minha formação. A ele gostaria de agradecer também o seu empenho e todo o apoio prestado durante a realização deste trabalho.

Ao Doutor Jorge Oliveira Estima expresso uma palavra especial de apreço, pela disponibilidade e prontidão na resolução de qualquer assunto ou dúvida que surgisse, assim como toda a orientação, críticas construtivas e apoio ao longo do trabalho.

Queria ainda manifestar a minha gratidão especial para com os meus pais, João António Madeiras e Maria Inês de Jesus Caldeira Madeiras, por todo o apoio e sacrifícios que tiveram, um contributo especial para a pessoa que sou hoje. Aos meus irmãos e ao resto da minha família por todo o apoio demonstrado durante este percurso.

Um agradecimento especial a ti Cátia Costa por seres o meu pilar nos melhores momentos, mas essencialmente nos meus piores. Agradeço-te toda a paciência e ajuda ao longo de toda esta caminhada que fizeste ao meu lado.

A todos os meus amigos e colegas um especial obrigado por todas as palavras de incentivo durante este período.

António José Caldeira Madeiras

Resumo

Recentemente o desenvolvimento de veículos elétricos tem tido um destaque especial, não só devido às preocupações ambientais mas também em termos de gestão de energia, podendo estes funcionar como reguladores de energia na rede, nas horas de vazio. Para que seja possível um aumento na utilização de veículos elétricos é sem dúvida imprescindível autonomies próximas dos veículos com motores de combustão interna.

Perante isto, o presente estudo baseia-se nessa necessidade, assim como também no aumento da vida útil dos constituintes do veículo, mais concretamente do sistema de armazenamento de energia, e numa recuperação energética eficiente.

Neste contexto, o presente trabalho tem como intuito o estudo de um sistema de armazenamento auxiliar, constituído por uma *flywheel*. Sistemas deste tipo têm vindo a ser utilizados nos veículos híbridos utilizados em Fórmula 1 assim como noutras aplicações de tração elétrica.

O trabalho baseia-se na modelação de um sistema completo que descreva o funcionamento global de um veículo elétrico com um sistema de armazenamento e recuperação de energia auxiliar, a *flywheel*. Assim, numa fase inicial, são apresentadas as motivações para este estudo, seguidas do estado da arte sobre esta matéria, abordando os veículos elétricos/híbridos, as máquinas elétricas e suas aplicações e vantagens, e ainda os sistemas de armazenamento de energia usualmente utilizados. Posteriormente, apresenta-se mais detalhadamente o sistema auxiliar proposto, descrevendo a sua história, as suas características, vantagens e desvantagens, as aplicações onde é utilizado e o seu modelo matemático. Para o estudo completo descreve-se a modelação teórica de um veículo, tendo em conta as suas características físicas e as forças nele exercidas, criando-se um modelo matemático que descreva o seu funcionamento. Por último, descreve-se o modelo proposto assim como a sua implementação em MATLAB/Simulink, procedendo-se à sua simulação para que possam ser retiradas as devidas conclusões sobre a utilização do sistema.

Palavras-chave

Flywheel, Veículos elétricos/híbridos, sistemas de armazenamento de energia, energia cinética, recuperação de energia.

Abstract

Recently, the development of electric vehicles has been highlighted, not only due to environmental concerns but also due to efficient energy management, and the possibility to use them as power regulators in the network off-peak. For an increased use of electric vehicles it is undoubtedly essential autonomies nearby the ones of vehicles with internal combustion engines.

Therefore, the present study is based on this need, as well as on the increased useful life of the components of the vehicle, more specifically, energy storage system, and to ensure efficient energy recovery.

The main objective of the present work is the study of an auxiliary storage system, consisting of a flywheel. Such systems are being used in hybrid vehicles used in Formula 1.

The work is based on the modeling of a complete system that describes the overall operation of an electric vehicle with a storage system and auxiliary power recovery, the flywheel. This dissertation, presents the motivations for this study followed by the current state of the art on the components of the proposed system, addressing electric/hybrid vehicles, electric machines and its applications and advantages, and even energy storage systems usually used. Later it presents in more detail the auxiliary system proposed, describing its history, its characteristics, advantages and disadvantages, applications where it is used and its mathematical model. For the full study, it also describes the theoretical modeling of a vehicle, taking into account its physical characteristics and the forces exerted on it, by creating a mathematical model that describes its operation. Finally, it describes the proposed model as well as its implementation in MATLAB/Simulink, proceeding to its simulation so that the appropriate conclusions about the use of the system can be drawn.

Keywords

Flywheel storage, electric/hybrid vehicles, energy storage systems, kinetic energy, energy recovery.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Veículos elétricos e híbridos.....	1
1.1.1 Veículos elétricos.....	2
1.1.2 Veículos híbridos.....	4
1.2 Máquinas elétricas.....	6
1.2.1 Motor de Indução	7
1.2.2 Motor de Ímanes Permanentes	8
1.2.3 Motor de Relutância.....	11
1.2.4 Comparação dos diferentes tipos de motor.....	12
1.3 Armazenamento de Energia	12
1.3.1 Baterias.....	13
1.3.2 Supercondensadores	15
1.3.3 Células de Combustível.....	16
1.3.4 <i>Flywheel</i>	18
1.4 Hibridização de Sistemas de Armazenamento de Energia.....	20
Capítulo 2 - <i>Flywheel</i>	23
2.1 Introdução	23
2.2 Tecnologias de <i>Flywheel</i>	26
2.3 Aplicação em Veículos	26
2.4 Modelo Matemático da <i>Flywheel</i>	28
Capítulo 3 - Modelação da Dinâmica de um Veículo.....	31
3.1 Modelação de um Veículo	31
3.1.1 Força de Atrito de Rolamento.....	31
3.1.2 Força de Resistência do Ar.....	32
3.1.3 Força de Subida.....	32
3.1.4 Força de Aceleração	33
3.1.5 Força Total de Tração	33
3.1.6 Binário	33
3.1.7 Potência do Veículo	34
3.1.8 Energia Consumida	34
3.1.9 Rotação nominal e Rotação Máxima do Motor.....	34
Capítulo 4- Descrição do Sistema	37
4.1 Fonte de alimentação de corrente contínua	37
4.2 Motor de Tração	38
4.3 Inversor Trifásico DC-AC.....	38
4.4 Motor Síncrono de Ímanes Permanentes.....	39
4.5 Sensor de velocidade	39
4.6 Sistema de controlo	40
4.6.1 Controlador de velocidade.....	40
4.6.2 Controlo por orientação do campo rotórico (RFOC).....	41
4.6.3 Controladores de corrente	41
4.7 <i>Flywheel</i>	41
Capítulo 5 - Simulação Computacional do Sistema	43
5.1 Descrição do Modelo	43
5.1.1 Bloco da Dinâmica do Veículo	43
5.1.1.1 Bloco de Conversões	44
5.1.1.2 Forças exercidas no veículo	44
5.1.1.3 Binário do Motor	46
5.1.1.4 Rotação do motor em rotações por minuto.....	46

5.1.2	Bloco do funcionamento e controlo do motor de tração	46
5.1.2.1	Motor Síncrono de Ímanes Permanentes e respetivo controlo	47
5.1.3	Bloco do funcionamento e controlo da <i>Flywheel</i>	48
5.1.3.1	Controlo de sinal da <i>flywheel</i>	48
5.2	Resultados da Simulação	49
5.2.1	Controlo de velocidade do motor de tração	51
5.2.2	Binário do motor.....	52
5.2.3	Binário aplicado à <i>flywheel</i>	52
5.2.4	Velocidade da <i>flywheel</i>	53
5.2.5	Tensão na bateria	54
5.2.6	Corrente fornecida pela bateria	55
5.2.7	Estado da carga na bateria (SOC)	56
Capítulo 6 - Validação experimental		59
6.1	Implementação experimental	59
6.2	Principais estudos envolvendo <i>Flywheels</i>	60
6.2.1	Estudo 1	60
6.2.1.1	Validação Experimental	61
6.2.1.2	Resultados e principais conclusões.....	61
6.2.2	Estudo 2.....	62
6.2.2.1	Validação experimental	62
6.2.2.2	Resultados e Principais conclusões.....	63
Capítulo 7- Conclusões		65
7.1	Principais conclusões	65
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	66
Referências.....		67
Anexos		71
9.1	Anexo A	71
9.1.1	Imagens de alguns elementos implementados em <i>Matlab</i>	71
9.1.2	Parâmetros para simulação referentes ao motor de tração	72
9.1.3	Parâmetros introduzidos para simulação referentes à <i>Flywheel</i>	74
9.1.4	Equações para os cálculos das velocidades e tempos do percurso	75
9.2	Anexo B.....	77
9.2.1	Resultados de alguns estudos desenvolvidos	77

Lista de Figuras

Figura 1- Topologia do veículo elétrico.	3
Figura 2- Configurações possíveis de veículos elétricos (VE)	4
Figura 3-Configuração Série.....	5
Figura 4- Configuração Paralelo.	5
Figura 5- Curvas Características da Performance dos Motores Elétricos.	6
Figura 6- Curvas Características do Motor de Indução.	7
Figura 7- Curvas do Fluxo Magnético do BLDC e do PMSM.	9
Figura 8- Curva Característica do Motor Síncrono de Ímanes Permanentes.	9
Figura 9- Imagem de um Motor Síncrono de Ímanes Permanentes.	10
Figura 10- Característica Velocidade-Binário do SRM.	11
Figura 11- Esquema da Célula da Bateria.....	13
Figura 12- Estrutura de uma Célula do Supercondensador.	16
Figura 13- Estrutura e funcionamento de uma Célula de Combustível.....	17
Figura 14- Célula de Combustível e todos os dispositivos auxiliares.....	18
Figura 15- Estrutura dos dois sistemas típicos de <i>Flywheel</i>	20
Figura 16- Conceito de Funcionamento do sistema Híbrido de Armazenamento de Energia ...	21
Figura 17- Réplica da <i>Flywheel</i> idealizada por Leonardo Da Vinci	23
Figura 18- Exemplo de uma antiga aplicação de uma <i>Flywheel</i> na Indústria Oleira.	24
Figura 19 - Estrutura de uma <i>Flywheel</i>	25
Figura 20-Densidade de Potência dos tipos de armazenamento	27
Figura 21 - Explicação da força de resistência do ar.	32
Figura 22- Representação da força gravítica devido à inclinação.....	33
Figura 23 - Descrição geral do sistema.....	37
Figura 24 - Bateria de um veículo elétrico (BMW i3 e i8).....	37
Figura 25 - Esquema dos constituintes do motor de tração.	38
Figura 26 - Esquema de um inversor trifásico com IGBT's.	38
Figura 27 - Imagem do motor do <i>Toyota Prius</i> com motor síncrono de ímanes permanentes..	39
Figura 28 - Representação esquemática do sistema de controlo.....	40
Figura 29 - Esquema do controlador PI.	41
Figura 30- Implementação em ambiente Matlab do sistema.	43
Figura 31- Constituintes do bloco referente à dinâmica do veículo.	44
Figura 32- Conversões efetuadas para posterior utilização nos cálculos.	44
Figura 33- Constituição do bloco referente aos cálculos das forças exercidas no veículo.	45
Figura 34- Cálculo do Binário do motor.	46
Figura 35- Bloco com o cálculo da rotação do motor em rpm.	46
Figura 36- Modelo do MSIP e seu controlo.	47
Figura 37- Acionamento do Motor de tração.....	47
Figura 38- Modelo representativo da <i>Flywheel</i> com o respetivo controlador do sinal da velocidade de referência.	48
Figura 39- Controlo do sinal da <i>flywheel</i>	49
Figura 40- Perfil de Velocidades.	50
Figura 41- Inclinação do percurso.....	51
Figura 42- Velocidade imposta pelo controlador ao motor e velocidade de rotação medida. .	51
Figura 43- Binário de referência do motor de tração e binário eletromagnético medido.	52
Figura 44 - Binário de referência aplicado à <i>flywheel</i> e binário eletromagnético medido.	53
Figura 45 - Velocidade medida na <i>flywheel</i> ao longo da simulação.	54
Figura 46 - Tensão na bateria ao longo da simulação.	54
Figura 47- Corrente fornecida pela bateria com e sem o sistema de <i>flywheel</i> no modelo.	56
Figura 48 - Estado de carga da bateria com e sem o sistema de <i>flywheel</i> no modelo.	57
Figura 49- Implementação experimental pretendida.....	59
Figura 50- <i>Flywheel</i> proposta para este estudo.	61
Figura 51- Montagem experimental implementada.....	61
Figura 52- Bancada experimental criada neste estudo.....	62
Figura 53- Montagem experimental do sistema de <i>flywheel</i>	63
Figura 54- Gráficos da velocidade da <i>flywheel</i> e das correntes.....	64
Figura A 1 - Representação da velocidade da roda em rpm no <i>Matlab</i>	71

Figura A 2 - Implementação em Matlab da velocidade do motor em rpm.	71
Figura A 3 - Controlador de velocidade do modelo existente no <i>Matlab</i>	71
Figura A 4 - Bloco com o controlo vetorial da corrente do modelo já existente no Matlab. ...	72
Figura A 5 - Parâmetros do motor de tração introduzidos para simulação.	72
Figura A 6- Parâmetros do inversor de tensão.	73
Figura A 7- Parâmetros do controlador do motor de tração.	73
Figura A 8- Parâmetros introduzidos para simulação da <i>flywheel</i>	74
Figura A 9- Parâmetros do conversor para a simulação da <i>flywheel</i>	74
Figura A 10- parâmetros introduzidos para o controlador da <i>flywheel</i>	75
Figura B 1- Resultados experimentais do estudo se um sistema de flyweel.	77
Figura B 2- Resultado experimental do sistema com a regeneração de energia total na travagem para a bateria.	78
Figura B 3- Resultado experimental do sistema com a regeneração de energia total na travagem para a <i>flywheel</i>	78

Lista de Tabelas

Tabela 1- Características das Maquinas Elétricas, Vantagens e Desvantagens	12
Tabela 2- Parâmetros Importantes de uma bateria	14
Tabela 3- Parâmetros escolhidos para os cálculos durante a simulação.	45
Tabela 4- Percurso escolhido (distância, velocidades, tempo e inclinação do percurso).....	50
Tabela 5 - Características do motor <i>brushless</i> e do controlador (ESC).....	60

Lista de Acrónimos

VE	Veículos Eléctricos
CaC	Células de Combustível
FOC	<i>Field Oriented Control</i> - Controlo Vetorial por Orientação de Campo
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
MSIP	Motor Síncrono de Ímanes Permanentes
PMSM	<i>Permanent Magnets Synchronous Motor</i> - Motor Síncrono de Ímanes Permanentes
BLDC	<i>Brushless DC Electric Motor</i>
SRM	<i>Switched Reluctance Motor</i> - Motor de Relutância
rpm	Rotações por Minuto
SOC	<i>State of Charge</i> - Estado de Carga
NASA	<i>National Aeronautics Space Administration</i>
H ₂ O	Fórmula Química da Água
rpm	Rotações por Minuto
CVT	<i>Continuously Variable Transmission</i> - Transmissão Continuamente Variável
HTS	<i>High Temperature Superconductivity</i> - Supercondutores de Elevadas Temperaturas
KERS	<i>Kinetic Energy Recovery System</i>
RFOC	<i>Rotor Field Oriented Control</i> - Controlo Vetorial por Orientação do Campo Rotórico
FESSC	<i>Flywheel energy storage system control</i> - Sistema de Controlo da <i>Flywheel</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
PI	<i>Proportional-Integral</i> - Proporcional/Integral
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação por Largura de Impulso
ESC	<i>Electronic Speed Control</i> - Controlador Eletrónico de Velocidade

Capítulo 1 - Introdução

Com leis cada vez mais exigentes, no que diz respeito ao consumo responsável de combustíveis fósseis e o apertado controlo das emissões de gases de escape dos veículos. Isto devido à escassez de recursos energéticos fósseis e às preocupações ambientais provenientes destas emissões, os veículos elétricos têm vindo a ser vistos como uma solução sustentável para o futuro, por parte dos governantes, fabricantes de automóveis e consumidores.

Com as estatísticas de crescimento populacional mundial a apontar para cerca de 10 biliões de habitantes no planeta em 2050, em vez dos atuais 7 biliões, sendo que foram atingidos os valores de 1 bilião de automóveis em 2010 e com a estimativa de chegada aos 2 biliões em 2036 e aos 3 biliões em 2050, as emissões de gases para a atmosfera tornam-se bastante preocupantes[1].

Se todos estes veículos forem movidos a motores de combustão, para além das elevadas emissões de gases poluentes para atmosfera, também os recursos de combustíveis fósseis serão insuficientes para as necessidades mundiais. Tendo em conta estas questões, o desenvolvimento de veículos elétricos ganha novos contornos e a sua evolução tem vindo a ser acelerada para satisfazer as necessidades, nomeadamente a redução do preço do veículo e aumento da autonomia.

A característica que acresce valor aos veículos elétricos é sem dúvida o armazenamento de energia utilizado para alimentar os motores elétricos, de modo a atingir as autonomias pretendidas. A autonomia apresentada pelos veículos de combustão assemelha-se à comportada pelos veículos híbridos. No entanto estes evidenciam reduções significativas na emissão de gases e no consumo de combustível fóssil. Porém, apresentam gastos relevantes em termos de armazenamento de energia elétrica, para o acionamento dos motores elétricos, sendo assim essencial encontrar formas alternativas à típica bateria de chumbo ou de lítio.

Tendo em conta a temática proposta, torna-se importante executar uma breve análise ao estado de arte relativamente aos veículos elétricos e os seus constituintes de armazenamento de energia e de tração.

1.1 Veículos elétricos e híbridos

Os veículos elétricos são uma invenção com mais de 150 anos, tendo o seu auge sido atingido no século XIX, sendo estes constituídos por um motor elétrico que é alimentado através de um dispositivo de armazenamento de energia elétrica.

Esta forma de motorização é a mais eficiente de todas as conhecidas até à data, devido às excelentes propriedades do motor elétrico que disponibiliza um elevado binário a baixas

rotações e mantém uma potência constante num grande intervalo de tempo. Para além disso, não consome energia quando parado e pode alcançar um rendimento de transferência de energia elétrica para mecânica superior a 90%, uma vez que pouca energia se perde em aquecimento do motor, contrariamente ao que acontece com o motor a combustão interna [2]. Por outro lado, os veículos elétricos híbridos são ainda sinónimo de veículos que oferecem uma maior economia de combustível e baixas emissões de poluentes.

Os veículos elétricos recarregam as baterias através da ligação à rede elétrica, e são aptos para regenerar energia através das travagens, ou seja, têm a capacidade de recuperar energia nas descidas e travagens, onde parte desta seria desperdiçada se ocorresse num veículo normal, por aquecimento e fricção. Os veículos híbridos e elétricos fazem um uso muito eficiente da energia disponível uma vez que o motor elétrico pode operar como motor de tração e gerador na travagem regenerativa [2].

Hoje em dia os veículos elétricos são caracterizados pela sua tecnologia limpa, uma vez que não emitem gases para a atmosfera, embora alguns defendam que não é uma tecnologia 100% limpa pois a produção de energia elétrica deriva de sistemas de produção que podem ou não ser sistemas poluentes.

O veículo híbrido elétrico e elétrico puro poderiam ser utilizados na gestão dos recursos de energia renovável, visto que os veículos particulares andam em média 20.000 km em ciclo urbano, passando em média 90% do tempo parados [3]. Este tempo de paragem ocorre principalmente durante as horas de baixo consumo de eletricidade, permitindo gerir a produção de energia proveniente de fontes renováveis nas horas de vazio. Esta gestão comporta vantagens para a rede de distribuição e para o proprietário, que pagará menos pela energia nestes períodos [4].

1.1.1 Veículos elétricos

Nos veículos elétricos, a energia mecânica é fornecida através de um motor elétrico, usando a energia fornecida por um ou vários sistemas de armazenamento de energia elétrica tais como um conjunto de baterias, células de combustível, supercondensadores e/ou flywheels [5].

Os veículos elétricos são silenciosos, possuem um arranque suave e poucas vibrações associadas ao funcionamento do motor, não emitem diretamente poluentes, restando a poluição associada apenas ao sistema de produção elétrica que pode ser de origem renovável e tornar-se 100% limpa. São conhecidos como sendo uma tecnologia limpa [2][6][7], onde a potência transferida para as rodas é fornecida exclusivamente pelo motor elétrico, como se observa na Figura 1.

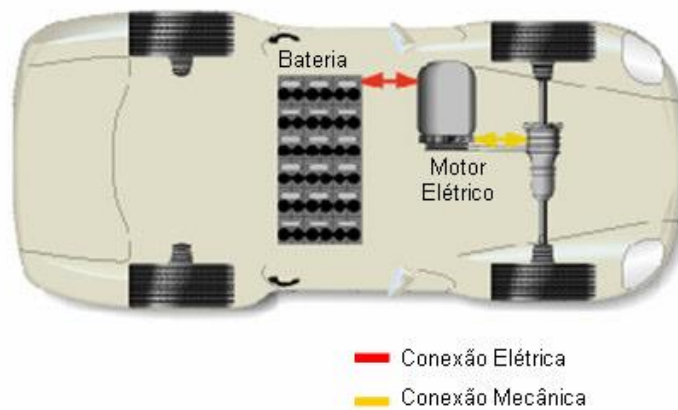


Figura 1- Topologia do veículo elétrico.

O acionamento elétrico é composto por 3 subsistemas principais: o subsistema de propulsão, a fonte de energia e o sistema auxiliar. O subsistema de propulsão elétrica é composto pelo controlador do veículo, conversor eletrônico de potência, motor elétrico, transmissão mecânica e rodas motrizes. O subsistema de fonte de energia envolve o sistema de armazenamento adotado, a unidade de gestão de energia e a unidade de abastecimento de energia com todos os conversores e retificadores associados. Por último, o subsistema auxiliar é composto pela unidade de direção assistida, ar condicionado, unidade de controle e a unidade de alimentação auxiliar, assim como alguns extras que possam ser adicionados ao veículo [5].

O motor utiliza a energia elétrica armazenada nas baterias, convertendo-a em energia mecânica transferida para as rodas. Nos veículos elétricos não é necessário o uso de transmissões convencionais, nem de sistemas de exaustão (escape e catalisador); no entanto apresenta determinadas limitações [2]:

- Autonomia limitada e elevado tempo de recarga;
- As baterias são pesadas e requerem grandes espaços no veículo, tendo um ciclo de vida relativamente curto;
- As baterias convencionais depois de inutilizadas são altamente poluentes.

O veículo elétrico apresenta diversas configurações possíveis para a disposição dos constituintes de tração; estas configurações são apresentadas na Figura 2.

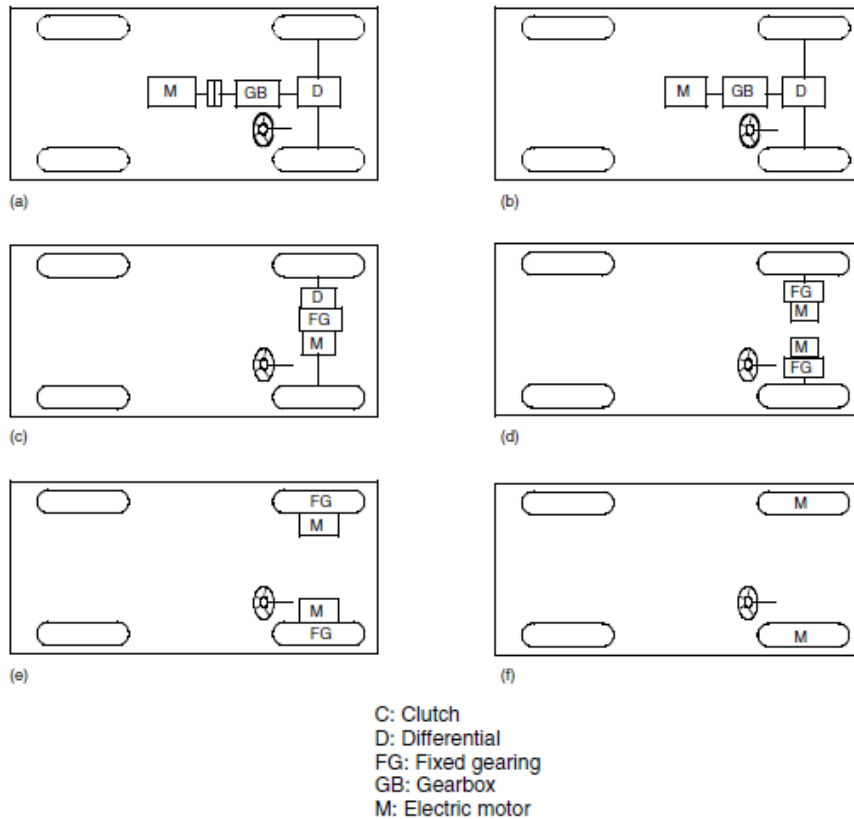


Figura 2- Configurações possíveis de veículos elétricos (VE) [5].

1.1.2 Veículos híbridos

O termo “híbrido” deriva da combinação de duas ou mais fontes de potência, sendo que a combinação mais comum é feita através de um motor de combustão interna, usado em veículos convencionais, com um conjunto de baterias e um motor elétrico usado nos veículos elétricos puros [8]. Esta combinação possibilita aos veículos elétricos híbridos uma grande autonomia e rápido abastecimento tal como nos veículos convencionais, assim como reduzido ruído, binários elevados, aceleração suave e todos os benefícios ambientais característicos dos veículos elétricos [2].

Existem 2 tipos básicos de veículos híbridos elétricos:

1. Configuração em Série (Figura 3) onde o motor de combustão interna move um gerador para produzir energia elétrica. Este pode carregar as baterias ou alimentar um motor elétrico que aciona as rodas. As locomotivas diesel-elétricas seguem este modelo [2][8] onde a ideia principal é que o motor a combustão interna trabalhe no seu ponto “ótimo” de operação, onde tem maior eficiência e menor emissão de gases poluentes [9].

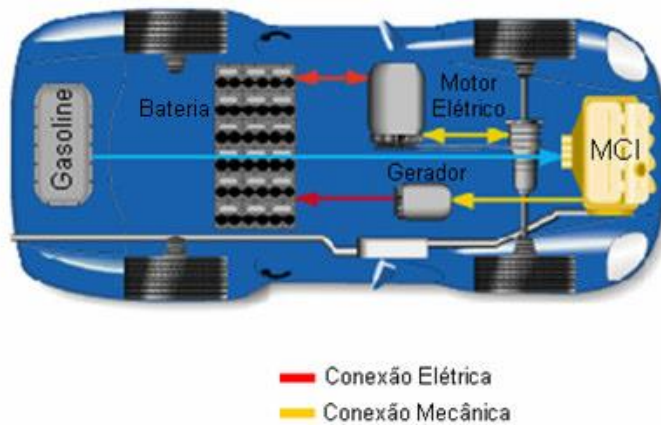


Figura 3-Configuração Série.

2. Configuração em Paralelo (Figura 4) onde o motor a combustão é conectado à transmissão, assim como o motor elétrico. Logo, ambos podem fornecer tração às rodas, dependendo da necessidade do trajeto, comutando alternadamente ou simultaneamente, dependendo da estratégia de gestão de energia escolhida no projeto [10][11].

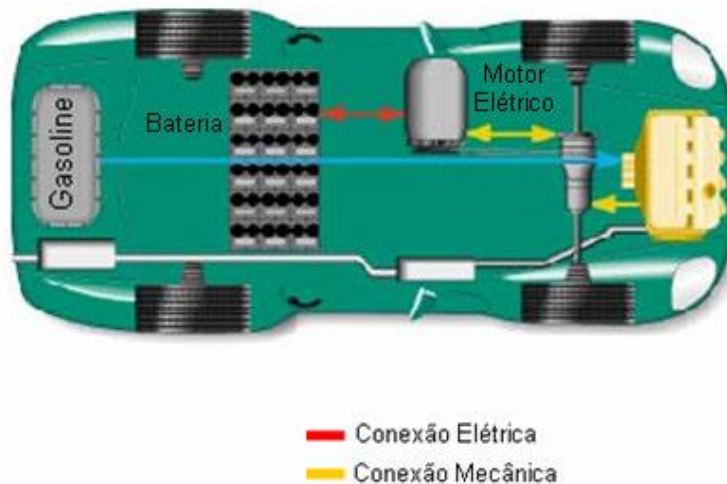


Figura 4- Configuração Paralelo.

Existe ainda outra configuração de veículos híbridos, os veículos elétricos híbridos com células de combustível (CaC), onde a potência elétrica é gerada a partir de um conjunto de células de combustível (ex: Hidrogénio, Etanol) [12], carregando as baterias e alimentando o motor elétrico que fornece potência mecânica às rodas.

As principais vantagens dos veículos híbridos elétricos são a sua economia de 30 a 50% no consumo de combustível e conseqüentemente a redução da emissão de gases poluentes para a atmosfera e ainda a flexibilidade de usar combustíveis à base de petróleo ou meios

alternativos para aumentar a autonomia do veículo para longas distâncias. Estas características devem-se ao elevado rendimento proporcionado pelo motor elétrico.

1.2 Máquinas elétricas

As máquinas elétricas surgiram por volta da década de 1830. Contudo, a sua evolução tem sido longa e vagarosa. Tradicionalmente os motores de corrente contínua sempre foram proeminentes na propulsão elétrica visto que possuem características de binário-velocidade que se adequam bem aos requisitos necessários e o controlo da velocidade é bastante simples. Porém, devido ao emprego de comutadores e escovas neste tipo de máquinas, os custos associados à sua manutenção são elevados, diminuindo igualmente os níveis de fiabilidade [13]. Para além disto, este tipo de máquinas apresenta uma baixa densidade de potência, característica esta desejável para este tipo de aplicação.

Deste modo os motores sem comutadores têm-se tornado atrativos por proporcionarem menores custos de manutenção e maior fiabilidade, sendo estes requisitos primordiais para a propulsão dos veículos elétricos. Estas alternativas passam pelos motores de indução, pelos motores síncronos de ímanes permanentes e pelos motores de relutância comutado [13].

A máquina elétrica é o principal elemento de um veículo elétrico. De um modo geral, as máquinas elétricas são caracterizadas pelo seu desempenho, elevado rendimento e binário elevado a baixa velocidade, como se pode observar na Figura 5. Quando utilizados no âmbito da tração de veículos elétricos, as máquinas elétricas não só funcionam como motor do veículo, como também são utilizadas como gerador em caso de desacelerações, aproveitando a energia das travagens ou descidas [14].

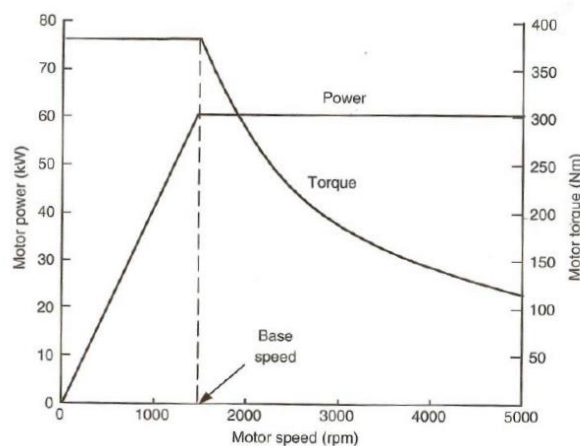


Figura 5- Curvas Características da Performance dos Motores Elétricos [5].

Os motores elétricos devem obedecer a certos parâmetros mínimos para poderem ser uma boa escolha no âmbito da tração elétrica. A escolha do motor a ser utilizado num sistema de tração elétrica inclui entre outros parâmetros, o modo de propulsão, se o motor é colocado

nas rodas da frente, nas de trás, nas quatro rodas ou contém um motor único de tração, o número de motores a utilizar, se a tração é direta ou indireta e o número de engrenagens de transmissão [14].

Tipicamente, os requisitos necessários nas máquinas elétricas para aplicações em tração elétrica são a capacidade de fornecer um valor elevado de binário mesmo a baixas rotações, o funcionamento a elevadas velocidades de rotação, a alta densidade de potência, a boa resposta e compatibilidade eletromagnética [15]. Além disso, deve ter uma elevada eficiência nas travagens regenerativas, alta fiabilidade e robustez para várias condições de operação do veículo, tendo acima de tudo um custo razoável para as aplicações desejadas.

Para além da evolução tecnológica que envolve a propulsão de veículos elétricos, é também imprescindível obter melhores métodos de controlo e ainda elevados níveis de sustentabilidade e eficiência energética [16].

Os motores elétricos têm uma condição de funcionamento ótima, mas o seu rendimento decai para pontos de funcionamento fora da região considerada ideal. O desempenho do motor para diferentes velocidades e potências é definido pelo projeto, embora cada tipo de motor tenha a sua relação de velocidade-binário característica [17].

1.2.1 Motor de Indução

As máquinas de indução são o tipo de máquina elétrica mais usada a nível mundial, tanto em aplicações industriais como domésticas. Isto deve-se à sua simples construção, alta densidade de potência, fiabilidade, robustez, baixa necessidade de manutenção, baixo custo e capacidade em operar em ambientes hostis. A sua tecnologia está totalmente maturada e é aplicada em diversas vertentes devido às suas características já demonstradas [18].

Na Figura 6 observam-se as curvas características do motor de indução.

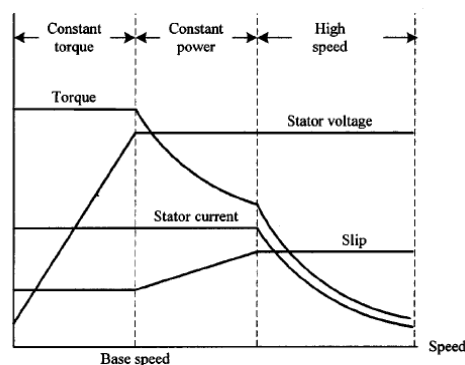


Figura 6- Curvas Características do Motor de Indução [18].

Este motor pode ser controlado facilmente recorrendo a métodos de controlo escalares ou vetoriais. O método de controlo vetorial é mais robusto e fiável para aplicações de binário e

velocidade variável. Este sistema, mais concretamente o controlo por orientação de campo (FOC), permite controlar independentemente o binário e o campo magnético, o que proporciona características semelhantes ao motor DC de excitação externa [14].

A utilização de técnicas de enfraquecimento de campo, faculta uma extensão da gama de velocidade de operação deste tipo de motor, podendo no entanto comprometer o rendimento e o binário produzido. A existência de uma quebra significativa de binário e rendimento do motor nas zonas de potência constante, bem como o aumento das perdas em velocidades elevadas, faz deste tipo de motor um candidato mais fraco nas aplicações em tração elétrica.

As perdas dominantes nas máquinas de indução devem-se aos constituintes em cobre; uma das maiores desvantagens é o calor gerado pelo rotor como resultado das perdas, sendo necessário maiores requisitos de arrefecimento e/ou restrição da capacidade de sobrecarga [19].

1.2.2 Motor de Ímanes Permanentes

Os motores de ímanes permanentes são particularmente conhecidos pela sua elevada eficiência, devido ao elevado fator de potência e ausência de perdas no rotor, visto que utiliza os ímanes permanentes para eliminar as escovas e anéis coletores, estes motores possuem uma elevada densidade de potência e baixos requisitos de manutenção.

Estes motores podem ser classificados em 2 tipos:

- Motor síncrono de Ímanes Permanentes (MSIP); sendo projetado para que a força contraelectromotriz e a corrente de alimentação sejam sinusoidais [20][21].
- Motor de Corrente Contínua Sem Escovas (BLDC); projetado para desenvolver uma força contraelectromotriz trapezoidal e com uma forma de onda idealmente retangular [20][21].

A maior desvantagem dos motores de ímanes permanentes é o elevado custo do material magnético de elevada densidade energética [22][23]. O custo deste tipo de material tem vindo a aumentar bastante devido à elevada procura.

Na figura 7 observam-se as curvas do fluxo magnético nos dois tipos de motores de ímanes permanentes.

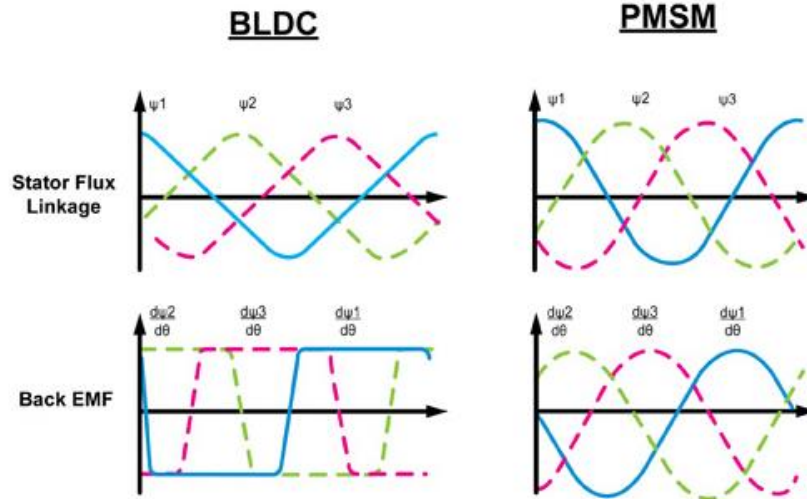


Figura 7- Curvas do Fluxo Magnético do BLDC e do PMSM [24].

A segurança é uma questão crítica, porque o campo gerado pelo material magnético pode causar graves consequências durante uma falha por curto-circuito. As máquinas BLDC têm baixa capacidade de enfraquecimento de campo, quando o material magnético é montado na superfície do rotor. Quando utilizado como motor elétrico, este sistema pode necessitar de uma caixa redutora na transmissão [23].

Quando o material é montado no interior do rotor, MSIP, é incrementado, ao motor, um binário de relutância adicionado ao binário eletromagnético, resultando numa maior gama de operação.

Esta característica pode ser observada na curva de binário/velocidade do motor, Figura 8.

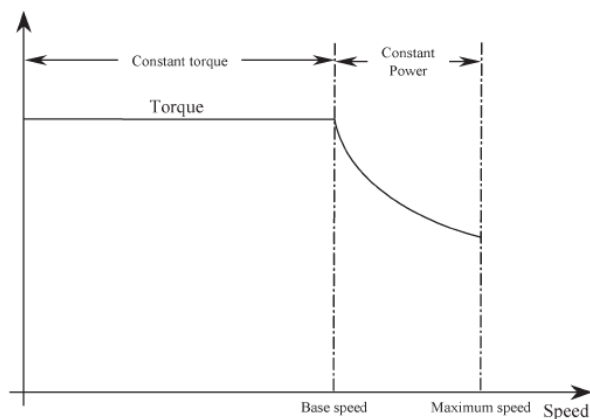


Figura 8- Curva Característica do Motor Síncrono de Ímanes Permanentes [25].

A principal vantagem da variante com ímanes permanentes, relativamente à de excitação convencional, são o seu elevado rendimento, a reduzida manutenção, uma maior autonomia em termos de vida útil, o baixo ruído, o baixo peso e construção compacta, requisitos estes que são fundamentais no sector dos veículos elétricos [24].

Na Figura 9 pode visualizar-se a imagem de um motor síncrono de ímanes permanentes.



Figura 9- Imagem de um Motor Síncrono de Ímanes Permanentes [26].

Atualmente o MSIP é usado em muitos campos de aplicação, nomeadamente máquinas de lavar, acionamentos industriais, veículos de tração elétrica, aparelhos de ar condicionado, robôs, refrigeradores, compressores e ventoinhas. Esta diversidade de aplicações deve-se à ampla gama de potências, que podem variar desde mili-watts até centenas de quilowatts. Atualmente, com o surgimento de novos materiais magnéticos, já é possível a construção de máquinas de ímanes permanentes com potências superiores a 1 MW [25][26].

Em termos de tração elétrica os MSIPs podem ser encontrados em veículos com motores de tração elétrica de acionamento direto. Estes motores têm vindo a ganhar importância, uma vez que quando comparados com os motores de indução, são menos volumosos e mais leves, permitindo desenvolver acionamentos baseados neste tipo de motores em várias aplicações [27].

Os motores síncronos de ímanes permanentes competem diretamente com os motores de indução para aplicações de tração. Na verdade, quase toda a indústria de veículos híbridos ligeiros está a mudar para este tipo de motores de forma a poder dar resposta aos crescentes requisitos de densidade de potência e de rendimento [28].

A principal desvantagem deste tipo de motor prende-se com o elevado custo dos ímanes de terras raras. Outra desvantagem é a necessidade de uma componente adicional de corrente para o enfraquecimento de campo, o que gera mais perdas no estator. Por último a

capacidade de sobrecarga é restringida pelas características dos ímanes. Como tal, altas temperaturas em combinação com correntes elevadas no estator devem ser evitadas de modo a prevenir a desmagnetização irreversível dos ímanes [19].

1.2.3 Motor de Relutância

Os motores de relutância baseiam-se no princípio da relutância magnética. Este princípio pode ser explicado através da criação de uma analogia com os circuitos elétricos. A relutância magnética funciona como resistência à passagem do fluxo magnético. Variando a relutância consegue controlar-se o fluxo magnético e conseqüentemente o binário que é produzido.

As máquinas de relutância magnética podem ser subdivididas, de acordo com as suas características, em:

- Motor de relutância variável comutada;
- Motor síncrono de relutância;
- Motor de passo.

Como já descrito anteriormente, para utilizações em propulsão elétrica, dentro deste tipo de motores, os mais utilizados são os de relutância variável comutada, pois apresentam uma densidade de potência e rendimento comparáveis aos motores de indução. Este tipo de motor tem uma construção simples, é económico e de baixa manutenção [19]. Recentemente os motores de relutância variável comutada têm suscitado uma atenção especial devido à preocupação com o aumento do preço e escassez dos materiais magnéticos, quando iniciada a produção em massa dos veículos elétricos.

A característica velocidade-binário, convencional, de um motor de relutância variável comutada é retratada na Figura 10.

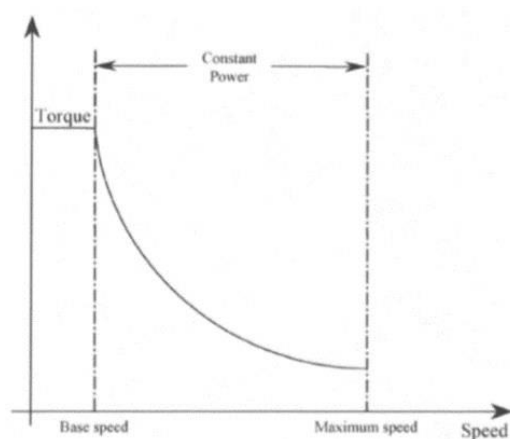


Figura 10- Característica Velocidade-Binário do SRM.

As desvantagens deste tipo de motor incluem o ruído elevado, o *ripple* de binário elevado e o controle bastante complexo. Apesar disto, estes motores são usados em alguns veículos pesados, pois as características de ruído e *ripple* elevados não constituem um grande constrangimento [19][28].

1.2.4 Comparação dos diferentes tipos de motor

As características das máquinas elétricas e as suas vantagens e desvantagens são resumidas na Tabela 1, onde é feita a comparação qualitativa a fim de auxiliar na decisão da escolha do motor para o veículo elétrico [18]. Os valores apresentados na Tabela 1 representam uma escala qualitativa das características das várias máquinas elétricas. Neste , utilizada para definir a tomada de decisão da máquina mais apropriada para utilização em veículos elétricos.

Tabela 1- Características das Maquinas Elétricas, Vantagens e Desvantagens [18].

	Motor CC	Motor de Indução	PMSM	SRM
Densidade de Potência	2.5	3.5	5	3.5
Eficiência	2.5	3.5	5	3.5
Controlabilidade	5	5	4	3
Fiabilidade	3	5	4	5
Maturidade Tecnológica	5	5	4	4
Custo	4	5	3	4
Total	22	27	25	23

O motor de indução, no geral, obtém a melhor classificação, seguido do motor síncrono de ímãs permanentes. No entanto, como o motor síncrono de ímãs permanentes tem uma eficiência e densidade de potência superiores, que são duas características essenciais no que diz respeito a tração elétrica, o motor síncrono de ímãs permanentes foi escolhido para o estudo apresentado neste trabalho [19].

1.3 Armazenamento de Energia

Um dos maiores desafios na mobilidade elétrica é sem dúvida a autonomia dos veículos, como consequência do deficiente armazenamento de energia ou da pouca capacidade dos sistemas de armazenamento até agora utilizados. Nesta área, muitos são os estudos e experiências para tentar obter um compromisso rentável para a substituição dos veículos de combustão interna por veículos elétricos, no que diz respeito à autonomia proporcionada por estes.

Os dispositivos de armazenamento de energia fornecem energia ao exterior durante o processo de descarga e é recuperada/armazenada energia do exterior no carregamento. Existem até ao momento diversos dispositivos de armazenamento como escolha para veículos elétricos e híbridos, entre estes as baterias eletroquímicas, os ultracondensadores ou

supercondensadores e as *flywheels* de alta velocidade. As células de combustível também apresentam algumas aplicações em veículos híbridos [5].

Existem requisitos específicos a ter em conta no armazenamento de energia para utilização em veículos elétricos tais como energia específica e potência específica, a eficiência, a manutenção exigida, os custos, a adequabilidade de utilização e ambiental e ainda a segurança que oferece no sistema. Por outro lado, para aplicação em veículos híbridos, a energia específica torna-se menos importante, sendo considerado como parâmetro principal a potência específica, pois o fornecimento de energia é feito pelo sistema de combustão ou de células de combustível [5].

Sem dúvida que os veículos de combustão interna têm até à data autonomias muito superiores às presentes nos veículos elétricos, embora o rendimento dos motores de combustão seja muito inferior aos dos motores elétricos. Existem diversos sistemas de armazenamento de energia elétrica, motivo pelo qual se abordam em seguida os sistemas mais utilizados na mobilidade elétrica, fazendo uma breve descrição desses sistemas.

1.3.1 Baterias

As baterias são dispositivos que convertem energia elétrica em energia potencial química, quando carregam, e convertem energia química em energia elétrica durante a descarga. A bateria é constituída por várias células empilhadas em conjunto. Uma célula é uma unidade independente e completa que possui propriedades eletroquímicas. De um modo geral uma célula de uma bateria é composta por dois elétrodos (positivo e negativo), imersos num eletrólito [5], como se observa na Figura 11.

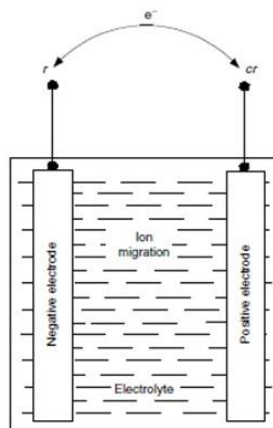


Figura 11- Esquema da Célula da Bateria [5].

As baterias apresentam diversos parâmetros importantes, esquematizados na Tabela 2.

Tabela 2- Parâmetros Importantes de uma bateria [2].

Parâmetro	Explicação
Energia Armazenada	A energia armazenada é calculada pela fórmula: Energia=Tensão*Capacidade (wh)
Energia Específica	A energia armazenada por cada kg de bateria
Densidade Energética	Quantidade de energia elétrica armazenada por cada metro cúbico (wh/m ³)
Potência Específica	Quantidade de potência obtida por cada kg de bateria (w/kg)
Eficiência Energética	É um rácio energético calculado através da energia perdida em carga em relação à energia enviada pela bateria
Rácio de Auto Descarga	A Auto Descarga é o processo de perda de capacidade com o passar do tempo. Este fator varia conforme a temperatura, tipo de bateria, qualidade de fabricação e tempo de utilização.
Temperatura de Operação	Gama de temperaturas em que a bateria presta serviço útil. Este parâmetro varia muito conforme o tipo de bateria.

As baterias são classificadas em termos da sua tensão nominal e capacidade, sendo estas especificadas em Volt e em ampere-hora, respetivamente. A tensão nominal baseia-se no número de células ligadas em série, aumentando a tensão disponível após essa ligação. A capacidade é definida como o número de amperes-hora disponível quando a bateria está a ser descarregada com uma determinada corrente de descarga. Pode ser considerada como uma taxa desde o carregamento máximo (100%) até ao estado de tensão mínima, ou seja, a tensão que define o estado de bateria totalmente descarregada, estando dependente em grande parte da temperatura, taxa de descarga e idade. A capacidade da bateria é calculada pela multiplicação da corrente de descarga, em Ampere, pelo tempo de descarga, em horas [2][29].

Existem diversos tipos de baterias químicas, das quais as mais viáveis são as baterias de chumbo-ácido, as baterias à base de níquel, tais como as de níquel-ferro, níquel-cádmio e níquel-metal, as baterias de hidreto e finalmente as baterias à base de lítio, como as constituídas por um polímero de lítio e as de iões de lítio. As baterias de chumbo-ácido têm sido muito utilizadas devido a vantagens como baixo custo, capacidade de potência elevada, entre outras. No entanto as baterias de cádmio e à base de lítio estão a ganhar grande destaque, sendo atualmente as mais usadas nos veículos elétricos e híbridos [5].

O lítio é um metal mais leve e que apresenta características bastante interessantes a nível eletroquímico, as baterias baseadas neste metal são atualmente as baterias de eleição para os veículos elétricos, Estas apresentam uma densidade de energia elevada, o que permite armazenar uma grande quantidade de energia, têm um peso mais reduzido, quando

comparado com outro tipo de baterias, têm uma elevada potência, elevada densidade e energia específica (3 vezes mais que as de chumbo-ácido), têm reduzida auto descarga e não têm efeito de memória, permitindo-lhes serem carregadas em qualquer estado de carga [5].

1.3.2 Supercondensadores

Devido às frequentes variações de velocidades e de estados de paragem e arranque na condução dos veículos elétricos e híbridos, principalmente em ciclos urbanos, a descarga e o perfil de carga dos sistemas de armazenamento de energia é bastante variado. A potência média requerida a partir do armazenamento de energia é muito mais baixa que a potência de pico, de curta duração, necessária para as acelerações e períodos curtos de maior carga. A razão entre a potência de pico e a potência média pode ser superior a 10:1 [5].

A energia envolvida na aceleração e desaceleração é cerca de dois terços da quantidade total de energia utilizada ao longo de todo o trajeto do veículo em condução urbana. Nos veículos híbridos, a capacidade de potência de pico do sistema de armazenamento, tem maior importância que a capacidade energética, geralmente reduzindo o seu tamanho. Deste modo é necessário que as baterias atuais apresentem um compromisso entre a energia e potência específica e o ciclo de vida. A dificuldade em obter estes valores, simultaneamente, têm levado ao surgimento de sistemas de armazenamento elétrico híbrido, ou seja, a implementação de um armazenamento com energia específica elevada e um armazenamento com elevada potência específica [5].

Por apresentarem elevada potência específica, os supercondensadores têm sido utilizados como fonte de potência específica em veículos elétricos e híbridos. Este sistema apresenta baixa energia específica, na ordem de alguns watts-hora por quilograma. No entanto, a sua potência específica pode chegar aos 3 kW/kg, valor este muito superior a qualquer tipo de baterias convencionais [5].

Os supercondensadores armazenam energia separando fisicamente cargas positivas e negativas, sendo armazenadas em duas placas divididas por um isolante. Como não existem variações químicas sobre os eletrodos, os supercondensadores apresentam ciclos de vida grandes, mas baixa densidade energética. A figura 12 mostra a estrutura de uma célula de um supercondensador [30].

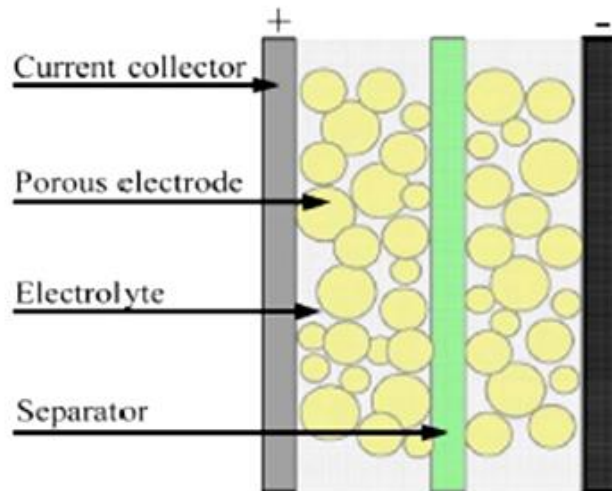


Figura 12- Estrutura de uma Célula do Supercondensador [32].

O potencial aplicado sobre o eletrodo positivo atrai os íons negativos existentes no eletrólito e o potencial no eletrodo negativo atrai os íons positivos. A densidade de potência é consideravelmente mais elevada do que a da bateria, uma vez que as cargas são fisicamente armazenadas nos eletrodos. A baixa resistência interna atribuída aos supercondensadores confere uma alta eficiência na conversão de energia, mas pode resultar numa grande variação de correntes de saída, se o estado da carga for muito reduzido [30].

Outra característica dos supercondensadores é que a tensão aos terminais é diretamente proporcional ao estado de carga (SOC). O desenvolvimento da eletrônica permitiu que os supercondensadores operem numa larga gama de tensão variável. Existem estudos para melhorar a capacidade de armazenamento aumentando a área de superfície dos eletrodos [30].

Os supercondensadores apresentam-se como uma boa solução para recuperação de energia nas travagens regenerativas e para fornecer rapidamente energia durante as acelerações, devido às suas rápidas taxas de carga e descarga. No entanto apresentam custos muito elevados, baixas tensões por célula e uma densidade de energia armazenada muito inferior à das baterias. A tensão durante a descarga também não se mantém constante, o que exige um complexo controlo eletrónico, aumentando deste modo as perdas de energia.

1.3.3 Células de Combustível

As células de combustível foram desenvolvidas há bastante tempo. As primeiras experiências foram efetuadas em 1838, mas a sua viabilização e real desenvolvimento foram promovidos em 1960 pela Agência Espacial Norte-americana. A NASA necessitava de uma forma de fornecer energia às naves espaciais tripuladas. As células a combustível foram a solução

encontrada, pois eram mais seguras que a energia nuclear, mais baratas que a energia solar e mais leves que as baterias [31].

Esta tecnologia é baseada na transformação de energia química em energia elétrica sem a necessidade de nenhum processo térmico ou mecânico. A reação química é a oxirredução eletroquímica. A reação é feita entre o hidrogénio e o oxigénio como combustível, obtendo-se como produto desta reação eletricidade e vapor de água. Este dispositivo funciona como uma fonte de energia gerando energia elétrica se devidamente e continuamente alimentada com combustível, ao contrário das baterias convencionais que armazenam a energia elétrica [32].

Esta tecnologia apresenta várias vantagens tais como elevada eficiência e a não emissão de gases poluentes quando se utiliza hidrogénio puro. A necessidade de diminuir os custos de energia, o aumento da eficiência dos equipamentos, as preocupações ambientais e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis têm incentivado a pesquisa de novas formas de gerar energia [5].

Uma célula de combustível é uma célula galvânica, em que a energia química de um combustível é convertida diretamente em energia elétrica por meio de processos eletroquímicos. Os agentes oxidantes e combustíveis são fornecidos contínua e separadamente para os dois eléctrodos da célula, onde se submetem a uma reação química.

A Figura 13 mostra a estrutura de uma célula de combustível e o seu funcionamento para a produção de energia elétrica.

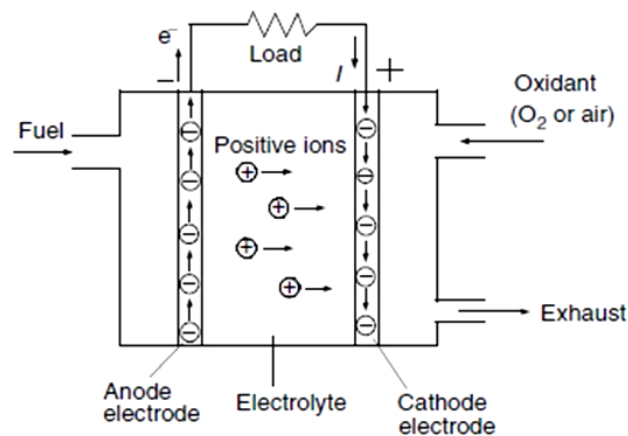


Figura 13- Estrutura e funcionamento de uma Célula de Combustível [5].

É necessário um eletrólito para conduzir os íons de um eléctrodo para o outro. O combustível é fornecido ao ânodo e quando entram em contato, os eletrões são separados dos protões. Os protões passam pelo eletrólito, enquanto os eletrões se dirigem para o cátodo, devido à diferença de potencial entre os eléctrodos, criando uma corrente elétrica. No cátodo a

combinação dos eletrões, prótons e os átomos de oxigénio, produzem os gases de escape, H_2O e calor derivado da reação química [5][32] [33].

O valor de tensão para uma célula isolada é tipicamente 0,5 a 0,9 V. Para utilização em sistemas de geração de energia onde são necessárias potências elevadas, as células são ligadas em série, constituindo as pilhas de combustível que podem fornecer centenas de quilowatts. Esperam-se aplicações na ordem dos megawatts num futuro próximo [32].

Nas aplicações de células de combustível, são necessários dispositivos auxiliares para apoiar o seu funcionamento. Estes dispositivos auxiliares englobam uma bomba de circulação de ar, uma bomba de circulação de refrigerante, uma ventoinha de ventilação, uma bomba de alimentação de combustível e aparelhos de comando elétricos como mostra a Figura 14.

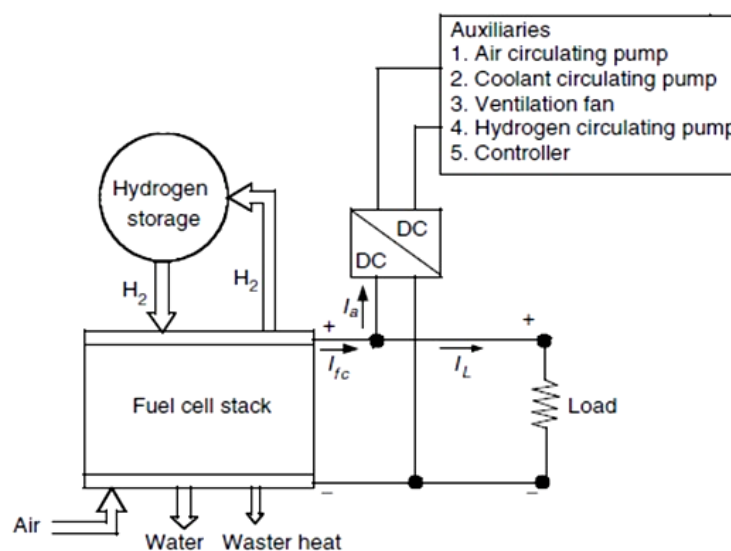


Figura 14- Célula de Combustível e todos os dispositivos auxiliares [5].

Todos estes dispositivos consomem energia, destacando-se o consumo da bomba de circulação de ar, com um valor aproximado de 10% da potência total da pilha de combustível, que adicionando os restantes consumos, perfazem um consumo extra considerável [5].

As células de combustível têm baixa eficiência na demanda de carga, dinâmica lenta de transferência de energia em situações transitórias e um alto custo por watt. Consequentemente, não são usadas isoladamente em veículos elétricos e híbridos para satisfazer as exigências de carga, principalmente durante os arranques transitórios [34].

1.3.4 Flywheel

A *flywheel* é um dispositivo de armazenamento de energia com capacidade de armazenar uma grande quantidade de energia, para aplicações de curta descarga e com capacidade de carregar e descarregar em altas taxas e por inúmeros ciclos.

Este dispositivo apresenta elevada densidade energética, elevada potência específica, elevada eficiência de conversão, tempos curtos de carga e descarga, grandes ciclos de vida e sendo um dispositivo ecológico, torna-se um dispositivo útil para várias aplicações [35].

O princípio de funcionamento destes dispositivos é baseado na rotação de uma massa com um elevado momento de inércia, acumulando energia sob a forma de energia cinética na sua rotação, convertendo esta energia cinética em energia elétrica através de um gerador elétrico, quando é necessária uma alimentação durante um curto período de tempo. A capacidade energética do sistema depende do momento de inércia desta massa e do quadrado da velocidade de rotação [36].

Estes dispositivos são especialmente adequados em sistemas híbridos de armazenamento ou mesmo veículos híbridos. A *flywheel* pode efetivamente ajudar os sistemas híbridos no cumprimento dos requisitos de potência de pico para veículos pesados. Podem ainda auxiliar durante as acelerações e subidas em ciclos tipicamente urbanos, fornecendo aos veículos os elevados níveis de potência de pico necessários, isto por períodos relativamente curtos. Também durante os períodos de travagem regenerativa, elevados níveis de potência podem ser absorvidos pelo sistema de *flywheel* com muito maior eficácia que a atingida pelas baterias convencionais [37].

Estes sistemas devem ter um funcionamento completamente interligado com o sistema de armazenamento e regenerador de energia elétrica, podendo armazenar o excesso de energia para posterior utilização.

O sistema de *flywheel* pode ainda ser utilizado como um nivelador de carga nos veículos, conseguindo de certa forma reduzir e até absorver picos excessivos de corrente nos sistemas de armazenamento de energia primário, aumentando a sua vida útil. Em geradores eólicos este sistema é utilizado para compensar as oscilações do vento e as variações de tensão e frequência da rede elétrica.

Existem dois tipos principais de *flywheel*, as elétricas e as mecânicas. Esta classificação prende-se pela forma como são carregadas, pela sua constituição e como se ligam ao resto do sistema.

Na Figura 15 observam-se as duas topologias de *flywheel*.

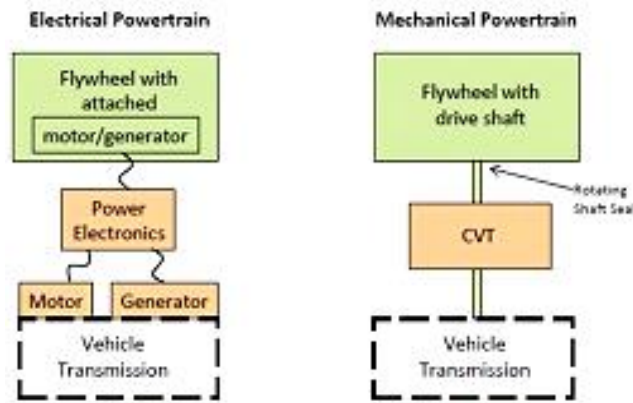


Figura 15- Estrutura dos dois sistemas típicos de *Flywheel* [39].

O sistema elétrico converte a energia mecânica do veículo para elétrica usando o motor/gerador acoplado à transmissão do veículo durante as travagens regenerativas, convertendo posteriormente esta energia elétrica para energia cinética, através da rotação do rotor da *flywheel*. Assim, quando uma potência extra é requerida, o motor que colocou a *flywheel* em rotação passa a funcionar como gerador, gerando energia para alimentar o motor de tração do veículo ou para carregar a bateria enquanto esta fornece energia ao motor. Este sistema requer um sistema de eletrônica de potência para as conversões necessárias de energia elétrica e para o controlo do sistema.

O sistema mecânico, como o próprio nome indica, está acoplado mecanicamente à transmissão do veículo através de uma transmissão continuamente variável (CVT). Esta permite a utilização da inércia do veículo na travagem para iniciar o movimento da *flywheel*. Quando uma potência extra é necessária, é retirada da *flywheel* da mesma forma, aplicando uma potência extra. Este sistema apresenta vantagens pois é simples, compacto e relativamente leve, não necessita de motores, geradores ou eletrônica e potência [37].

1.4 Hibridização de Sistemas de Armazenamento de Energia

A hibridização do armazenamento de energia consiste em combinar dois ou mais sistemas de armazenamento de energia, de modo a que as vantagens de cada um deles possam ser aproveitadas e as desvantagens compensadas. Por exemplo, a hibridização de uma bateria eletroquímica com um supercondensador pode superar os problemas de baixa potência específica das baterias eletroquímicas e a baixa energia específica dos supercondensadores, alcançando assim alta energia específica e alta potência específica [5].

Basicamente a hibridização de armazenamentos de energia consiste em juntar dois sistemas básicos, um com alta energia específica e outro com alta potência específica. Na Figura 16 estão representadas as várias formas de operação destes sistemas.

Quando necessária uma elevada potência é necessária, como acontece nas acelerações ou subidas, os dois sistemas poderão fornecer energia à carga, como se observa na Figura 16 (a). Por outro lado em períodos de baixa potência, como velocidades de cruzeiro constantes, o sistema com elevada potência específica recupera a carga perdida na demanda de alta potência como se mostra na Figura 16 (b). Já em situações de travagem regenerativa (Figura 16 (c)), a potência de pico é absorvida pelo sistema com alta potência específica, sendo que apenas uma pequena parte será absorvida pelo sistema de elevada energia específica [5].

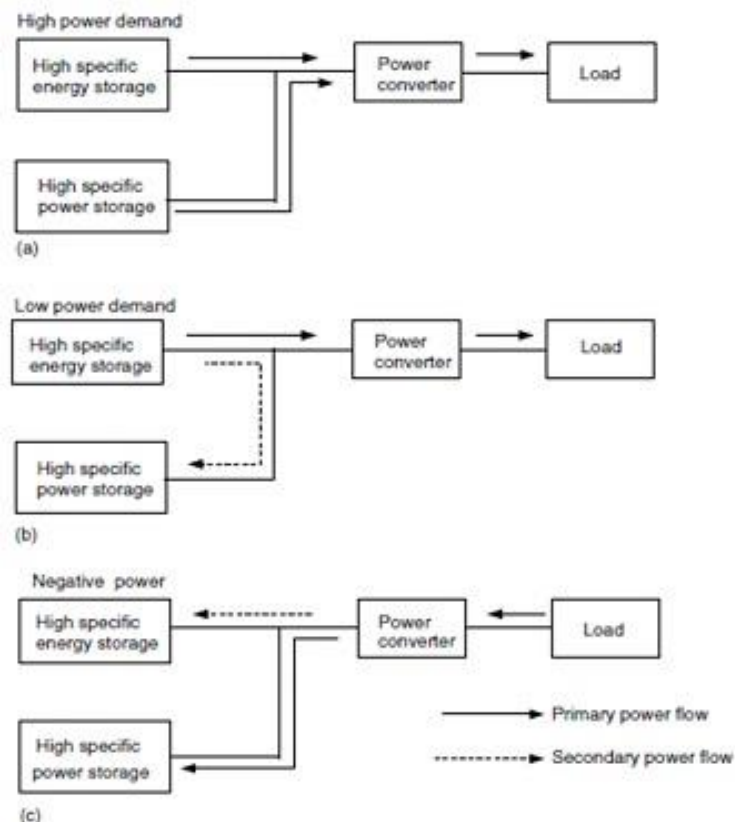


Figura 16- Conceito de Funcionamento de um sistema Híbrido de Armazenamento de Energia [5].

No caso em estudo nesta dissertação os sistemas utilizados são a *flywheel* como armazenamento de elevada potência específica, e a bateria de íões de lítio como armazenamento com elevada energia específica.

Capítulo 2 - *Flywheel*

2.1 Introdução

Um volante de inércia (*Flywheel*) caracteriza-se por receber energia, armazena-la na forma de energia cinética e devolve-la novamente quando necessário.

Muitos países têm vindo a alterar as suas políticas para o desenvolvimento de novas tecnologias no que diz respeito a sistemas de energia sustentável. Os veículos elétricos contribuem como tecnologia chave para este desenvolvimento sustentável, reduzindo as emissões de gases para a atmosfera. No entanto, os componentes de armazenamento de energia elétrica são ainda muito limitados devido à sua baixa densidade energética e tempos de recarga muito longos, quando comparados com os motores de combustão interna[38].

O armazenamento de energia de forma eficiente e segura é um tema que remonta a tempos muito antigos. Atualmente o uso comercial de energia e sistemas de armazenamento permitem classificar estes sistemas como armazenamento mecânico, elétrico, químico, biológico, térmico ou nuclear. A *flywheel* enquadra-se sem dúvida nos sistemas de armazenamento de energia mecânica.

Por volta de 1497, Leonardo da Vinci, construiu uma máquina que na sua visão quanto mais se roda menos dificuldade oferece à sua rotação, ou seja, à medida que as esferas ganham velocidade e consequentemente energia cinética, mais fácil se torna o movimento rotacional, devido à variação do momento de inércia com o quadrado da velocidade [39]. A Figura 17 mostra a fotografia da réplica dessa máquina idealizada por Leonardo Da Vinci.



Figura 17- Réplica da *Flywheel* idealizada por Leonardo Da Vinci [39].

A aplicação de um volante de inércia (*Flywheel*) tem como principal objetivo regularizar e equilibrar as transferências de energia e trabalho produzido. Para que isso ocorra, a

velocidade de rotação de uma *flywheel* pode variar bruscamente, isto dentro de certos valores e dependendo do sistema utilizado.

Os volantes de inércia têm várias formas, dependendo da aplicação para a qual são desenhados podendo ser maciços ou moldados por secções, e as suas dimensões variam entre poucas dezenas de centímetros e algumas dezenas de metros.

A roda dos oleiros e a roda de tecelagem são exemplos onde a *flywheel*, com a sua inércia, converte uma potência de entrada pulsante para uma potência de saída suave. Inicialmente os sistemas de armazenamento com *flywheel* eram puramente mecânicos, onde uma pedra era colocada em rotação tal como ilustrado na Figura 18 [40].



Figura 18- Exemplo de uma antiga aplicação de uma *Flywheel* na Indústria Oleira [40].

A referência a este dispositivo em aplicações diversas é descrita em artigos científicos do início do século XX. Um estudo sobre a inércia das peças giratórias de um comboio, especialmente a capacidade da *flywheel* ou volante das armaduras com pequeno diâmetro, foi apresentado em 1902 [41].

Na modificação do sistema de Ward-Leonard para controlo de velocidade, ficou conhecido como *Ilgner System*, uma *flywheel* com bastante inércia é usada para suavizar os picos de carga, que de outra forma seriam fornecidos à carga. Na indústria mineira em 1907 estudaram-se formas de utilizar este sistema de modo a que um motor trifásico para elevação, pudesse ser auxiliado por uma *flywheel* em caso de falha nos picos de consumo [42].

Também para aplicações na indústria mineira, uma análise económica concluiu que o uso do volante de inércia comparativamente a outros sistemas de fornecimento de energia, é mais viável, quer em termos de investimento inicial, quer em termos de rendimento, apresentando menos perdas. Em 1909 a utilização de uma *flywheel* como equalizador de carga, demonstrou ser uma solução mais barata, mais eficiente e em geral mais adequado que as baterias de armazenamento [43].

Ao longo do tempo e com o desenvolvimento da rede elétrica, a utilização da *flywheel* diminuiu bruscamente. Mas com o desenvolvimento e melhoria dos materiais de rolamento e da eletrônica de potência, o rendimento deste sistema melhorou consideravelmente. A diminuição das perdas do sistema e do controlo, e com o aparecimento das chumaceiras magnéticas na década de 70 do século passado, fez com que esta tecnologia ganhasse ainda mais importância, despertando interesse para diversas aplicações [44][45].

Atualmente, os avanços da tecnologia a nível de chumaceiras magnéticas permitiu a utilização de supercondutores de elevada temperatura (*high temperature superconductors*-HTS), obtendo-se a levitação pela interação entre o supercondutor e um ímã permanente, reduzindo substancialmente a fricção na chumaceira e conseqüentes perdas associadas. Também os avanços ao nível da eletrônica de potência torna possível a utilização de *flywheels* em altas potências e os atuais materiais compósitos permitem velocidades de rotação superiores, o que conjugado com a rotação no vácuo, reduz as perdas por atrito do ar e ainda permite maior expectativa de vida para altas velocidades de rotação [46].

A Figura 19 mostra uma estrutura básica de uma *flywheel*.

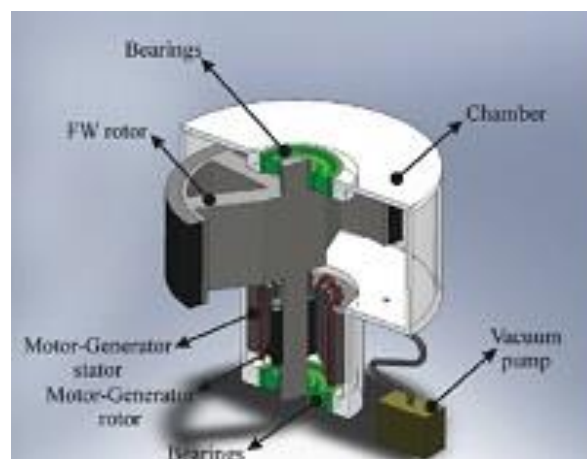


Figura 19 - Estrutura de uma *Flywheel*.

Nas últimas décadas, os estudos centraram-se em pesquisas da dinâmica de movimento dos sistemas com esta tecnologia, nomeadamente referentes à grande velocidade que o rotor tem que suportar e ao seu comportamento quando sujeito a levitação magnética, mais propriamente o deslocamento do eixo de rotação do rotor [47]. Outro problema encontrado, também relacionado com as elevadas velocidades de rotação do rotor e com o baixo amortecimento do sistema, prende-se com as vibrações no veio que podem originar perdas de energia cinética e possivelmente instabilidade do sistema. Para estudar este problema foram desenvolvidos sistemas de controlo de vibrações para analisar a sua ocorrência quando o sistema passa pela velocidade crítica, em fase de aceleração e desaceleração [47].

2.2 Tecnologias de *Flywheel*

As *flywheels*, puramente mecânicas foram reportadas há várias centenas de anos para manter máquinas a rodar sem problemas entre ciclos. Mais tarde, em 1950, um dos primeiros sistemas de produção de energia recorrendo a um volante de inércia foi produzido na Suíça, com uma *flywheel* de 1500 kg a que chamaram “*Gyrobus*” [48]. No entanto os volantes mais modernos começaram a ser desenvolvidos na década de 1970, quando a NASA patrocinou programas que propunham armazenamento de energia em volantes de inércia como fontes primárias para missões espaciais [49].

Os rápidos tempos de resposta dos volantes de inércia torna-os assim adequados para diferentes aplicações em sistemas de potência. Estes têm sido utilizados para compensação harmónica, sendo capazes de reduzir cerca de 50% dos harmónicos até ao 11°. Algumas empresas da Europa e dos EUA desenvolveram volantes de inércia para manter a qualidade da energia em paralisações energéticas momentâneas, reduzindo distorções harmónicas e eliminando cavas de tensão [46].

Alguns sistemas de armazenamento foram então desenvolvidos tendo como base a *flywheel*, como é o exemplo de um sistema alemão instalado em Dresden que pode absorver ou fornecer 5 MW durante 5s. Em Austin, Texas, uma *flywheel* garante 4,75 MW para condicionamentos de energia e proteção contra falhas de energia [50]. No Japão, um armazenamento de 200 MJ tem sido utilizado para eliminar as flutuações na potência ativa fornecida [51].

Finalmente, na rede de distribuição, um sistema de armazenamento de energia de volante de inércia de 10 MJ, usado para manter energia elétrica de alta qualidade, conseguiu manter a tensão na rede de distribuição entre 98-100%, sendo capaz de fornecer 10 kW durante 15 min [52].

Os sistemas de armazenamento de energia com *flywheel* podem ser igualmente usados em aplicações com geradores eólicos e sistemas fotovoltaicos [53][54].

2.3 Aplicação em Veículos

As desvantagens tradicionais dos veículos elétricos quando comparados com o motor de combustão interna são sem dúvida a sua autonomia limitada e os longos períodos de tempo necessários ao seu carregamento [55]. Mesmo as baterias mais recentes têm uma densidade de energia mais ou menos até duas ordens de grandeza menor do que a dos combustíveis fósseis e uma densidade de potência limitada. Para superar esta dificuldade, vários tipos de tecnologias têm sido estudadas, incluindo baterias mais potentes, supercondensadores, células de combustível e volantes de inércia [56].

Uma estimativa para um recurso de potência/energia prevista para armazenamento de energia em veículos, num curto espaço de tempo, é apresentado na Figura 20 [57].

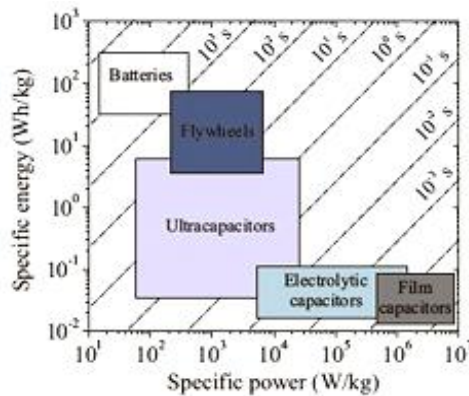


Figura 20-Densidade de Potência dos tipos de armazenamento [57].

Como se pode observar na Figura 20, as baterias têm energia específica elevada mas potência específica reduzida. Os ultracondensadores têm uma correspondência contrária. Por outro lado, a *flywheel* apresenta valores de energia específica razoáveis e uma potência específica também intermédia, encontrando-se um equilíbrio interessante entre estas duas características. De qualquer forma nenhuma destas tecnologias se aproxima dos combustíveis fósseis, que apresentam valores de energia específica de cerca de 10⁴ Wh/kg e potência específica de 10⁵ W/kg [58].

O primeiro sistema de armazenamento com *flywheel* instalado num autocarro híbrido foi implementado e testado na Universidade de Texas em Austin. A unidade acelera um autocarro totalmente carregado até aos 100 Km/h, armazenando cerca de 7,2 MJ. Este apresenta uma capacidade de potência de pico de 150 kW, bem como uma energia específica de mais de 120kJ/kg de massa em rotação e ainda uma potência específica de 2,5 kW/kg [59].

Também no ramo ferroviário existe interesse em sistemas com *flywheel*. Nos EUA existem programas para implementação de *flywheels* para aplicações ferroviárias de alta velocidade. Estes sistemas usam transmissões continuamente variáveis auxiliadas por um conjunto de engrenagens planetárias e uma *flywheel* de aço compacto. A *flywheel* nestes casos tem importância apenas em situações transitórias, compensando a inércia do motor, tornando possível otimizar a economia de combustível em situações estacionárias [60].

Os sistemas de armazenamento baseados em *flywheels* também têm a sua aplicação a nível militar, sendo usados nos sistemas de alimentação nos veículos de combate totalmente elétricos e híbridos [61].

Os desenvolvimentos mais recentes na área da tração elétrica tem sido impulsionada pelos sistemas *Fybrid* do *TOROTRAK Group*. Além de algumas aplicações em veículos híbridos de

armazenamento recorrendo a *flywheel*, aquela a que se atribui mais destaque é nos veículos de competição da Formula 1, onde o investimento é mais elevado, sendo sem dúvida a modalidade que mais conhecimentos e inovação tecnológica apresenta a todos os níveis.

Devido à crescente exigência, nesta modalidade, em reduzir as emissões de gases, e de forma a aumentar e ao nível de armazenamento de energia elétrica para alimentar os motores elétricos dos seus veículos híbridos, a Fórmula 1 utilizou em 2009 um sistema de recuperação de energia bastante eficiente para as acelerações instantâneas necessárias nestas competições, o sistema KERS da *Flybird*. Este baseia-se na recuperação de energia na travagem, armazenando-a na forma de energia cinética num volante de inércia, que roda a aproximadamente 40.000 rpm. Quando solicitado pelo piloto, este fornece uma potência extra de cerca de 80 Cv durante 6.5 segundos, através dos motores elétricos colocados num dos eixos, proporcionando acelerações elevadas com baixas emissões de gases [62-64].

Como os sistemas de *flywheel* são capazes de absorver e fornecer valores elevados de potência com grande rendimento, torna-se interessante a sua utilização em veículos como alternativa ou em conjunto com as baterias tradicionais.

Neste contexto, o presente trabalho pretende estudar a possível aplicação destes sistemas de armazenamento de energia baseados numa *flywheel* para veículos elétricos/híbridos de circulação quotidiana. O sistema converte a energia mecânica desperdiçada em energia cinética na *flywheel* carregando-a. Posteriormente, quando uma potência extra é necessária, converte a energia cinética em energia elétrica, através do motor/gerador, em quantidade suficiente para compensar acelerações e aumentos de carga no deslocamento do veículo.

2.4 Modelo Matemático da *Flywheel*

O princípio de armazenamento de energia baseado numa *flywheel* não é novo. Sendo este baseado no mesmo princípio da mó dos moinhos, ou seja, uma massa em rotação. A energia cinética armazenada (E_{ca}) obtém-se segundo a equação 1. Nestes sistemas com *flywheel* a energia cinética depende do momento de inércia I e da velocidade de rotação ω da *flywheel* [65].

$$E_{ca} = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (1)$$

Para cilindros sólidos, o momento de inércia I é dado segundo a equação 2:

$$I = \frac{1}{2}Mr^2 \quad (2)$$

onde M é a massa do cilindro e r o raio.

A massa M do cilindro é dada pela equação 3:

$$M = V\rho \quad (3)$$

onde ρ representa a densidade do material do cilindro e V o seu volume. A equação 4 expressa o volume de um cilindro (V):

$$V = \pi Lr^2 \quad (4)$$

onde L representa a altura do cilindro. Substituindo a equação 4 na equação 3 obtém-se:

$$M = \pi Lr^2\rho \quad (5)$$

Substituindo a equação 5 na equação 2 tem-se:

$$I = \frac{1}{2}r^4\pi L\rho \quad (6)$$

Uma das formas mais usuais em *flywheels* é o cilindro oco. O momento de inércia I para um cilindro oco tem que contemplar a diferença entre o raio externo (r_o) e o interno (r_i), sendo o momento de inércia I é calculado pela equação 7:

$$I = \frac{1}{2}\pi L\rho (r_o^4 - r_i^4) \quad (7)$$

onde r_o é o raio externo e r_i é o raio interno.

Substituindo a equação 7 na equação 1 tem-se a energia cinética armazenada (E_{ca}):

$$E_{ca} = \frac{1}{4}\pi l\rho(r_o^2 - r_i^2)\omega^2 \quad (8)$$

A energia entregue pela *flywheel* (ΔE_{ca}) pode ser determinada tendo em conta a variação da velocidade do disco segundo a equação 9:

$$\Delta E_{ca} = E_{ca} - E_{ca \text{ minima}} = \frac{1}{2}I(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad (9)$$

A *flywheel* pode ser utilizada como dispositivo de manuseamento de potência, sendo a potência (P) a taxa à qual a energia é convertida num período de tempo (Δt), dada pela equação 10:

$$P = \frac{\Delta E_{ca}}{\Delta t} = \frac{1}{2}I \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\Delta t} \quad (10)$$

Capítulo 3 - Modelação da Dinâmica de um Veículo

A modelação dinâmica de um veículo é essencial para o estudo do seu comportamento e potencialidades. No caso desta dissertação, torna-se de grande interesse a modelação do veículo assim como dos sistemas de propulsão e de armazenamento de energia, para melhor se perceber o enquadramento deste sistema numa aplicação real.

Para uma análise aprofundada das reduções de custo associadas ao consumo de energia, a modelação do veículo para um trajeto normal é fundamental, pois só assim se conseguem quantificar as vantagens da implementação de um sistema de armazenamento proposto, num veículo para circuitos quotidianos.

3.1 Modelação de um Veículo

A energia utilizada por um veículo em circulação depende de várias forças de resistência ao movimento que terão que ser vencidas para o veículo se deslocar. Assim sendo, será apresentada de seguida a modelação matemática das várias forças aplicadas num veículo, para que a simulação represente um movimento o mais real possível.

Como forças de resistência ao movimento temos a resistência de rolamento (*rolling resistance*) e a resistência do ar ao movimento (*drag resistance*). Durante as inclinações no percurso, haverá uma força contrária ao movimento caso o veículo esteja a subir, chamada de força de subida (*grading resistance*). Quanto à aceleração do veículo, está associada uma força, a força de aceleração [5].

3.1.1 Força de Atrito de Rolamento

A força de atrito de rolamento deve-se principalmente ao atrito entre os pneus e a superfície de contacto, ou seja, o piso. Esta força é causada principalmente pela histerese dos materiais dos pneus e deve-se à deflexão do chassi quando o pneu está a rolar.

A força de rolamento é importante para a deslocação do veículo. Esta resistência ao movimento do carro depende muito do tipo de material do piso. No piso de areia, por exemplo, o valor da força provocada pelo atrito de rolamento é superior quando comparada ao caso de um piso de alcatrão[5].

É necessário, então, uma força F_r para superar esta resistência, tal que:

$$F_r = mg \times f_r [N] \quad (11)$$

em que m corresponde à massa do veículo, g à aceleração gravítica e f_r ao coeficiente de atrito. Este coeficiente de atrito depende do tipo de superfície e composição do pneu utilizados. Para o estudo a efetuar considera-se um valor típico de coeficiente de atrito entre o pneu e o alcatrão, aproximadamente $f_r=0.01$.

3.1.2 Força de Resistência do Ar

A força de resistência do ar deve-se ao atrito gerado entre o ar e o corpo do veículo. É função da área frontal, da forma, da existência de entradas de ar ou espelhos, entre outros constituintes que possam influenciar o deslocamento do ar ao longo do veículo. A força de resistência do ar (F_{ra}) é dada pela equação 12:

$$F_{ra} = \frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_d \times (v - v_w)^2 [N] \quad (12)$$

em que ρ representa a densidade do ar (kg/m^3), e que varia em função da altura em relação ao nível do mar. Utilizou-se para efeitos de simulação a densidade de $1,2 \text{ kg/m}^3$, que representa a densidade do ar a 20°C . A variável A_f corresponde à área frontal do veículo. C_d é o coeficiente de fricção do ar, que varia conforme as linhas do chassi do veículo. v e v_w , representam a velocidade do veículo e a velocidade do vento contra a direção do movimento em m/s , respetivamente.

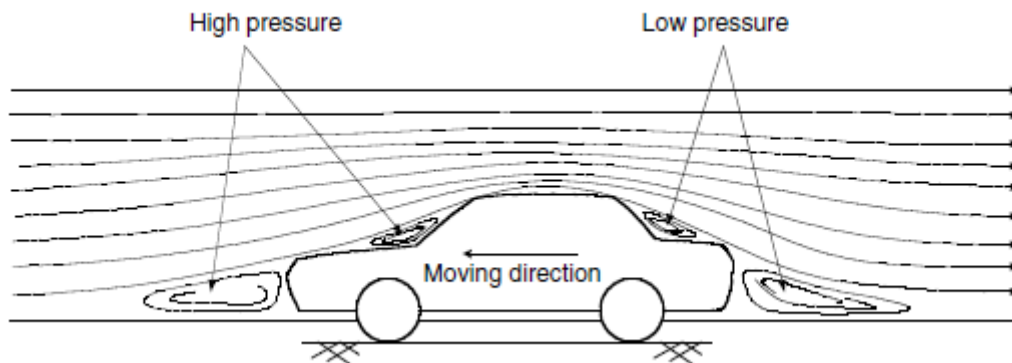


Figura 21 - Explicação da força de resistência do ar [5].

3.1.3 Força de Subida

Para conseguir subir uma rampa é necessário uma força paralela à inclinação da rampa (F_g). Esta força depende diretamente do ângulo de inclinação e determina-se segundo a equação 13:

$$F_g = m \times g \times \sin \alpha [N] \quad (13)$$

em que m representa a massa do veículo em kg, g a aceleração gravítica em m/s^2 e α o ângulo de inclinação.

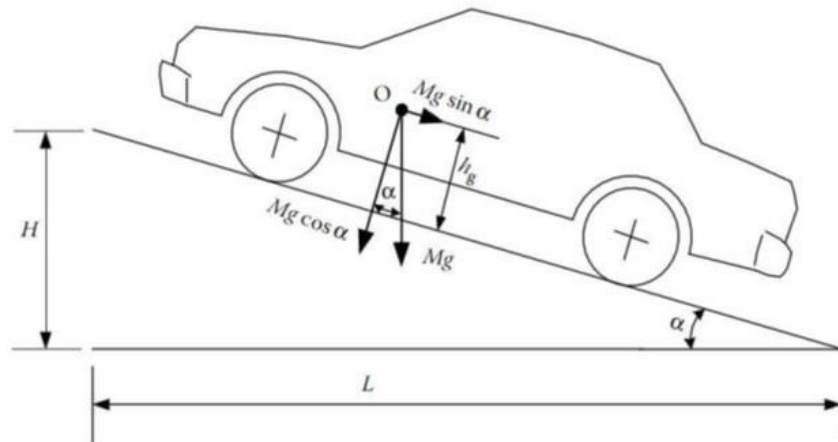


Figura 22- Representação da força gravítica devido à inclinação [5].

3.1.4 Força de Aceleração

A força de aceleração (F_a) refere-se à força aplicada a um veículo para obter uma aceleração a , a qual depende linearmente da massa do veículo, segundo a 2ª Lei de Newton:

$$F_a = m \times a \text{ [N]} \quad (14)$$

Além desta força de aceleração linear, também se pode considerar a força de aceleração angular necessária para fazer os constituintes rotativos rodarem mais depressa. Esta aceleração angular será muito mais reduzida que a aceleração linear, tipicamente 5% do valor da força de aceleração linear [5].

3.1.5 Força Total de Tração

Para movimentar um veículo com uma aceleração a , a uma velocidade v , é então necessário aplicar uma força total (F_{total}) igual à soma das forças anteriormente referidas:

$$F_{total} = F_r + F_{ra} + F_g + F_a \text{ [N]} \quad (15)$$

Deve-se ter em conta que F_a , será negativa se o veículo estiver a desacelerar.

3.1.6 Binário

O binário necessário para exercer uma força F numa roda de raio r é dado por (T_{roda}):

$$T_{roda} = F_{total} \times r_{roda} \text{ [Nm]} \quad (16)$$

O binário da roda surge da multiplicação do binário do motor pelos rácios da transmissão e da caixa de velocidades (R_{TG}) e da relação do diferencial (R_{dif}). Sabendo que a transmissão tem uma eficiência E_T , o binário do motor (T_{Motor}) vêm da seguinte equação:

$$T_{roda} = T_{Motor} \times R_{TG} \times R_{dif} \times E_T \quad [Nm] \quad (17)$$

$$T_{Motor} = \frac{T_{roda}}{R_{TG} \times R_{dif} \times E_T} \quad [Nm] \quad (18)$$

3.1.7 Potência do Veículo

A potência do veículo (P) está relacionada com a velocidade e com a força instantânea que está a ser exercida para o colocar em movimento, segundo a equação 19:

$$P = F_{total} \times v \quad [W] \quad (19)$$

Ao ser atuada uma força proveniente do motor, esta terá uma relação linear com a velocidade, mas considerando as perdas relacionadas com a eficiência de transmissão e da caixa de velocidades E_T e do motor E_M , a eficiência total (E_{Total}) vem da multiplicação destas duas eficiências:

$$E_{Total} = E_T \times E_M \quad (20)$$

A potência do motor determina-se, assim, a partir da equação 21:

$$P = \frac{F_{total} \times v}{E_{Total}} \quad [W] \quad (21)$$

3.1.8 Energia Consumida

A energia consumida (E) é dada pelo integral da potência ao longo do tempo, como descrito na equação 22:

$$E = \int P(t) \, dt \quad [J \text{ ou } Ws] \quad (22)$$

3.1.9 Rotação nominal e Rotação Máxima do Motor

Para o cálculo da rotação nas rodas do veículo em rpm a partir das velocidades em Km/h, tem que se converter a velocidade para m/s e utilizando a velocidade angular e o raio da roda, determinar-se a rotação da roda em Rpm a partir das seguintes equações:

$$V = \frac{V_{\left(\frac{Km}{h}\right)}}{3.6} \quad [m/s] \quad (23)$$

$$V = \omega \times r_{roda} \quad [m/s] \quad (24)$$

$$V = \frac{2\pi \times r_{roda} \times N_{roda}}{60} \quad [m/s] \quad (25)$$

Resolvendo esta equação em ordem à velocidade de rotação da roda (N_{roda}) tem-se:

$$N_{roda} = \frac{30 \times V}{\pi \times r_{roda}} \quad [RPM] \quad (26)$$

Para o cálculo da velocidade de rotação do motor em rpm basta multiplicar a velocidade de rotação da roda pela relação de transmissão total utilizada no cálculo do binário:

$$N_{motor} = i_g \times N_{roda} \quad [RPM] \quad (27)$$

onde i_g é um valor adimensional que representa a relação de transmissão total e determina-se segundo a equação 28.

$$i_g = R_{TG} \times R_{dif} \times E_T \quad [Adm] \quad (28)$$

Capítulo 4- Descrição do Sistema

O sistema proposto divide-se em 3 subsistemas principais: uma fonte de alimentação de corrente contínua, um motor de tração do veículo elétrico e um sistema de recuperação e armazenamento de energia mecânica, a *flywheel*, bem como assim os respetivos sistemas de controlo do motor de tração e da *flywheel* (Fig.23).

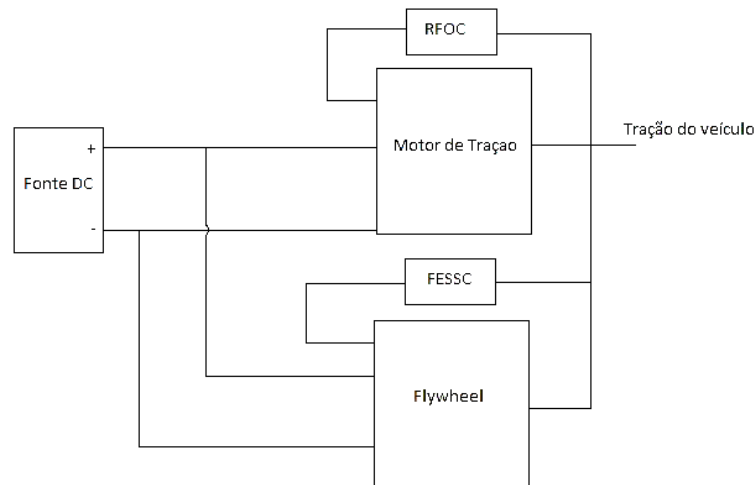


Figura 23 - Descrição geral do sistema.

Onde o bloco RFOC representa o controlo vetorial por orientação de campo rotórico do motor de tração e o bloco FESSC (*flywheel energy storage system control*) representa o sistema de controlo da flywheel.

4.1 Fonte de alimentação de corrente contínua

A fonte de alimentação de corrente contínua mais comum nos veículos elétricos e híbridos é a bateria de íões de lítio. No entanto, qualquer fonte de alimentação de corrente contínua que revele boa capacidade para armazenar energia elétrica poderia ser considerada, como por exemplo um banco de supercondensadores ou pilhas de células de combustível.

A Figura 24 mostra uma bateria típica de um veículo elétrico.



Figura 24 - Bateria de um veículo elétrico (BMW i3 e i8)

4.2 Motor de Tração

Este subsistema é constituído por 4 constituintes fundamentais: um inversor trifásico DC-AC, um motor síncrono de ímanes permanentes (MSIP), um sensor de velocidade e um sistema de controlo do motor. A Figura 25 mostra o esquema de ligações destes elementos.

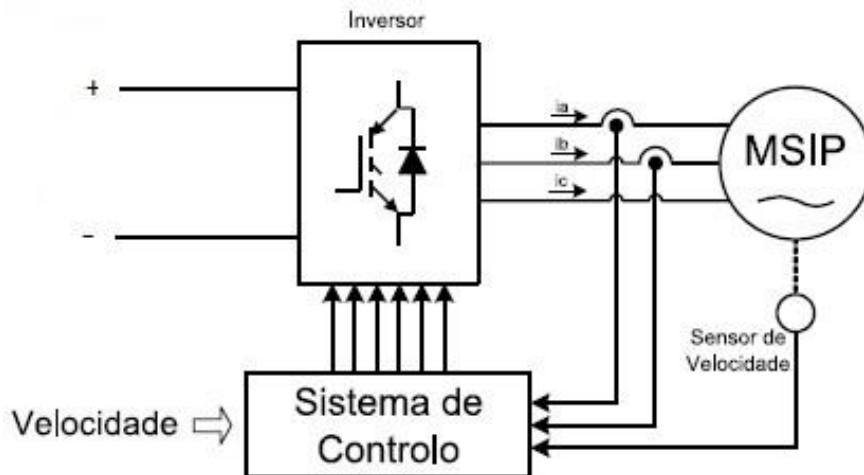


Figura 25 - Esquema dos constituintes do motor de tração.

4.3 Inversor Trifásico DC-AC

Os inversores trifásicos, também conhecidos como inversores de fonte de tensão, convertem a tensão contínua proveniente da bateria em tensão alternada trifásica à saída, com frequência e valor eficaz variáveis, sendo muito comuns em acionamentos de velocidade variável. A Figura 26 ilustra o esquema de um inversor trifásico com IGBT's.

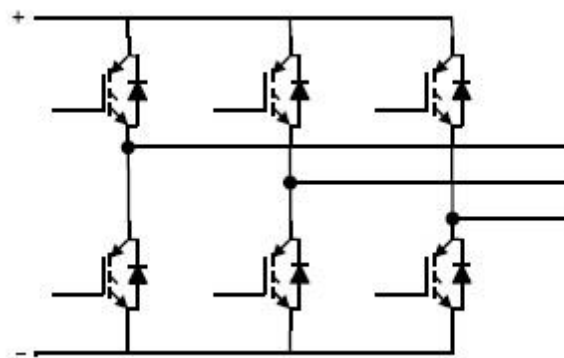


Figura 26 - Esquema de um inversor trifásico com IGBT's.

Existem várias configurações destes dispositivos, estando a escolha relacionada com o compromisso entre a sua capacidade de potência e velocidade de comutação, dependendo da área de aplicação. Os inversores constituídos por IGBT's são os mais utilizados em acionamentos electromecatrónicos de baixa e média tensão [66].

4.4 Motor Síncrono de Imanes Permanentes

Os motores síncronos de ímanes permanentes são cada vez mais utilizados para acionamentos de tração de veículos elétricos, pois normalmente são menos volumosos e mais leves comparativamente aos motores de indução, permitindo acionamentos diretos para reduzir as perdas de potência nas transmissões e o ruído associado às caixas de velocidade.

Estes motores além de apresentarem uma melhor relação peso/potência, tem ainda um melhor rendimento o que lhes confere vantagens em relação aos motores de indução que se tornam bastante pesados para potências mais elevadas.

Relativamente à manutenção, os motores síncronos de ímanes permanentes, devido à possível desmagnetização dos ímanes, apresentam-se em desvantagem em relação aos motores de indução que têm uma necessidade de manutenção muito mais reduzida, no entanto são cada vez mais selecionados para este tipo de aplicações.

Esta escolha deve-se em grande parte às suas características como o elevado rendimento, um menor peso pela utilização de ímanes, a sua velocidade máxima de rotação, um comportamento térmico que facilita a evacuação do calor, ausência de contactos elétricos móveis e ainda a sua estrutura compacta. Tudo isto faz destes motores uma boa alternativa para aplicações de tração elétrica. A Figura 27 mostra o motor de um veículo híbrido, o *Toyota Prius*.

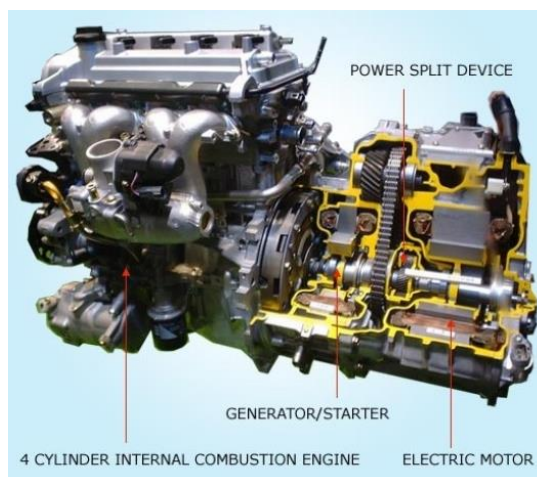


Figura 27 - Imagem do motor do *Toyota Prius* com motor síncrono de ímanes permanentes.

4.5 Sensor de velocidade

Para o controlo do acionamento é necessário ter conhecimento da velocidade de rotação mecânica do motor assim como da sua posição. Para este efeito é utilizado um sensor de velocidade, sendo a posição do motor obtida pela integração do sinal da velocidade em ordem ao tempo.

4.6 Sistema de controlo

O controlo do motor síncrono de ímanes permanentes é feito usando a técnica de controlo vetorial, ou controlo por orientação de campo.

O principal objetivo desta técnica é implementar uma estratégia de controlo que tenha um elevado desempenho dinâmico, idêntico ao controlo usado em motores de corrente contínua de excitação separada. Para que este controlo seja atingido, as referências são alinhadas com o fasor espacial do fluxo encadeado estatórico ou do fluxo encadeado rotórico ou, ainda, com o referencial síncrono. Na Figura 28 observa-se a representação esquemática deste tipo de sistema de controlo [66].

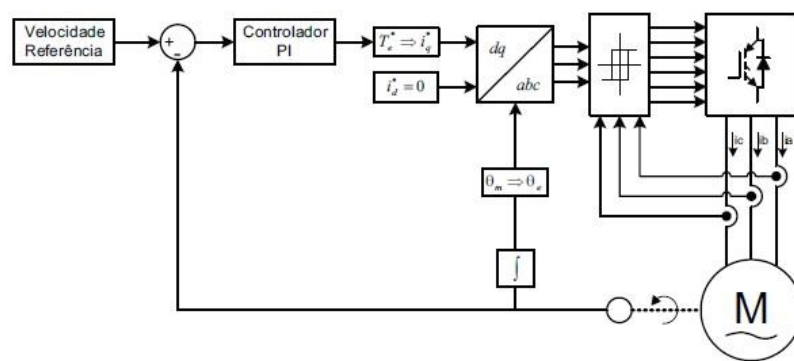


Figura 28 - Representação esquemática do sistema de controlo [66].

4.6.1 Controlador de velocidade

O principal objetivo deste controlador é a possibilidade de ajustar facilmente o valor de velocidade de rotação desejada, gerando o sinal de comando necessário para o resto do controlo, atuando para que o MSIP funcione a essa velocidade de referência.

O sistema tem uma rápida resposta, visto que tem um funcionamento em malha fechada, como se observa na Figura 29. Para um controlo mais eficaz é gerado um sinal de erro que será a entrada de um controlador PI. Este erro é a diferença entre a velocidade de referência e a velocidade mecânica de rotação do motor, produzindo assim um controlo eficaz e fiável.

O controlador PI é constituído por um ganho proporcional, que produz uma saída proporcional ao valor do erro, e uma parte integrativa que permite anular o erro em regime permanente [66].

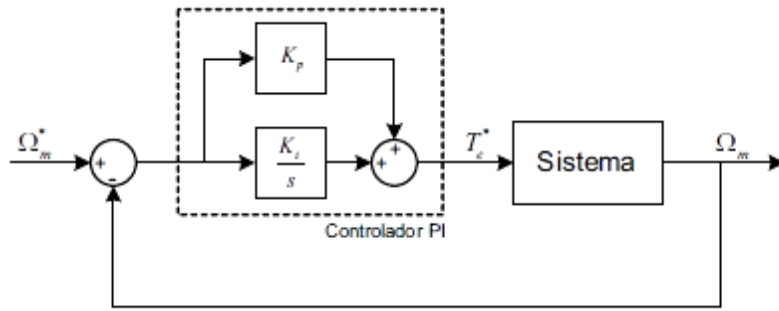


Figura 29 - Esquema do controlador PI.

4.6.2 Controlo por orientação do campo rotórico (RFOC)

Este controlo pode ser usado para controlar motores de indução ou motores síncronos de uma forma eficiente e rentável.

Esta técnica tem em conta a posição instantânea do rotor e força as correntes do motor a manter um ângulo específico em relação ao rotor, controlando a comutação dos semicondutores no inversor [66]. Com isto consegue-se desacoplar a componente de binário da corrente e os canais de fluxo do motor, controlando este tipo de motores de corrente alternada como um motor DC com excitação separada.

Tendo em conta que esta técnica necessita saber a posição instantânea do fluxo rotórico ou da posição do rotor, podem-se calcular as correntes nas três fases do motor de acordo com as zonas de funcionamento deste, zona de binário constante ou de enfraquecimento de fluxo. Estas zonas baseiam-se nos limites físicos do acionamento, sendo delimitadas pela velocidade nominal do motor [66].

4.6.3 Controladores de corrente

As correntes são escolhidas como variável de controlo pois permite eliminar os efeitos da resistência e indutância do estator e da força eletromagnética induzida, tal como acontece nos motores de corrente contínua.

Os métodos mais comuns para o controlo da corrente são baseados em técnicas de PWM, que consiste basicamente no envio de impulsos para os interruptores de potência do inversor de modo a produzir uma tensão semelhante a uma tensão de referência [66].

4.7 Flywheel

Como já descrito anteriormente, a *flywheel* é um dispositivo de armazenamento de energia cinética. Foi escolhido este sistema pela sua rápida capacidade de carga/descarga, elevada densidade de energia armazenada, elevada densidade de potência, baixo risco de sobrecarregamento ou descarregamento, funcionamento em uma grande faixa de

temperaturas, um ciclo de vida muito elevado e ainda o facto de ser um sistema não poluente [67].

No caso em estudo, este sistema definiu-se como um motor/gerador normal mas com uma inércia muito mais elevada para que se aproximasse o mais possível da realidade. Deste modo, assumiu-se esta parte do sistema idêntica ao motor de tração assim como o seu sistema de controlo.

Capítulo 5 - Simulação Computacional do Sistema

5.1 Descrição do Modelo

A construção do modelo utilizado para simular o sistema proposto tem uma estrutura idêntica à descrita anteriormente no Capítulo 4, com as entradas das velocidades pretendidas e das inclinações do percurso para simular o funcionamento do veículo elétrico. A simulação baseou-se em três blocos principais, o bloco referente à dinâmica do veículo, o bloco de simulação do motor de tração e respetivo controlo e o bloco da *flywheel*. A Figura 30 representa a implementação do modelo no *software* de simulação *Matlab*.

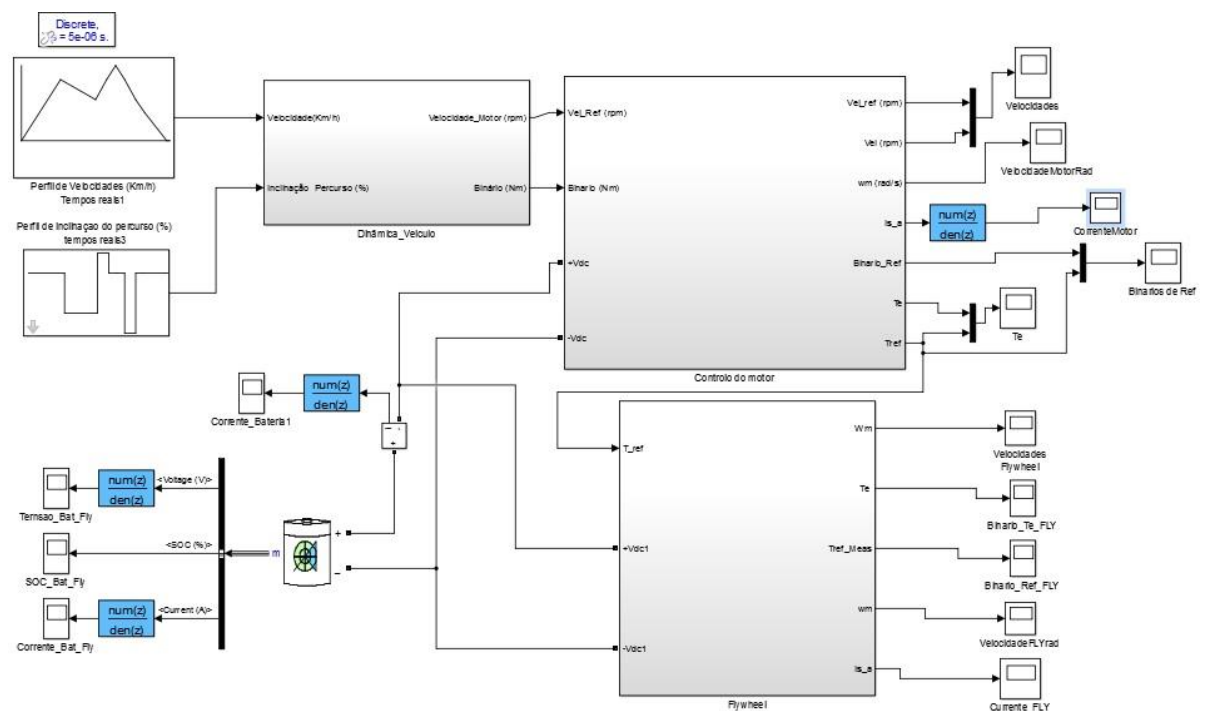


Figura 30- Implementação em ambiente Matlab do sistema.

O modelo de simulação apresenta uma estrutura bastante complexa, descrevendo-se de seguida os principais blocos de modelação.

5.1.1 Bloco da Dinâmica do Veículo

Este primeiro bloco refere-se à modelação da dinâmica do veículo, ou seja, tendo em conta as entradas das velocidades pretendidas ao longo do percurso escolhido e as inclinações do percurso, ter-se à saída uma velocidade de referência e um binário para serem aplicados ao motor de tração e definir, assim, o seu funcionamento para o fim proposto.

A Figura 31 descreve este bloco e os seus constituintes.

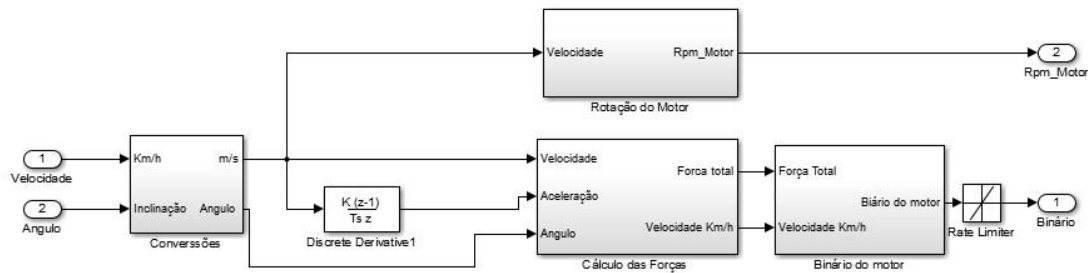


Figura 31- Constituintes do bloco referente à dinâmica do veículo.

5.1.1.1 Bloco de Conversões

Os valores de velocidade em Km/h e de inclinação em percentagem são convertidos para unidades SI, para posterior utilização nos cálculos ao longo da simulação.

A Figura 32 representa o bloco em *Matlab* criado para as conversões da velocidade e da inclinação.

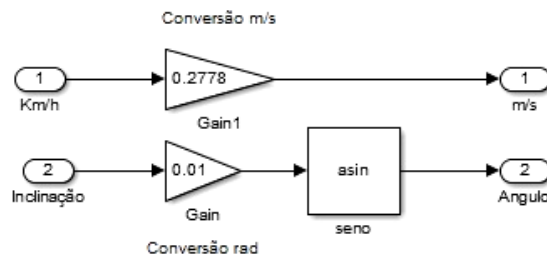


Figura 32- Conversões efetuadas para posterior utilização nos cálculos.

5.1.1.2 Forças exercidas no veículo

Este bloco de simulação refere-se às forças aplicadas no veículo em situação normal de funcionamento. É implementada a teoria anteriormente descrita no Capítulo 3, onde foram apresentadas todas as equações inerentes à modelação do veículo, assim como os binários necessários para o percurso de teste escolhido.

A Figura 33 representa a implementação em *Matlab* deste bloco.

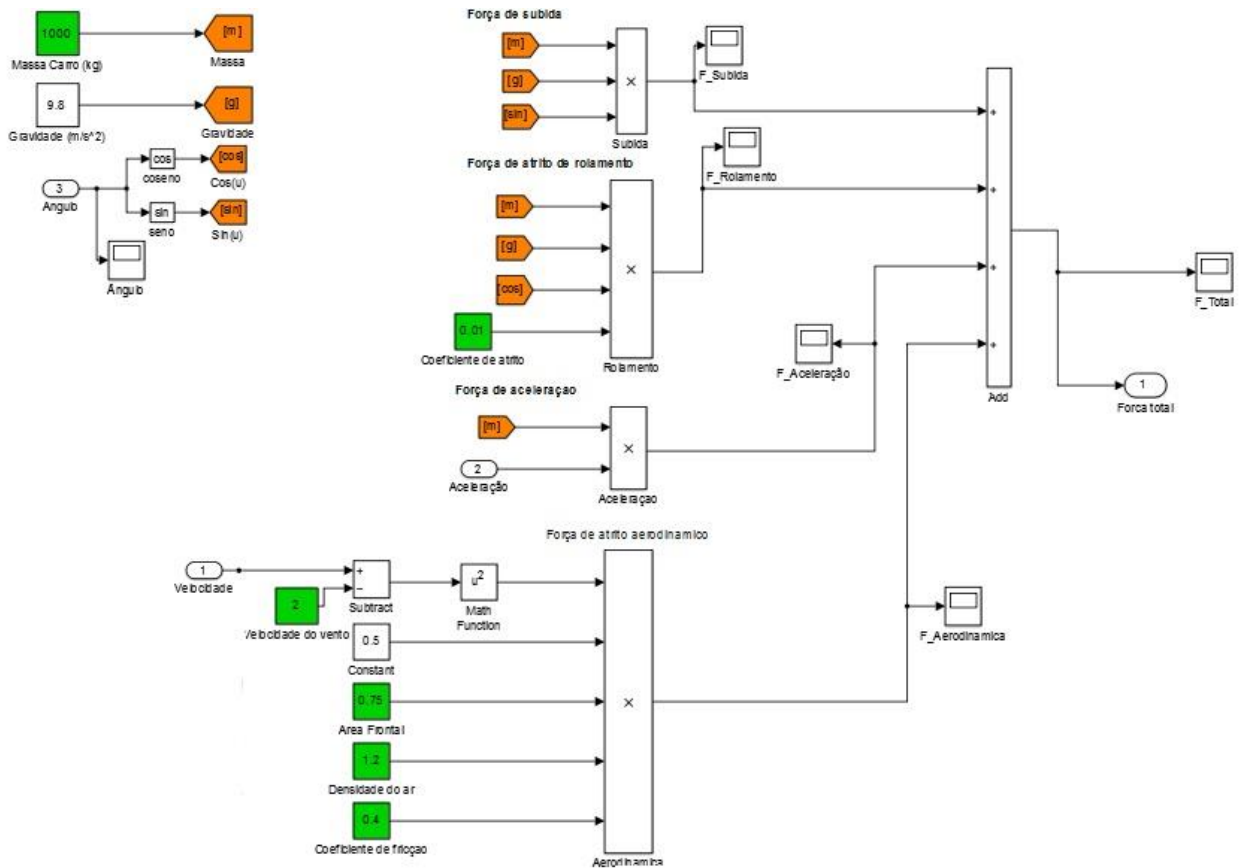


Figura 33- Constituição do bloco referente aos cálculos das forças exercidas no veículo.

Os sinais de entrada deste bloco representam a velocidade pretendida do veículo, ao longo do percurso, a aceleração, que se determina fazendo a derivada em ordem ao tempo do sinal da velocidade e ainda o ângulo de inclinação do percurso, em radianos.

Neste caso de estudo, os parâmetros utilizados foram escolhidos tendo como base valores reais de veículos comuns. Estes valores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Parâmetros escolhidos para os cálculos durante a simulação.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Massa do Carro	1000 kg	Densidade do Ar	1.2
Aceleração Gravítica	9.8 m/s ²	Coeficiente de Fricção	0.4
Coeficiente de Atrito	0.01	Raio da Roda	0.25 m
Velocidade do Vento	2 m/s	Transmissão diferencial	3.2
Área Frontal	0.75 m ²	Eficiência de transmissão	90 %

Os valores referenciados nesta tabela foram retirados da literatura, tal como já descrito no Capítulo 3.

5.1.1.3 Binário do Motor

Após o cálculo das forças exercidas no veículo para as velocidades pretendidas, torna-se imprescindível o cálculo do binário do motor. Para isso há que ter em conta o raio da roda e o rácio do diferencial. O cálculo do binário seguiu as equações anteriormente apresentadas no Capítulo 3.

A Figura 34 representa a implementação em *Matlab* deste bloco.

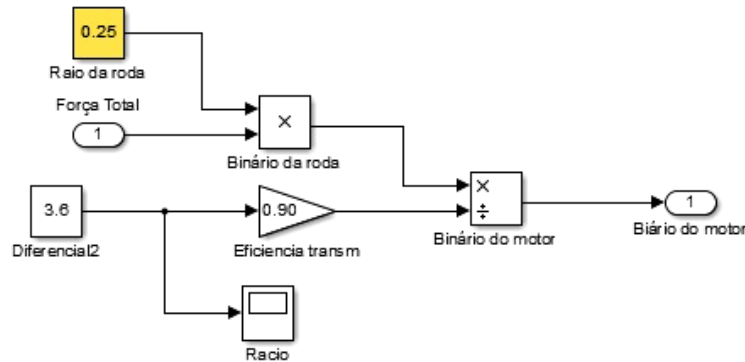


Figura 34- Cálculo do Binário do motor.

5.1.1.4 Rotação do motor em rotações por minuto

Como a velocidade de referência se encontra em m/s e a velocidade de rotação do motor é medida em rpm, criou-se um bloco para esta conversão, onde primeiramente se calculou a velocidade de rotação da roda, baseada no seu raio, para posteriormente se calcular a velocidade de rotação do motor em rpm, tendo em conta a eficiência e o rácio da transmissão do diferencial.

Na Figura 35 observa-se a estrutura deste bloco. A descrição detalhada de cada um dos blocos é apresentada no Anexo A (Figuras A1 e A2).

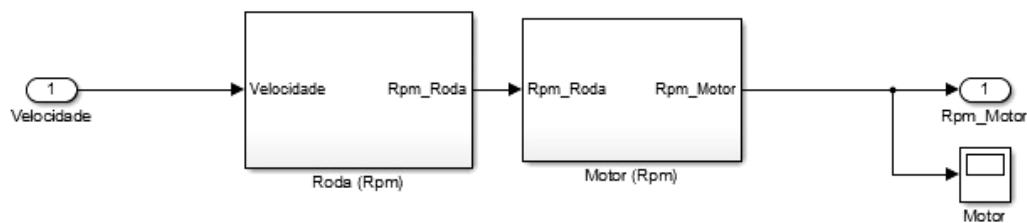


Figura 35- Bloco com o cálculo da rotação do motor em rpm.

5.1.2 Bloco do funcionamento e controlo do motor de tração

Para a representação e simulação do motor de tração utilizou-se um modelo de motor síncrono de ímanes permanentes, já existente no *Matlab*. Esse modelo já se encontra com o

respetivo controlo de velocidade definido, sendo apenas necessário colocar os parâmetros referentes às características do motor, do conversor e dos controladores.

A Figura 36 ilustra a organização deste bloco.

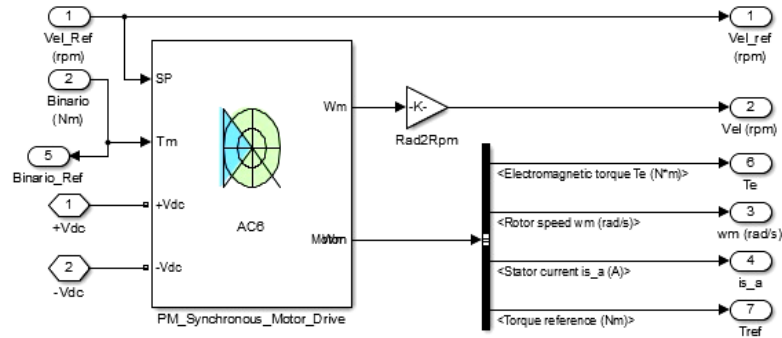


Figura 36- Modelo do MSIP e seu controlo.

Como sinais de saída deste bloco seleccionaram-se a velocidade de referência em rpm, a velocidade de rotação do motor, a velocidade do rotor em rad/s, a corrente no estator, o binário eletromagnético e o binário de referência do motor, servirá de entrada para o controlo da *flywheel*.

5.1.2.1 Motor Síncrono de Ímanes Permanentes e respetivo controlo

Apesar de se ter utilizado um modelo já existente, este necessitou de algumas alterações, visto que se baseava numa alimentação trifásica alternada e no caso em estudo a alimentação é feita em corrente contínua. A Figura 37 mostra este bloco assim como todos os seus constituintes.

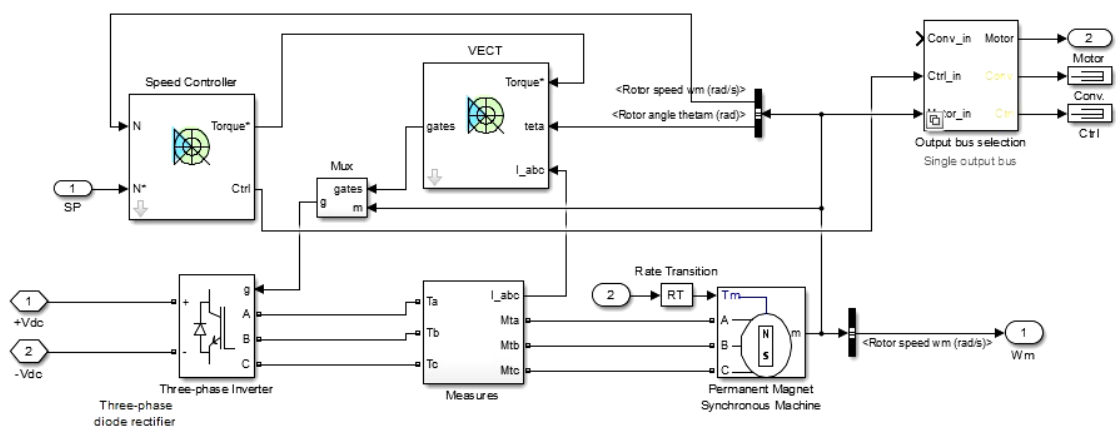


Figura 37- Aacionamento do Motor de tração.

Neste bloco, tal como descrito no Capítulo 4, incluem-se os sub-blocos necessários à utilização da técnica de controlo por orientação de campo rotórico, onde o sub-bloco

denominado “*speed controller*” representa o controlador de velocidade com o respetivo controlador PI.

O sub-bloco com a descrição “*VECT*” representa o controlo vetorial do motor onde se observa a entrada do ângulo do motor, $teta$, das três correntes de alimentação do motor, i_{abc} , e o binário de referência para controlar a comutação dos semicondutores no inversor. O bloco do MSIP tem como entradas a representação esquemática dada pelo *Matlab* e tem como entradas a alimentação trifásica e a entrada do respetivo binário de carga.

Os constituintes destes blocos encontram-se no Anexo A (Figuras A3 e A4) assim como as imagens retiradas do *Matlab* com a representação dos parâmetros introduzidos para o motor, conversor e controlador (Figuras A5 até A7).

5.1.3 Bloco do funcionamento e controlo da *Flywheel*

Este bloco é bastante idêntico ao bloco anterior, pois utilizou-se o mesmo modelo já existente no *Matlab* e apresentado na Figura 38.

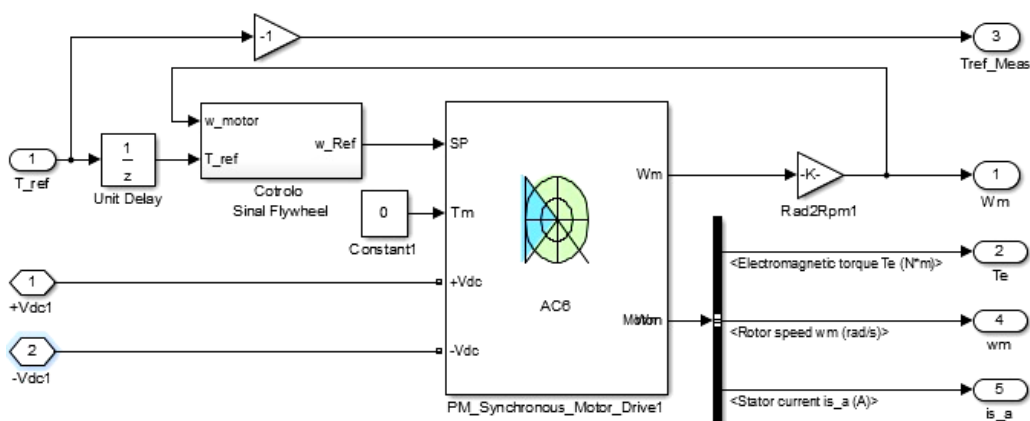


Figura 38- Modelo representativo da *Flywheel* com o respetivo controlador do sinal da velocidade de referência.

Como se pode observar na Figura 38, foi usado o sinal de binário de referência proveniente do bloco referente ao motor de tração para construir o sinal de referência para comandar a *flywheel*. Esta construção encontra-se representada no bloco denominado “controlo de sinal *flywheel*”, que será descrito mais detalhadamente no ponto seguinte.

Os parâmetros introduzidos para o motor, conversor e controlador, estão descritos em imagens retiradas diretamente do *Matlab* e colocadas no Anexo A (Figura A8 até A10).

5.1.3.1 Controlo de sinal da *flywheel*

Com a criação deste bloco pretendeu-se dar à simulação um carácter real no que diz respeito à utilização da *flywheel*. A Figura 39 mostra a implementação em *Matlab* deste bloco.

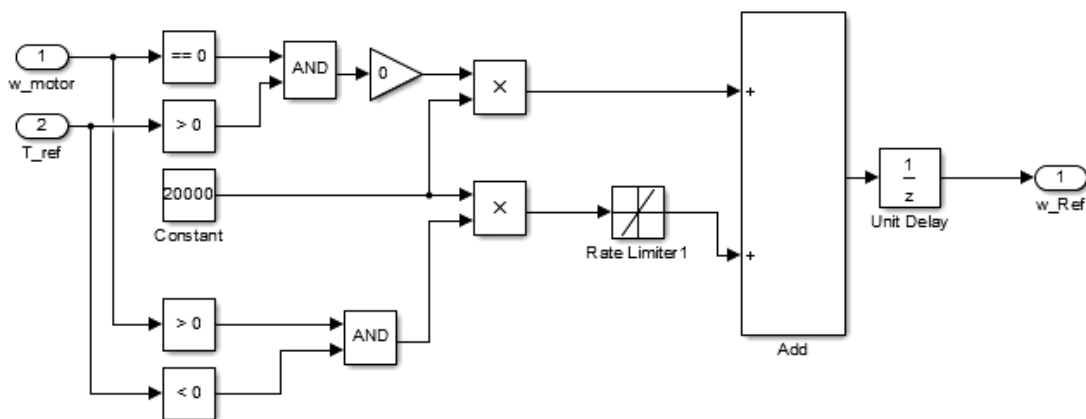


Figura 39- Controle do sinal da *flywheel*.

Para a construção deste bloco de controle do sinal da *flywheel* seguiram-se algumas premissas cruciais num acionamento deste tipo:

- A *flywheel* só pode iniciar o seu armazenamento de energia (rotação) quando o binário do motor de tração é negativo, ou seja, quando o motor está em fase de travagem ou descida, períodos onde é possível regenerar energia.
- A *flywheel* só pode iniciar o seu funcionamento quando o motor tração estiver a funcionar, ou seja, a *flywheel* não pode iniciar o seu funcionamento independente do motor de tração.
- O valor máximo de velocidade de rotação da *flywheel* definiu-se como 20.000 rpm.

Com este bloco conseguiu-se definir as diferentes fases de funcionamento da *flywheel* para as premissas estabelecidas.

Analisando a Figura 39, define-se no topo a ausência de movimento por parte da *flywheel* quando o veículo está parado e o binário é superior a zero. Posteriormente quando a velocidade de rotação do motor é superior a zero (veículo em movimento) e o binário passa para valores negativos (travagem regenerativa), é imposta a velocidade máxima de rotação da *flywheel*. Nestas condições, procede-se ao carregamento da *flywheel*. Por outro lado quando o binário imposto pelo motor de tração volta para valores positivos, a *flywheel* irá entrar em fase de descarregamento, complementando o fornecimento de energia

5.2 Resultados da Simulação

Na Tabela 4 apresenta-se o percurso escolhido na simulação do veículo para o estudo desta dissertação. Nela estão descritas as distâncias percorridas, as velocidades, a inclinação do percurso e os tempos referentes às alterações de velocidade. Estes valores surgiram do cálculo baseado nas equações descritas no Anexo A.

Tabela 4- Percurso escolhido (distância, velocidades, tempo e inclinação do percurso).

Distância (m)	Velocidade (Km/h)	Tempos (s)	Inclinação (%)
0	0	0	0
100	90	28,8	-10
150	60	54,7	5
200	90	63,3	0
250	110	69,8	0
300	90	76,3	-15
350	60	84,9	0
375	40	91,4	0
400	0	107,6	0
410	0	110	0

Implementando os valores de velocidade e tempos anteriormente descritos na Tabela 4, o perfil de velocidade do veículo ao longo do percurso é representado na Figura 40, para posterior utilização na restante simulação.

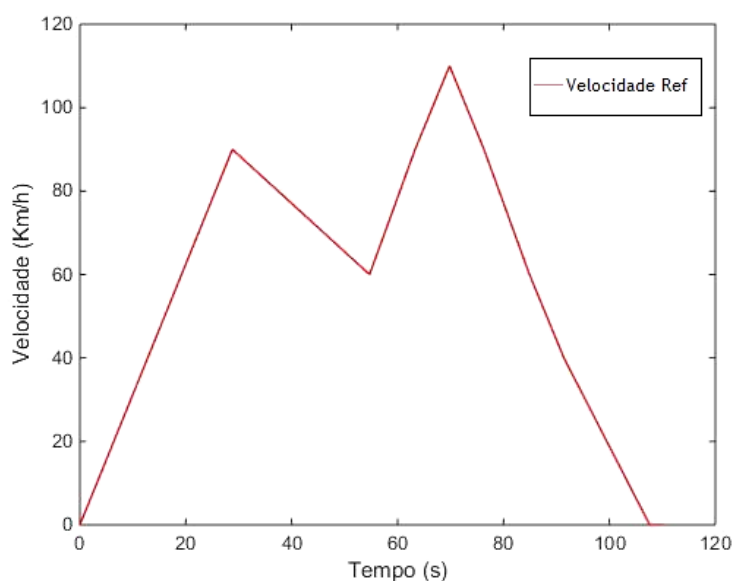


Figura 40- Perfil de Velocidades.

Para uma simulação mais realista, colocou-se também um perfil de inclinação do percurso ao longo do tempo, com os valores apresentados na Tabela 4 em percentagem de inclinação, grandeza comumente observada nas sinalizações rodoviárias. Na Figura 41 apresenta-se o sinal referente às inclinações propostas, onde os valores positivos correspondem a uma subida no percurso, os valores negativos uma descida e quando se tem valor nulo trata-se de períodos sem declive.

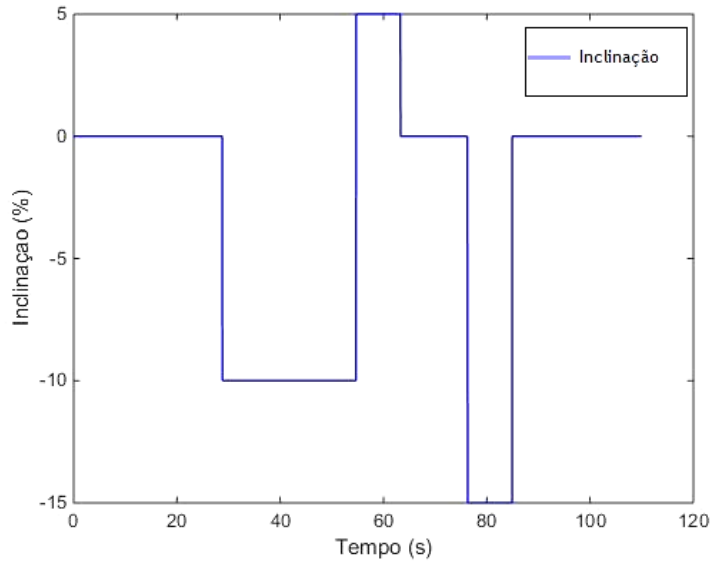


Figura 41- Inclinação do percurso.

5.2.1 Controlo de velocidade do motor de tração

Na Figura 42, apresentam-se os resultados de simulação da velocidade de rotação do motor de tração, onde são apresentadas as curvas referentes à velocidade imposta pelo controlador e a velocidade de rotação medida.

A análise deste resultado permite constatar que, de um modo geral, a velocidade de rotação do motor é coincidente com a sua velocidade de referência, demonstrando um funcionamento eficaz do controlador de velocidade. Existem, naturalmente, pequenas flutuações que ocorrem devido às mudanças de velocidade impostas pelo condutor e/ou variações de inclinação do percurso, que são rapidamente compensadas pelo controlador.

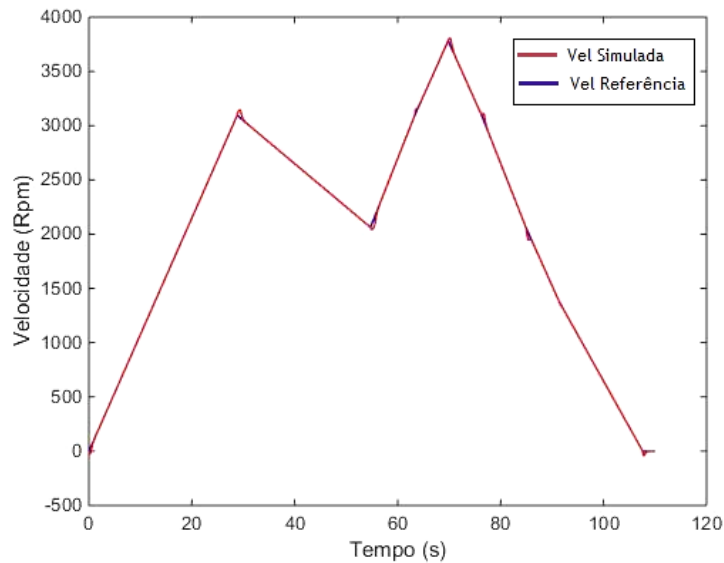


Figura 42- Velocidade imposta pelo controlador ao motor e velocidade de rotação medida.

5.2.2 Binário do motor

Na Figura 43 apresenta-se a evolução do binário do motor de tração tendo em conta o percurso escolhido, onde estão representadas as curvas referentes ao binário de referência, que permite que o veículo atinja as velocidades pretendidas, e o respetivo binário eletromagnético medido no motor síncrono de ímanes permanentes.

Como se pode observar, o binário eletromagnético apresenta intrinsecamente mais *ripple* do que o binário de referência. No entanto, o valor médio é coincidente com o valor de referência, mostrando o bom funcionamento do sistema.

As variações entre valores positivos e negativos do binário referem-se ao período em que o veículo acelera ou se encontra a subir, e o período que o veículo se encontra em travagem regenerativa ou a descer, respetivamente.

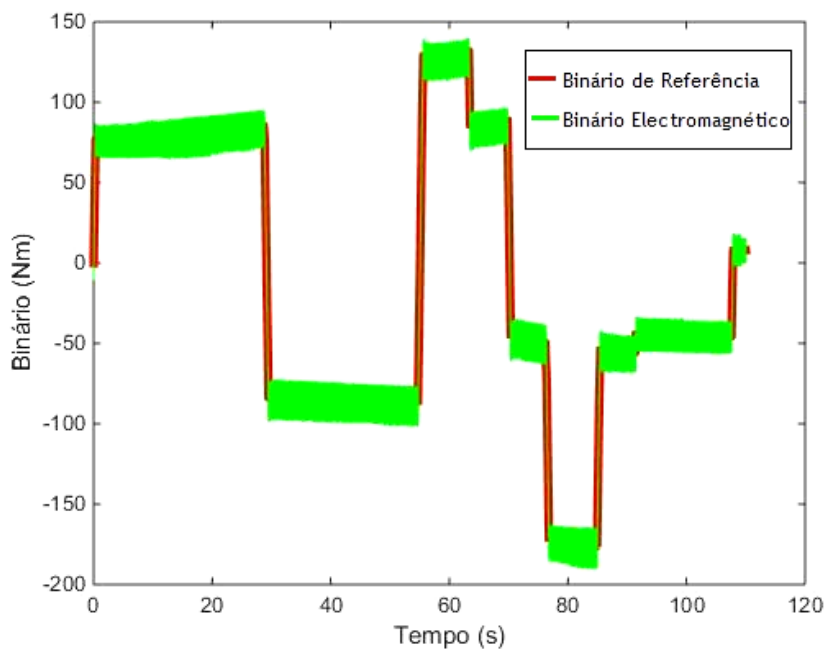


Figura 43- Binário de referência do motor de tração e binário eletromagnético medido.

5.2.3 Binário aplicado à *flywheel*

Na Figura 44, apresenta-se o binário de referência aplicado à *flywheel* (usado apenas para controlo dos ciclos de carga e descarga), assim como o binário eletromagnético que esta realmente desenvolve.

Podemos constatar que existe uma simetria entre o binário de referência apresentado na Figura 44 e o binário desenvolvido pelo motor de tração. Isto deve-se ao facto da *flywheel* ter um comportamento de controlo inverso ao motor de tração. Deste modo, é necessário que a *flywheel* forneça energia extra ao motor de tração quando o binário deste é positivo

(funcionamento em modo motor), e que receba energia do motor quando este apresenta um binário negativo (funcionamento como gerador ou travagem regenerativa).

Pode observar-se na Figura 44 que o binário eletromagnético da *flywheel* apresenta uma zona de saturação, não acompanhando o binário de referência. Esta saturação deve-se à limitação imposta pela capacidade de fornecimento de energia da *flywheel*. Também se pode observar que no início da simulação o binário da *flywheel* é nulo, uma vez que o veículo está em fase inicial de aceleração (arranque) e que a *flywheel* se encontra completamente descarregada.

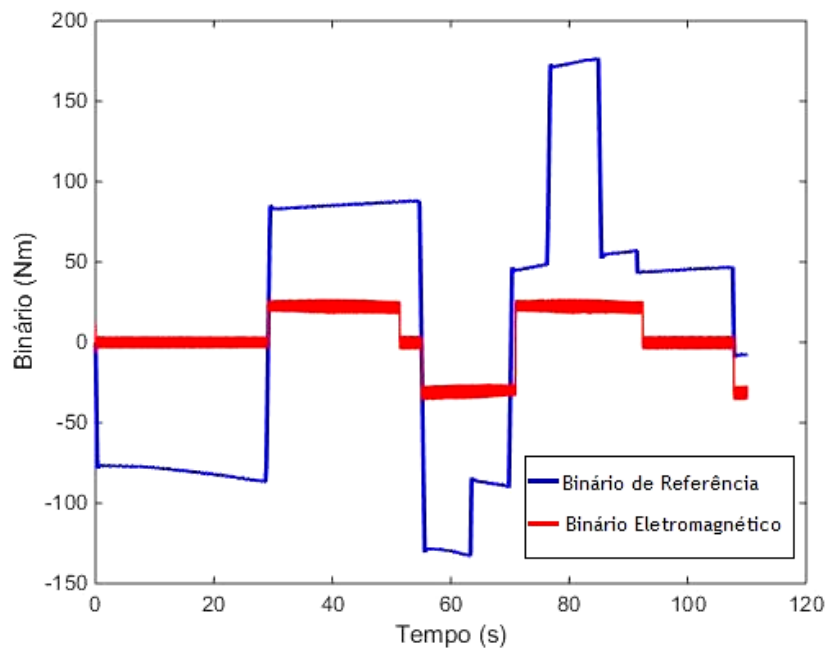


Figura 44 - Binário de referência aplicado à *flywheel* e binário eletromagnético medido.

5.2.4 Velocidade da *flywheel*

Na Figura 45 apresenta-se a velocidade da *flywheel*, em rpm, após a simulação do modelo.

Como foi descrito anteriormente, a velocidade máxima da *flywheel* foi definida como 20.000 rpm. Como se pode concluir pela análise desta figura, a *flywheel* só inicia o seu funcionamento aproximadamente aos 30 s da simulação, período em que o motor de tração muda de um binário positivo (arranque), para um binário negativo, referente à desaceleração do veículo e descida no percurso.

Após o início da aceleração da *flywheel* (início do carregamento), esta demora cerca de 20 s a atingir o valor máximo de rotação, estando completamente carregada. Quando no motor do veículo desenvolve novamente um binário positivo, a *flywheel* fornece energia extra descarregando e reduzindo a sua velocidade, trabalhando neste ponto em regime gerador e auxiliando a demanda de energia requerida pelo motor de tração.

Quando o veículo volta a desacelerar, a *flywheel* carrega novamente, aumentando a sua velocidade de rotação aproveitando a energia fornecida pelo motor de tração (em modo regenerativo). Neste caso o seu carregamento foi mais rápido demorando menos de 20 s até estar completamente carregada.

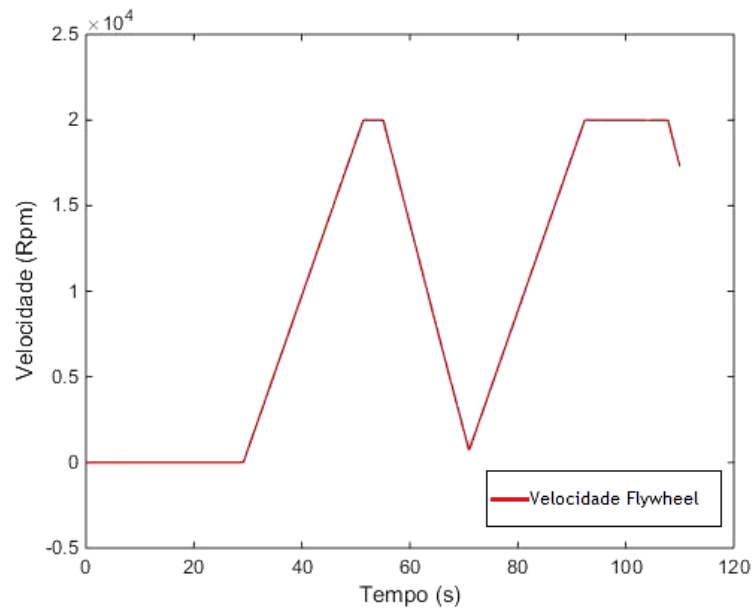


Figura 45 - Velocidade medida na *flywheel* ao longo da simulação.

5.2.5 Tensão na bateria

Na Figura 46 apresenta-se a evolução da tensão na bateria ao longo da simulação do sistema, onde é comparada a simulação com o sistema de *flywheel* no acionamento e sem este sistema.

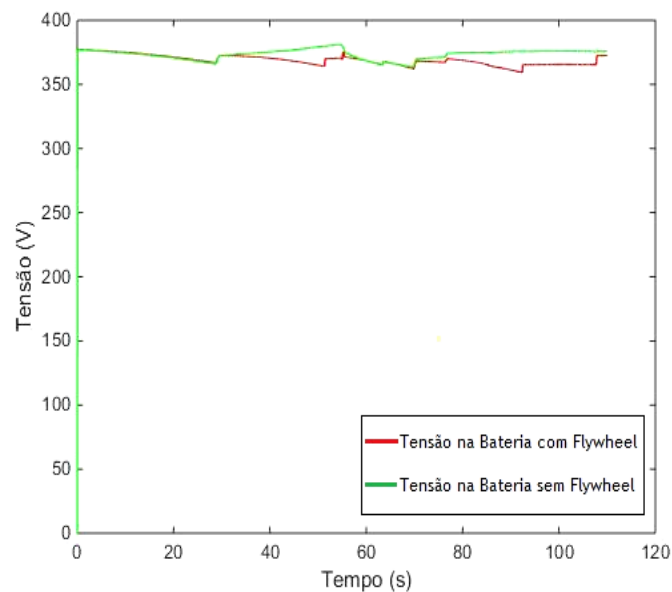


Figura 46 - Tensão na bateria ao longo da simulação.

Como se pode analisar na figura a tensão na bateria mantém-se relativamente constante ao longo da simulação (aproximadamente 380 V), o que confere um bom funcionamento do sistema nos dois casos. No entanto, existem algumas variações que se devem aos períodos de carregamento da bateria e de períodos onde grandes demandas de energia são necessárias no acionamento.

5.2.6 Corrente fornecida pela bateria

Na Figura 47 apresentam-se as curvas da corrente fornecida pela bateria ao longo da simulação, quer com o sistema de *flywheel* quer sem este sistema de armazenamento.

Como se pode observar na figura a utilização da *flywheel* apresenta vantagens notórias comparativamente à não utilização.

Um dos fatores que mais reduz a vida útil de uma bateria é sem dúvida os elevados picos de corrente durante largos períodos de tempo, sendo aqui que a utilização da *flywheel* se apresenta como uma solução vantajosa. Como se pode concluir, quando se utiliza o sistema de *flywheel*, apesar de existirem picos de corrente elevados, estes são relativamente mais baixos quando comparados com os picos de corrente do sistema sem a utilização da *flywheel*.

No entanto também se pode constatar que existem períodos em que a corrente fornecida pela bateria sem utilização da *flywheel* é negativa (bateria a carregar) e que no mesmo período de tempo com utilização da *flywheel*, esta é positiva (bateria a descarregar). Este consumo extra de energia quando se utiliza a *flywheel* deve-se, neste caso, ao facto de que a *flywheel* irá utilizar uma pequena parte da energia da bateria para se manter carregada. Por outro lado, este pequeno gasto extra de energia da bateria (que se traduz não numa perda mas numa transferência de energia da bateria para a *flywheel*), mostra-se vantajoso na redução dos picos de longa duração na bateria, como já anteriormente mencionado.

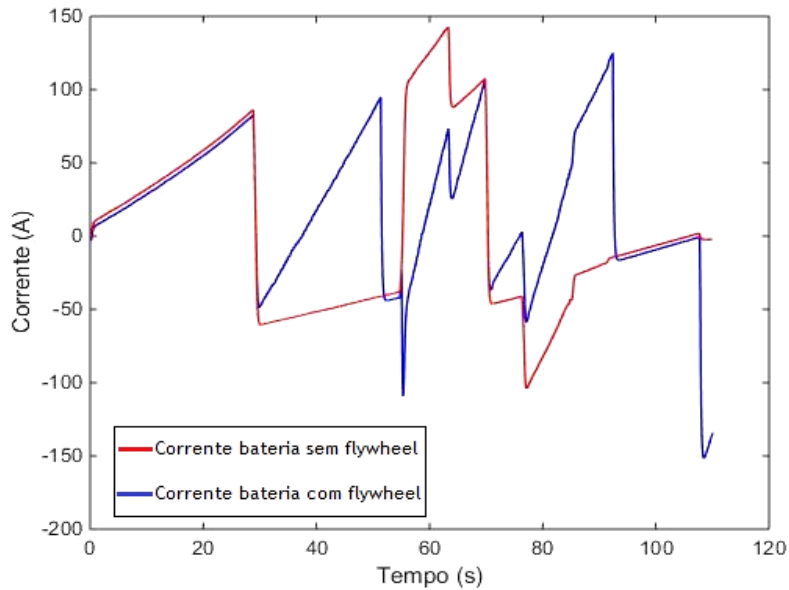


Figura 47- Corrente fornecida pela bateria com e sem o sistema de *flywheel* no modelo.

5.2.7 Estado da carga na bateria (SOC)

Após a análise da corrente na bateria do veículo nas duas situações, importa analisar também o estado de carga da bateria. A Figura 48, apresenta a evolução do SOC da bateria ao longo da simulação para os dois casos comparativos.

Numa primeira análise, pode-se constatar que a utilização do sistema com *flywheel* será menos vantajoso, pois o estado de carga da bateria no final da simulação é inferior. No entanto, tal como discutido anteriormente, esta diferença deve-se à transferência de uma pequena porção de energia da bateria para a *flywheel*. Naturalmente existem perdas intrínsecas associadas ao sistema *flywheel* que por serem muito pequenas, são desprezadas.

Outro fato importante de salientar é a ordem de grandeza do gráfico apresentado, onde está representado apenas 1% da faixa de carga, pelo que as diferenças apresentadas são de algumas décimas da percentagem de carga da bateria. Deste modo, conclui-se portanto que as diferenças são pouco relevantes, para o caso em estudo, tendo ainda em conta todas as vantagens apresentadas relativa à utilização de *flywheel*.

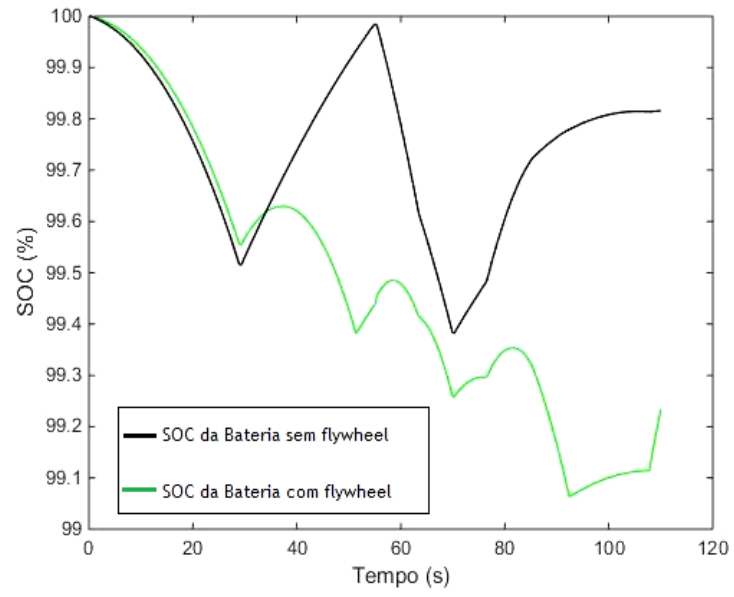


Figura 48 - Estado de carga da bateria com e sem o sistema de *flywheel* no modelo.

Capítulo 6 - Validação experimental

6.1 Implementação experimental

Para a validação experimental pretendia-se implementar em laboratório um acionamento que descrevesse o funcionamento da *flywheel* e permitisse retirar algumas conclusões, baseadas no seu funcionamento. Para isso utilizou-se um motor *brushless* DC, comumente utilizado em modelismo, e um motor de indução com alguma inércia para funcionar como *flywheel*.

A Figura 49 apresenta o esquema da montagem pretendida.

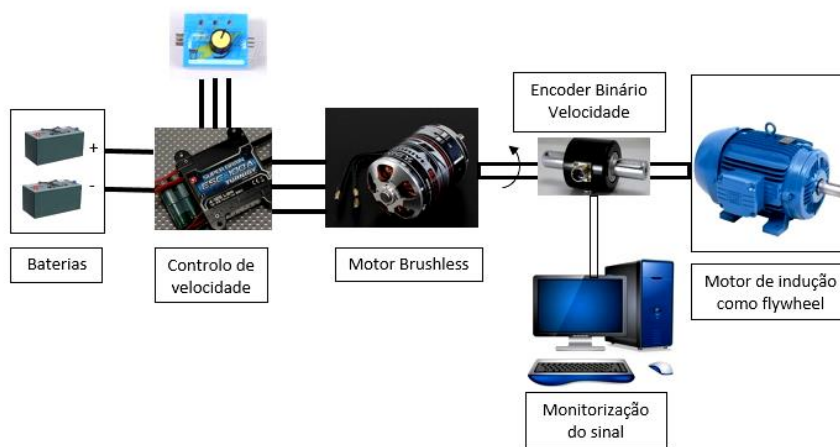


Figura 49- Implementação experimental pretendida.

O acionamento foi alimentado com uma tensão DC proveniente de 2 baterias de 24 V. O controlo de velocidade do motor foi feito através de um variador ESC, que fazia parte de um Kit de modelismo. Para um controlo mais preciso e mais simples utilizou-se um variador analógico de *duty cycle* para regular a tensão de alimentação do ESC e assim controlar com precisão a velocidade do motor.

O motor de indução não estava a ser alimentando, pretendendo-se que este rodasse com o auxílio do motor *brushless* e posteriormente fornecesse energia proveniente do seu momento de inércia, fazendo assim uma analogia com um volante de inércia.

O objetivo deste trabalho experimental seria colocar o motor de indução a girar, em vazio, com alta rotação através do acoplamento com o motor *brushless* DC a funcionar como motor. Posteriormente pretendia-se examinar o comportamento do motor a funcionar como gerador aproveitando a rotação do motor de indução, ou seja, reduzir repentinamente a velocidade do motor brushless DC para valores muito baixos através do controlador de velocidade e verificar a sua geração de energia e carregamento das baterias.

A Tabela 5 apresenta as características do motor assim como do variador de velocidade utilizado.

Tabela 5 - Características do motor *brushless* e do controlador (ESC)[68][69].

Motor Brushless	Características	ESC Superbrain	Características
Velocidade	149 rpm/v	Corrente constante	100 A
Peso	840 g	Corrente de pico	120 A
Corrente Máxima	70 A	Bateria	12-36 V
Resistência	21 mh	Tipo de motor	Brushless
Potência	2250 W	Frequência PWM	8/12/16 KHz
Tensão máxima	44 V	Peso	109 g

Foi escolhido este motor brushlees DC para facilitar o controlo de velocidade, pois para além de ser um controlo em tensão contínua, o motor já possuía um controlador para o efeito. Este controlador tinha como princípio de funcionamento, a variação do *dutty cycle* para regular a tensão e conseqüentemente a velocidade de rotação, pretendendo-se assim tirar conclusões quanto ao funcionamento da flywheel num acionamento.

No entanto surgiram algumas complicações no que diz respeito ao funcionamento deste acionamento. Devido às correntes altas atingidas para os valores se velocidade pretendidos e uma vez que os constituintes do sistema não eram os mais adequados para o fim em questão, não foi possível concluir o trabalho, uma vez que se queimaram os circuitos dos controladores de velocidade do motor.

Posto isto, e por falta de tempo para desenvolver um controlador mais robusto e eficaz, a validação experimental não foi passível de ser desenvolvida em laboratório. De qualquer das formas, são apresentados de seguida alguns estudos experimentais com flywheels, assim como as suas principais conclusões.

6.2 Principais estudos envolvendo *Flywheels*

6.2.1 Estudo 1

Um estudo desenvolvido pela *Nanyang Technological University*, consistiu em modelar e controlar uma *flywheel* em ambiente laboratorial.

Neste projeto desenvolveram uma *flywheel* apresentada na Figura 50.

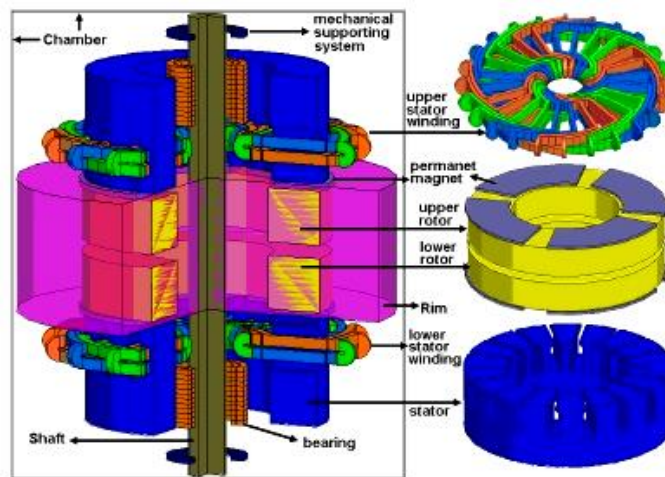


Figura 50- Flywheel proposta para este estudo.

Relativamente ao controlo utilizam a técnica de orientação de campo rotórico.

6.2.1.1 Validação Experimental

Na Figura 51 apresenta-se a montagem experimental implementada.

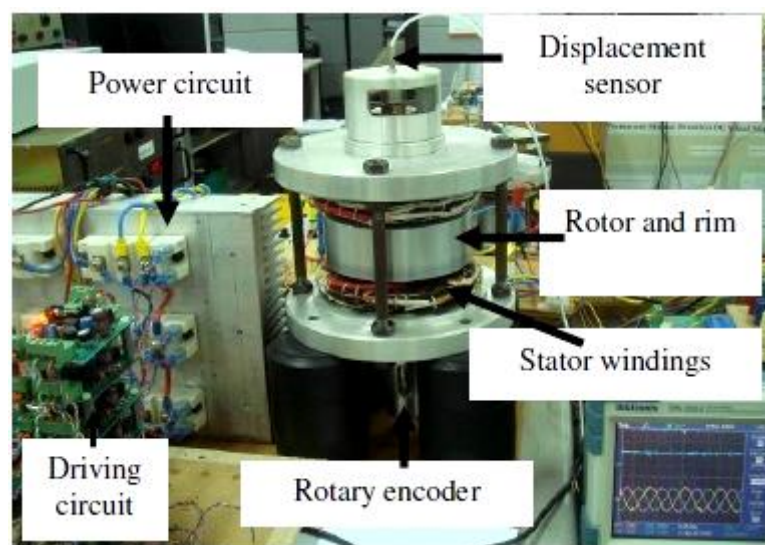


Figura 51- Montagem experimental implementada.

A experiência utiliza uma frequência PWM de 20 KHz e uma frequência de amostragem de 50 μ s. A velocidade máxima foi limitada a 3.000 rpm e a mínima a 1.000 rpm [67].

6.2.1.2 Resultados e principais conclusões

Todos os resultados foram registados no computador com o programa *dSPACE ControlDeck*. Os gráficos retirados deste estudo são apresentados no Anexo B, Figura B1.

Observou-se que a *flywheel* tinha uma rápida carga e descarga. A variação de temperatura na *flywheel* não foi relevante, verificando-se que esta suporta correntes elevadas durante o seu funcionamento.

Neste projeto verificou-se que a força axial estática gerada pelos ímanes permanentes no rotor é idêntica ao peso da *flywheel*, ficando o rotor equilibrado quando em pleno funcionamento. Com esse estado de equilíbrio é necessário apenas uma corrente reduzida para manter a *flywheel* em levitação axial e rotação, o que permite concluir que as perdas durante os períodos de inatividade são bastante reduzidas [67].

De seguida apresenta-se outro estudo onde foi utilizado um sistema de *flywheel* na experiência.

6.2.2 Estudo 2

Neste estudo pretende-se destacar o interesse de fontes de hibridação para veículos pesados com perfis de funcionamento descontínuos, como por exemplo os camiões de recolha e lixo. Este funcionamento é caracterizado por uma relação de energia da bateria de pico média elevada, pretendendo assim utilizar uma hibridização de uma bateria e uma *flywheel* para auxiliar nos picos de energia [70].

6.2.2.1 Validação experimental

Foi montada uma bancada experimental para recriar o comportamento dinâmico do veículo utilizado como referência. A Figura 52 apresenta essa montagem.



Figura 52- Bancada experimental criada neste estudo.

No lado esquerdo encontra-se um motor de indução de 9 KW com rotor em gaiola de esquilo e alimentado com sinal PWM, e um sensor de binário para a medição do binário dinâmico. Os 3 volantes de inércia com embraiagem (ao centro), pretende representar o veículo pesado. Para acionamento da carga é utilizado um motor síncrono de ímanes permanentes alimentado com um inversor reversível para poder enviar a energia de travagem para a rede. Um sensor

de força controla a resistência do binário em malha fechada. Mais à esquerda, o computador define a velocidade de referência do acionamento de tração, enviando também os valores calculados dos parâmetros do veículo e da estrada.

A *flywheel* utilizada, com peso de 151 Kg e inércia 4,5 Kg m^2 , com o motor síncrono de ímanes permanente a ser controlado por técnicas de controlo vetorial encontram-se ilustrados na Figura 53, que apresenta a montagem do sistema de *flywheel* [70].

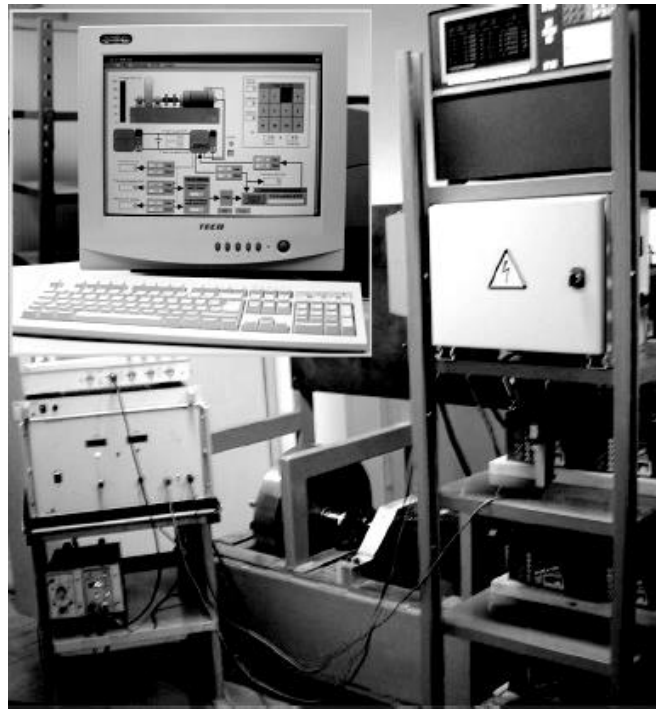


Figura 53- Montagem experimental do sistema de *flywheel*.

6.2.2.2 Resultados e Principais conclusões

Foram criados 5 estados de funcionamento para análise do sistema.

- **Estado 0** - Neste estado a velocidade da *flywheel* foi mantida, consumindo 180W.
- **Estado 1** - Durante este estado a corrente de tração atinge o seu pico devido à aceleração do veículo.
- **Estado 2**- Quando ocorre a travagem a corrente diminui, no entanto a velocidade da *flywheel* está mais baixa que a velocidade total da carga, aumentando a corrente na *flywheel* carregando-a um pouco.
- **Estado 3** - Tanto a *flywheel* como a bateria estão a ser carregadas devido à travagem.
- **Estado 4** - A baixas velocidades, a corrente de tração aumenta e torna-se positiva.
- **Estado 5** - Quando o veículo está parado, a *flywheel* não está totalmente carregada. Assim o atual controlo garante o carregamento da *flywheel* para a sua velocidade inicial, voltando ao estado 0. No entanto se a paragem for por um curto período de tempo a energia armazenada é suficiente para outro ciclo até nova paragem.

A Figura 54 apresenta os gráficos retirados tendo em conta estes 5 estados.

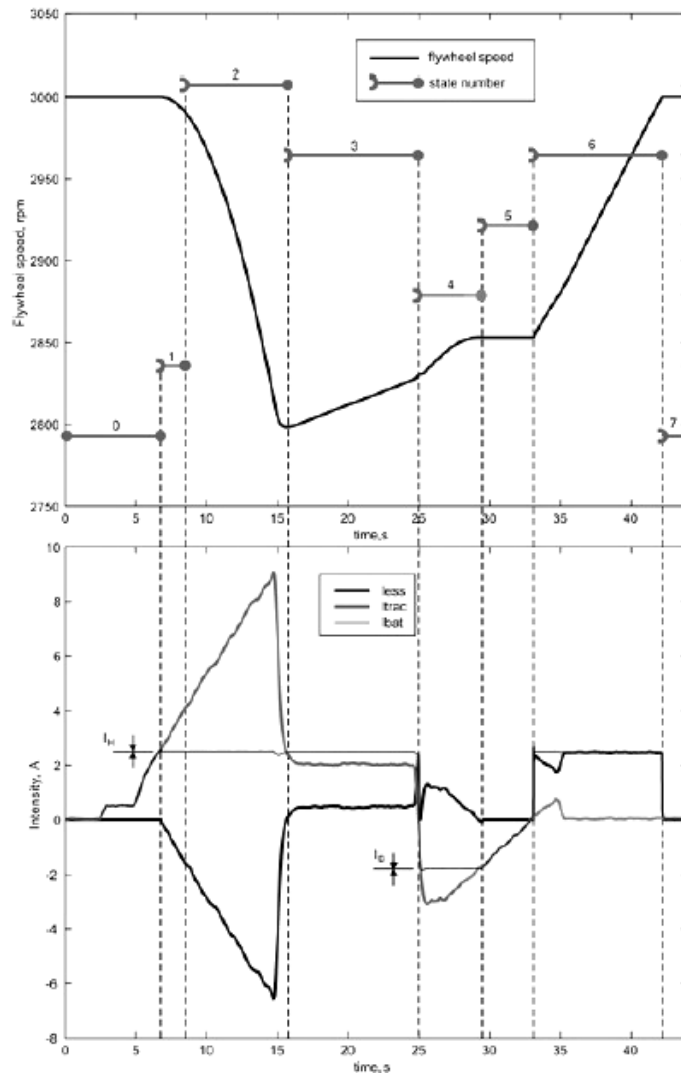


Figura 54- Gráficos da velocidade da *flywheel* e das correntes [70].

Os restantes gráficos dos resultados experimentais de 2 ciclos estão descritos no Anexo B, Figuras B2 e B3. Estes mostram que a energia cinética armazenada na *flywheel* depende do seu valor inicial de velocidade de rotação e que a potência na bateria pode ser dinamicamente limitada nas acelerações e travagens. Este estudo teve em consideração a carga inicial e final da bateria como termo comparativo.

Este estudo valida para uma pequena escala de potências as inúmeras vantagens de utilização de *flywheel* num armazenamento de energia híbrido, de modo a aumentar a vida útil das baterias e permitir uma poupança global de energia no veículo[70].

Capítulo 7- Conclusões

7.1 Principais conclusões

Tem-se assistido na última década a uma crescente preocupação no que diz respeito ao desenvolvimento de veículos elétricos, assim como dos seus constituintes, visto ser um campo em elevada expansão. Como descrito anteriormente, os maiores problemas relativos aos veículos elétricos são sem dúvida o custo e autonomias associados aos sistemas de armazenamento de energia.

Para isso, diversos estudos direcionam-se para o aperfeiçoamento dos sistemas existentes ou até para desenvolvimento de novos sistemas de armazenamento. A hibridização dos sistemas também tem suscitado muito interesse pois colmata as falhas dos dois sistemas e realça as suas vantagens.

Decorrente disto, o estudo desenvolvido na presente dissertação permitiu estudar diversos sistemas de armazenamento de energia assim como algumas das suas aplicações, principalmente aqueles baseados na utilização de *flywheels*. Além disso, possibilitou a modelação de um veículo, contemplando a sua dinâmica, sistema de tração e o sistema de armazenamento e recuperação de energia, tal como todas as principais características de um veículo elétrico em pleno funcionamento.

O trabalho de simulação apresentado, relativo ao veículo elétrico, permitiu simular o modelo computacional desenvolvido, no que se refere às partes e parâmetros que constituem um veículo elétrico, em ambiente *MATLAB/Simulink*. As medições retiradas desta simulação foram determinantes para extrair conclusões acerca das vantagens da utilização de uma *flywheel*, num sistema de armazenamento e recuperação de energia elétrica.

Os resultados de simulação obtidos pela introdução de diversos parâmetros inerentes ao funcionamento e controlo dos motores, de tração e da *flywheel*, foram bastante conclusivos em simulação computacional. No entanto não foi possível a validação experimental em laboratório devido a avaria de alguns constituintes importantes do sistema, assim como após essa avaria não foi possível o desenvolvimento de um controlador mais robusto para concluir o trabalho.

Por conseguinte, foi feita uma investigação bibliográfica de estudos experimentais desenvolvidos com sistemas de *flywheel*. Foram apresentadas as principais conclusões e a respetiva descrição de dois desses estudos, que permitiram garantir que seria possível uma implementação em laboratório, embora em pequena escala, de um sistema semelhante ao modelo apresentado nesta dissertação.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Tendo em conta o trabalho desenvolvido e o crescente interesse no estudo de novos e melhorados sistemas de armazenamento em veículos elétricos, diversos estudos podem ser sugeridos nesta área de investigação, nomeadamente:

- No seguimento deste trabalho, finalizar a validação experimental do modelo apresentado ao longo desta dissertação;
- Aplicar diferentes percursos, como o percurso de condução europeu normalizado, para verificar o funcionamento do sistema;
- Desenvolvimento e implementação de um sistema de controlo mais elaborado no controlo da *flywheel*, para uma melhor conjugação com o armazenamento principal;
- Estudo de novas topologias para sistemas deste tipo.
- Estudo da possibilidade de implementação de um sistema com *flywheels* em veículos híbridos em substituição da bateria convencional para manter o motor a combustão no seu ponto ótimo de funcionamento;
- Estudo de um sistema complementar para produção de energia de modo a não retirar energia da bateria para manter a *flywheel* em rotação.

Referências

- [1] J. Estáquio and D. Alves, "Automóveis: transporte de multidões, desejo individual e ameaça ambiental," *Portal EcoDebate*. [Online]. Available: <http://www.ecodebate.com.br/2012/02/10/automoveis-transporte-de-multidoes-desejo-individual-e-ameaca-ambiental-artigo-de-jose-eustaquio-diniz-alves/>. [Accessed: 01-Mar-2015].
- [2] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*. 2003.
- [3] J. Buarque, "Veículo Elétrico Híbrido e a Geração Distribuída" *Inst. Nac. Efic. Energética- INEE*, p. 3,4, 2002.
- [4] N. Silva, "Smart grids e veículos elétricos - experiências em Portugal," in *Smart grids -Redes Inteligentes*.
- [5] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles- Fundamentals, Theory, and Design*. 2004.
- [6] G. Maggetto and V. Mierlo, "Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey," *Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles*, IEE Seminar, pp. 1-11, 2000.
- [7] E. Schaltz, "Electrical Vehicle Design and Modeling." 2010.
- [8] A. M. Phillips, M. Jankovic, and K. E. Bailey, "Vehicle System Controller Design for a Hybrid Electric," *IEEE-International Conf. Control Appl.*, pp. 0-5, 2000.
- [9] R. Bosch, *Electronic Automotive Handbook*, 1st ed. 2002.
- [10] J. M. Miller, "Power Electronics in Hybrid Electric Vehicle Applications," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC '03. Eighteenth Annual IEEE*, vol. 1, 2003.
- [11] K. L. Butler, M. Ehsani, and P. Kamath, "A Matlab-Based Modeling and Simulation Package for Electric and Hybrid Electric Vehicle Design," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, no. 6, pp. 1770-1778, 1999.
- [12] T. Truett, "Literature Review for the Baseline Knowledge Assessment of the Hydrogen , Fuel Cells , and Infrastructure," *U. S Department os Energy*. 2003.
- [13] C. C. Chan, "The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, 2002.
- [14] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, and N. C. Cheung, "Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles," *Australas. Univ. Power Eng. Conf.*, pp. 1-6, 2008.
- [15] Q. Zhang and X. Liu, "Permanent Magnetic Synchronous Motor and Drives Applied on a Mid-size Hybrid Electric Car," *IEEE Veh. power Propuls. Conf.*, pp. 1-5, 2008.
- [16] A. Emadi, *Energy- Efficient Electric Motors*. 2005.
- [17] J. De Santiago, H. Bernhoff, B. Ekergård, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters, and M. Leijon, "Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles : A Review," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 2, pp. 475-484, 2012.
- [18] N. Hashernnia and B. Asaei, "Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles," *Int. Conf. Electr. Mach.*, no. c, pp. 1-5, 2008.
- [19] T. Finken, M. Felden, and K. Hameyer, "Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles", *Int. Conf. Electr. Mach.*, 2008.
- [20] T. J. E. Miller, *SPEED ' s Electric Motors*. 2002.
- [21] T. M. Jahns and W. L. Soong, "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives-A Review," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, no. 2, 1996.
- [22] T. Fleiter and W. Eichhammer, "Energy efficiency in electric motor systems: Technology, saving potentials and policy options developing countries," *United nations Ind. Dev. Organ.*, 2012.
- [23] S. W. Moore, K. M. Rahman, and M. Ehsani, "Effect on Vehicle Performance of Extending the Constant Power Region of Electric Drive Motors," *Int. Congr. Expo.*, no. 724, 1999.
- [24] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, *Electric Machinery*, 6th ed. 2003.
- [25] J. F. Gieras, *PERMANENT MAGNET MOTOR TECHNOLOGY- Design and applications*, 3rd ed.

- [26] J. Zambada and D. Deb, "Sensorless Field Oriented Control (FOC) of a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)," *Motor & Drive Systems Conference, Digital Signal Controller Division, Microchip Technology Inc.*, 2010.
- [27] K. Minoru, "Application of Permanent Magnet Synchronous Motor to Driving Railway Vehicles," *Railway Technical Research Institute, Newsletter No 1, January 1, 2003.*
- [28] A. El-Refaie, "Motors / Generators for Traction / Propulsion Applications," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, no. march, pp. 90-99, 2013.
- [29] E. V. MIT, "A Guide to Understanding Battery Specifications," no. December, 2008.
- [30] A. Khaligh and Z. Li, "Battery , Ultracapacitor , Fuel Cell , and Hybrid Energy Storage Systems for Electric , Hybrid Electric , Fuel Cell , and Plug-In Hybrid Electric Vehicles : State of the Art," vol. 59, no. 6, pp. 2806-2814, 2010.
- [31] PlanetSEED, "Fontes Alternativas de Energia: Energia de Célula Combustível," *SEED*, 2015. [Online]. Available: <http://www.planetseed.com/pt-br/node/15895>. [Accessed: 27-Apr-2015].
- [32] J. M. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha and M. G. Simões, "An Electrochemical-Based Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 5, pp. 1103-1112, 2004.
- [33] P. Air Liquide, "Pilha de combustível." [Online]. Available: <http://www.airliquide.pt/pt/as-suas-necessidades-sao/o-hidrogenio-como-vector-energetico/pilha-de-combustivel-1.html#.VUPAqCFVjX9>. [Accessed: 10-Apr-2015].
- [34] A. Payman, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar, "Energy control of supercapacitor/fuel cell hybrid power source," *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 6, pp. 1637-1644, Jun. 2008.
- [35] X. Xie and X. Xin Fu, "The Control Strategy of Flywheel Battery for Electric Vehicles," *IEEE-International Conf. Control Autom.*, vol. 00, pp. 492-496, 2007.
- [36] F. Díaz-González, A. Sumper, and O. Gomis-Bellmunt, "Modeling and Validation of a Flywheel Energy Storage Lab-Setup," *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition*, Berlin, 2012.
- [37] J. Hansen and D. O'Kain, "An Assessment of Flywheel High Power Energy Storage Technology for Hybrid Vehicles", *report of National Technical Information Service*, 2011.
- [38] R. Dell, "Energy storage is a key technology for global energy sustainability," *J. Power Sources*, vol. 100, no. 1-2, pp. 2-17, 2001.
- [39] S. Klein, "Flywheel History." [Online]. Available: <http://www.philosophyblog.com.au/the-machines-of-leonardo-da-vinci/>. [Accessed: 30-Jan-2015].
- [40] "Poters Wheel." [Online]. Available: <http://wrightouttanowhere.com/tag/bhaktapur-pottery/>. [Accessed: 30-Jan-2015].
- [41] N. W. Storer, "A consideration of the Inertia of the rotating parts of a train", *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the* (Volume:XIX), 1902.
- [42] A. P. Wood, "Some New Flywheel Storage Systems," *Manchester Local Sect.*, 1907.
- [43] W. N. Motter and L. L. Tatum, "Flywheel load equalizer," *Milwaukee Sect.*, 1911.
- [44] R. Hebner and J. Beno, "Flywheel Batteries Come Around Again " kinetic energy storage will propel application ranging from railroad train to space statios," *IEEE Spectr.*, pp. 46 - 51, 2002.
- [45] P. Studer, "A Practical Magnetic Bearing," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-13, no. 5, pp. 1155-1157, 1977.
- [46] B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, "Flywheel energy and power storage systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 2, pp. 235-258, Feb. 2007.
- [47] T. Hikihara, H. Adachi, F. Moon, and Y. Ueda, "Dynamical Behavior of Flywheel Rotor Suspended By Hysteretic Force of Htsc Magnetic Bearing," *Sond Vib.*, vol. 228, pp. 871-887, 1999.
- [48] A. R. Kiran, G. Anil, and B. Venkatesh, "Simplified power converter for integrated traction energy storage," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1374-1383, 2011.
- [49] R. C. Wagner and D. R. Boyle, "Commercialization of Flywheel Energy Storage Technology on the International Space Station," *Syst. Eng.*, no. 20015, pp. 146-150, 2002.
- [50] Z. Kohari and I. Vajda, "Losses of flywheel energy storages and joint operation with solar cells," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 161, no. 1-2 SPEC. ISS., pp. 62-65, 2005.

- [51] H. Akagi and H. Sato, "Control and performance of a flywheel energy storage system based on a doubly-fed induction generator-motor for power conditioning," *30th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf. Rec. (Cat. No.99CH36321)*, vol. 1, pp. 32-39.
- [52] J. Zhang, Z. Chen, L. Cai, and Y. Zhao, "Flywheel Energy Storage System Design for Distribution Network," vol. 00, no. c, pp. 2619-2623, 2000.
- [53] I. J. Iglesias, L. Garcia-Tabares, a. Agudo, I. Cruz, and L. Arribas, "Design and simulation of a stand-alone wind-diesel generator with a flywheel energy storage system to supply the required active and reactive power," *2000 IEEE 31st Annu. Power Electron. Spec. Conf. Conf. Proc. (Cat. No.00CH37018)*, vol. 3, 2000.
- [54] H. P. Kan, K. T. Chau, and M. Cheng, "Development of Doubly Salient Permanent Magnet Motor Flywheel Energy Storage for Building Integrate Photovoltaic System," 2001.
- [55] D. Naunin, "Electric Vehicle", Handbook, 1996.
- [56] J. Van Mierlo, P. Van den Bossche, and G. Maggetto, "Models of energy sources for EV and HEV: Fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators," *J. Power Sources*, vol. 128, no. 1, pp. 76-89, 2004.
- [57] R. M. Stephan, R. De Andrade Jr., and G. G. Sotelo, "Third Generation of Flywheels: A Promising Substitute to Batteries," *Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 3, pp. 261-265, 2008.
- [58] J. Dixon, "Energy storage for electric vehicles," *2010 IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 20-26, 2010.
- [59] R. J. Hayes, J. P. Kajs, R. C. Thompson, and J. H. Beno, "Design and Testing of a Flywheel Battery for a Transit Bus," *Soc. Automot. Eng.*, 1998.
- [60] S. Shen and F. E. Veldpaus, "Analysis and control of a flywheel hybrid vehicular powertrain," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 12, no. 5, pp. 645-660, 2004.
- [61] H. Liu and J. Jiang, "Flywheel energy storage. An upswing technology for energy sustainability," *Book:Energy and Buildings*, 2007.
- [62] "KERS: Regreso al pasado. - Técnica." [Online]. Available: <http://formula-f.com/fansite/index.php?topic=2331.07>. [Accessed: 02-Sep-2015].
- [63] "KERS (Sistema de Recuperação de Energia Cinética) | Magneti Marelli." [Online]. Available: <http://www.magnetimarelli.com/pt/node/4979>. [Accessed: 02-Sep-2015].
- [64] "Kers Magneti Marelli." [Online]. Available: http://www.magnetimarelli.com/pt/business_areas/motorsport/excel%C3%A4ncias-tecnol%C3%B3gicas/kers. [Accessed: 02-Sep-2015].
- [65] H. D. Young and R. A. Freedman, *University Physics With Modern Physics*, 13^a ed. Pearson, 2012.
- [66] J. O. Estima, "Accionamentos Electromecatrônicos Baseados em Motores Síncronos de Ímanes Permanentes," *Dissertação*, Coimbra, 2007.
- [67] T. D. N. T. D. Nguyen, K. J. T. K. J. Tseng, S. Z. S. Zhang, and H. T. N. H. T. Nguyen, "On the modeling and control of a novel flywheel energy storage system," *Ind. Electron. (ISIE), 2010 IEEE Int. Symp.*, pp. 1395-1401, 2010.
- [68] "Brushless Outrunner Motor." [Online]. Available: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__18184__Turnigy_Aerodrive_SK3_6374_149kv_Brushless_Outrunner_Motor.html. [Accessed: 22-Sep-2015].
- [69] "ESC." [Online]. Available: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__10944__Turnigy_Super_Brain_100A_Brushless_ESC.html. [Accessed: 22-Sep-2015].
- [70] O. Briat, J. M. Vinassa, W. Lajnef, S. Azzopardi, and E. Woïrgard, "Principle, design and experimental validation of a flywheel-battery hybrid source for heavy-duty electric vehicles," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 5, pp. 643-656, 2007.

Anexos

9.1 Anexo A

9.1.1 Imagens de alguns elementos implementados em *Matlab*

A Figura A1 apresenta a implementação em *Matlab* para o cálculo da rotação da roda em rpm, para posterior utilização no cálculo da velocidade do motor em rpm.

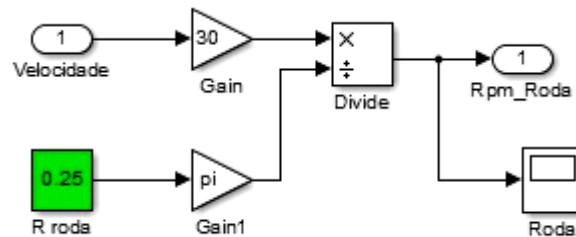


Figura A 1 - Representação da velocidade da roda em rpm no *Matlab*.

A Figura A2 descreve os elementos responsáveis pelo cálculo da rotação do rotor do motor em rpm.

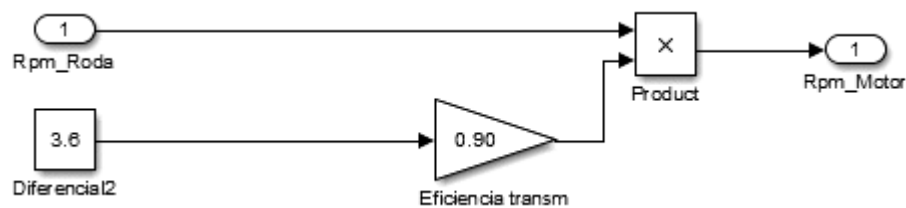


Figura A 2 - Implementação em *Matlab* da velocidade do motor em rpm.

O controlador de velocidade “*speed controller*” do modelo de motor síncrono de ímãs permanentes utilizado está representado na Figura A3.

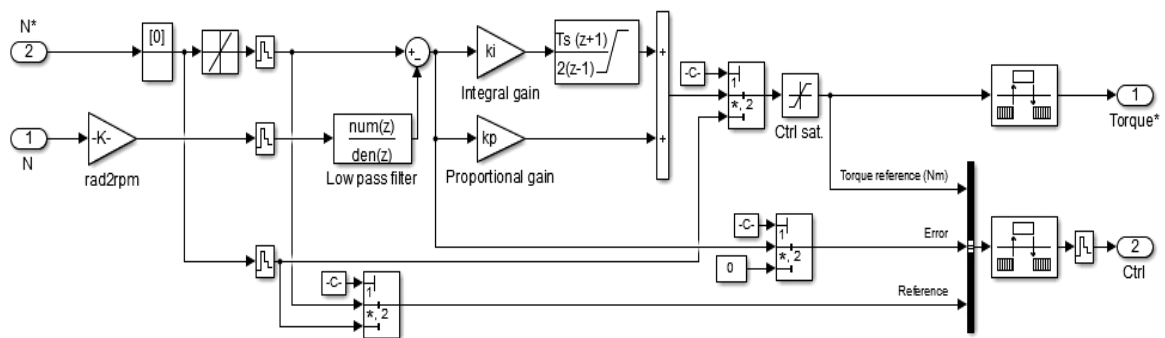


Figura A 3 - Controlador de velocidade do modelo existente no *Matlab*.

Na Figura A4 apresenta-se a estrutura interna do bloco de controlo vetorial do modelo de motor utilizado.

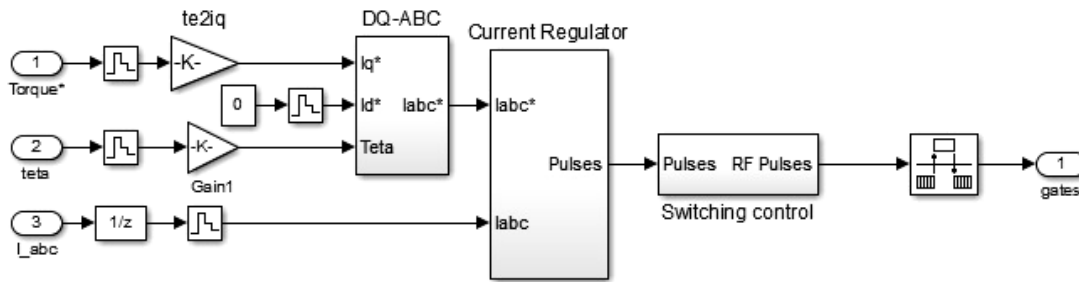


Figura A 4 - Bloco com o controlo vetorial da corrente do modelo já existente no Matlab.

9.1.2 Parâmetros para simulação referentes ao motor de tração

De seguida são apresentados os parâmetros utilizados na simulação, para o acionamento do motor de tração, estes descrevem as principais características do motor simulado. Estes valores foram implementados devido a semelhança com sistemas comercializados.

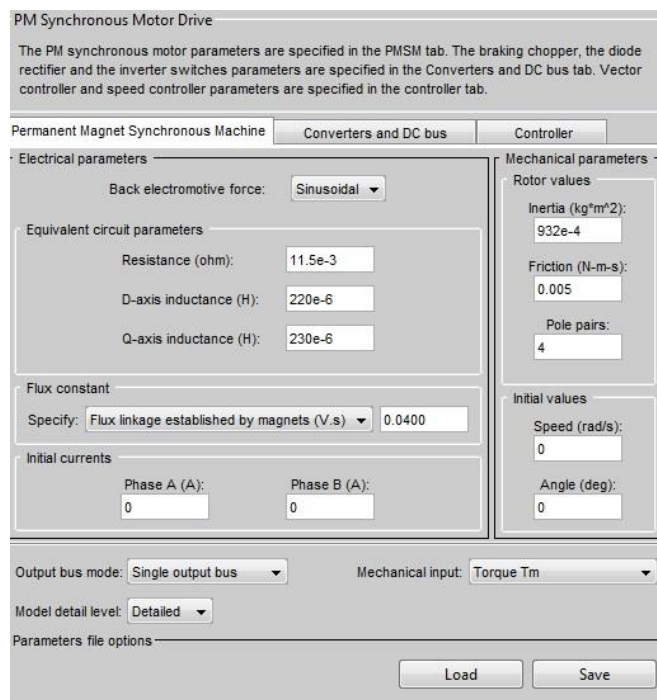


Figura A 5 - Parâmetros do motor de tração introduzidos para simulação.

PM Synchronous Motor Drive

The PM synchronous motor parameters are specified in the PMSM tab. The braking chopper, the diode rectifier and the inverter switches parameters are specified in the Converters and DC bus tab. Vector controller and speed controller parameters are specified in the controller tab.

Permanent Magnet Synchronous Machine Converters and DC bus Controller

Rectifier Snubbers Resistance (ohm): <input type="text" value="undefined"/> Capacitance (F): <input type="text" value="undefined"/> Diodes On-state resistance (ohm): <input type="text" value="undefined"/> Forward voltage (V): <input type="text" value="undefined"/>	DC Bus Capacitance (F): <input type="text" value="undefined"/> Braking chopper Resistance (ohm): <input type="text" value="undefined"/> Chopper frequency (Hz): <input type="text" value="undefined"/> Activation voltage (V): <input type="text" value="undefined"/> Shutdown voltage (V): <input type="text" value="undefined"/>	Inverter Switches Device type: IGBT / Diodes On-state resistance (ohm): <input type="text" value="1e-3"/> Forward voltages (V) Main device: <input type="text" value="0.8"/> Diode: <input type="text" value="0.8"/> Turn-off characteristics Fall time (s): <input type="text" value="1e-6"/> Tail time (s): <input type="text" value="2e-6"/> Snubbers Resistance (ohm): <input type="text" value="5000"/> Capacitance (F): <input type="text" value="inf"/>
---	---	---

Output bus mode: Mechanical input:

Model detail level:

Parameters file options

Figura A 6- Parâmetros do inversor de tensão.

PM Synchronous Motor Drive

The PM synchronous motor parameters are specified in the PMSM tab. The braking chopper, the diode rectifier and the inverter switches parameters are specified in the Converters and DC bus tab. Vector controller and speed controller parameters are specified in the controller tab.

Permanent Magnet Synchronous Machine Converters and DC bus Controller

Regulation type:

Speed controller

Speed ramps (rpm/s) Acceleration: <input type="text" value="50000"/> Deceleration: <input type="text" value="-50000"/>	Speed cutoff frequency (Hz): <input type="text" value="300"/>	Speed controller sampling time (s): <input type="text" value="7*20e-6"/>
PI regulator Proportional gain: <input type="text" value="0.8"/> Integral gain: <input type="text" value="3.0"/>	Torque output limits (N-m) Negative: <input type="text" value="-500"/> Positive: <input type="text" value="500"/>	

Vector control

Sampling time (s): <input type="text" value="20e-6"/>	Current controller hysteresis band (A): <input type="text" value="0.1"/>	Maximum switching frequency (Hz): <input type="text" value="20e3"/>
---	--	---

Output bus mode: Mechanical input:

Model detail level:

Parameters file options

Figura A 7- Parâmetros do controlador do motor de tração.

9.1.3 Parâmetros introduzidos para simulação referentes à *Flywheel*

PM Synchronous Motor Drive

The PM synchronous motor parameters are specified in the PMSM tab. The braking chopper, the diode rectifier and the inverter switches parameters are specified in the Converters and DC bus tab. Vector controller and speed controller parameters are specified in the controller tab.

Permanent Magnet Synchronous Machine Converters and DC bus Controller

Electrical parameters

Back electromotive force: Sinusoidal

Equivalent circuit parameters

Resistance (ohm): 5.5e-3

D-axis inductance (H): 150e-6

Q-axis inductance (H): 160e-6

Flux constant

Specify: Flux linkage established by magnets (V.s) 0.0400

Initial currents

Phase A (A): 0 Phase B (A): 0

Mechanical parameters

Rotor values

Inertia (kg*m²): 0.24

Friction (N-m-s): 0.00001

Pole pairs: 1

Initial values

Speed (rad/s): 0

Angle (deg): 0

Output bus mode: Single output bus Mechanical input: Torque Tm

Model detail level: Detailed

Parameters file options

Figura A 8- Parâmetros introduzidos para simulação da *flywheel*.

PM Synchronous Motor Drive

The PM synchronous motor parameters are specified in the PMSM tab. The braking chopper, the diode rectifier and the inverter switches parameters are specified in the Converters and DC bus tab. Vector controller and speed controller parameters are specified in the controller tab.

Permanent Magnet Synchronous Machine Converters and DC bus Controller

Rectifier

Snubbers

Resistance (ohm): undefined

Capacitance (F): undefined

Diodes

On-state resistance (ohm): undefined

Forward voltage (V): undefined

DC Bus

Capacitance (F): undefined

Braking chopper

Resistance (ohm): undefined

Chopper frequency (Hz): undefined

Activation voltage (V): undefined

Shutdown voltage (V): undefined

Inverter

Switches

Device type: IGBT / Diodes

On-state resistance (ohm): 1e-3

Forward voltages (V)

Main device: 0.8

Diode: 0.8

Turn-off characteristics

Fall time (s): 1e-6

Tail time (s): 2e-6

Snubbers

Resistance (ohm): 5000

Capacitance (F): inf

Output bus mode: Single output bus Mechanical input: Torque Tm

Model detail level: Detailed

Parameters file options

Figura A 9- Parâmetros do conversor para a simulação da *flywheel*.

PM Synchronous Motor Drive

The PM synchronous motor parameters are specified in the PMSM tab. The braking chopper, the diode rectifier and the inverter switches parameters are specified in the Converters and DC bus tab. Vector controller and speed controller parameters are specified in the controller tab.

Permanent Magnet Synchronous Machine Converters and DC bus Controller

Regulation type: Schematic

Speed controller

Speed ramps (rpm/s)

Acceleration: Deceleration:

Speed cutoff frequency (Hz): Speed controller sampling time (s):

PI regulator

Proportional gain: Integral gain:

Torque output limits (N-m)

Negative: Positive:

Vector control

Sampling time (s): Current controller hysteresis band (A): Maximum switching frequency (Hz):

Output bus mode: Mechanical input:

Model detail level:

Parameters file options

Figura A 10- parâmetros introduzidos para o controlador da *flywheel*.

9.1.4 Equações para os cálculos das velocidades e tempos do percurso

Para o cálculo dos tempos e das acelerações no percurso escolhido para a simulação, utilizaram-se as seguintes equações:

- A equação da aceleração que divide a diferença entre a velocidade final e inicial pelo tempo, resolvida em ordem ao tempo.

$$a = \frac{V_f - V_0}{t} \Leftrightarrow t = \frac{V_f - V_0}{a} \quad (29)$$

- A equação da posição. Tendo em consideração a posição inicial e final do veículo no percurso.

$$x_f = x_0 + V_0 t + 0.5at^2 \quad (30)$$

Substituindo a equação 29 na equação 30 tem-se:

$$x_f = x_0 + V_0 \frac{V_f - V_0}{a} + 0.5a \left(\frac{V_f - V_0}{a} \right)^2 \quad (31)$$

Desenvolvendo esta equação e resolvendo-a em ordem à aceleração tem-se:

$$\begin{aligned}
x_f - x_0 &= \frac{V_0 V_f - V_0^2}{a} + 0.5a \frac{(V_f - V_0)^2}{a^2} \\
x_f - x_0 &= \frac{V_0 V_f - V_0^2}{a} + 0.5a \frac{V_f^2 - 2V_f V_0 + V_0^2}{a^2} \\
x_f - x_0 &= \frac{V_0 V_f - V_0^2}{a} + \frac{0.5a V_f^2 - 0.5a 2V_f V_0 + 0.5a V_0^2}{a^2} \\
x_f - x_0 &= \frac{V_0 V_f - V_0^2}{a} + \frac{0.5V_f^2 - V_f V_0 + 0.5V_0^2}{a} \\
x_f - x_0 &= \frac{V_0 V_f - V_0^2 + 0.5V_f^2 - V_f V_0 + 0.5V_0^2}{a} \\
x_f - x_0 &= \frac{0.5V_f^2 - 0.5V_0^2}{a} \\
a &= \frac{0.5V_f^2 - 0.5V_0^2}{x_f - x_0} \quad (32)
\end{aligned}$$

Os valores apresentados na Tabela 4 foram determinados a partir da equação 29 e 32, para o cálculo dos tempos e das acelerações, respetivamente.

9.2 Anexo B

9.2.1 Resultados de alguns estudos desenvolvidos

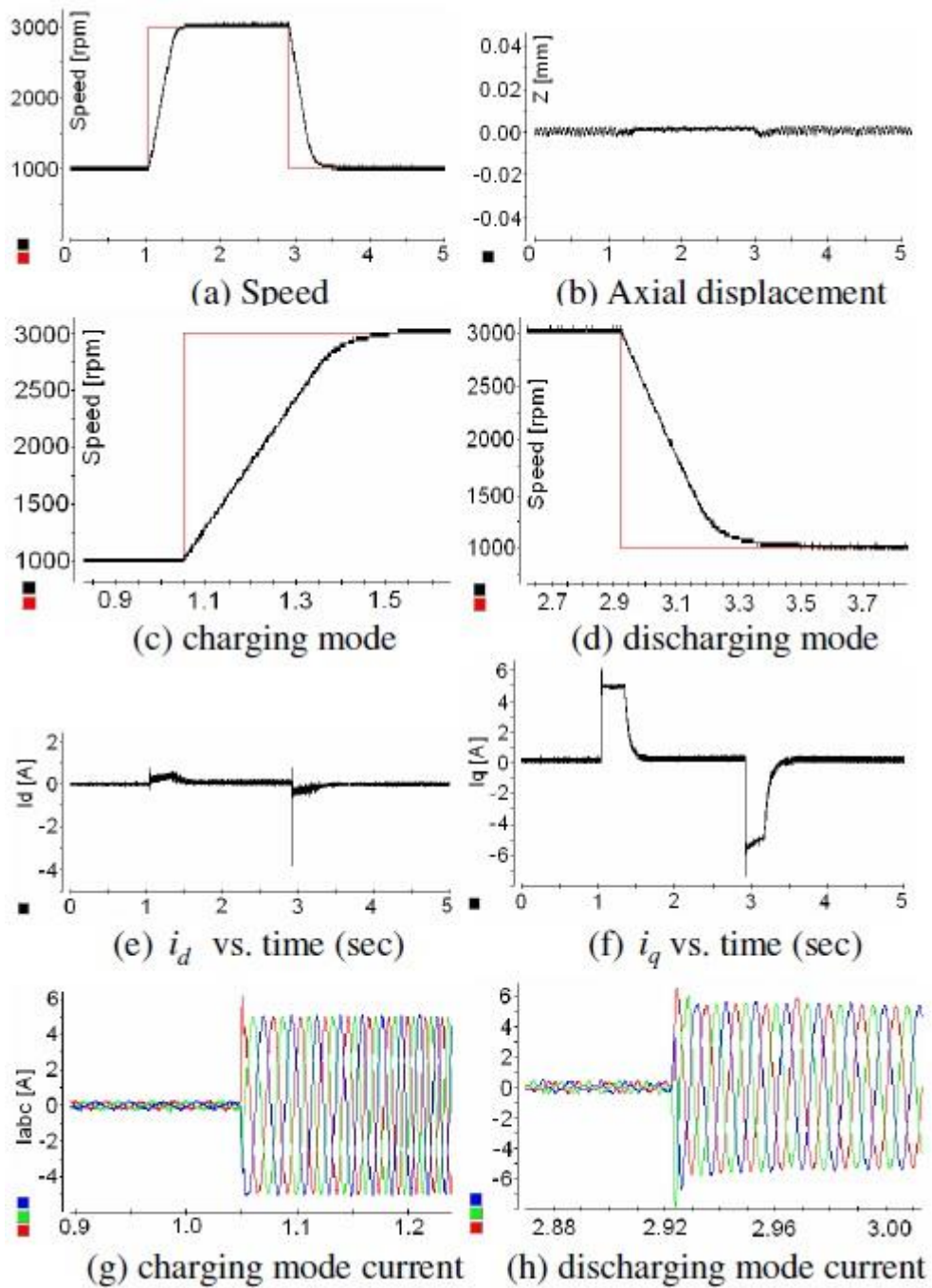


Figura B 1- Resultados experimentais do estudo se um sistema de flyweel.

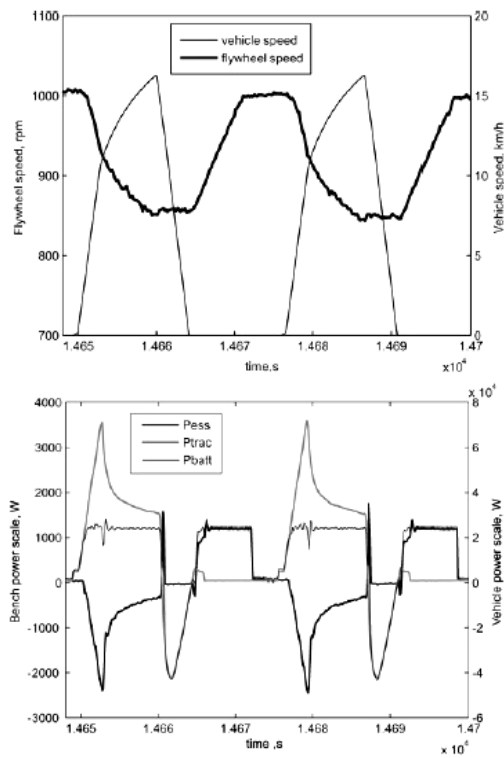


Figura B 2- Resultado experimental do sistema com a regeneração de energia total na travagem para a bateria.

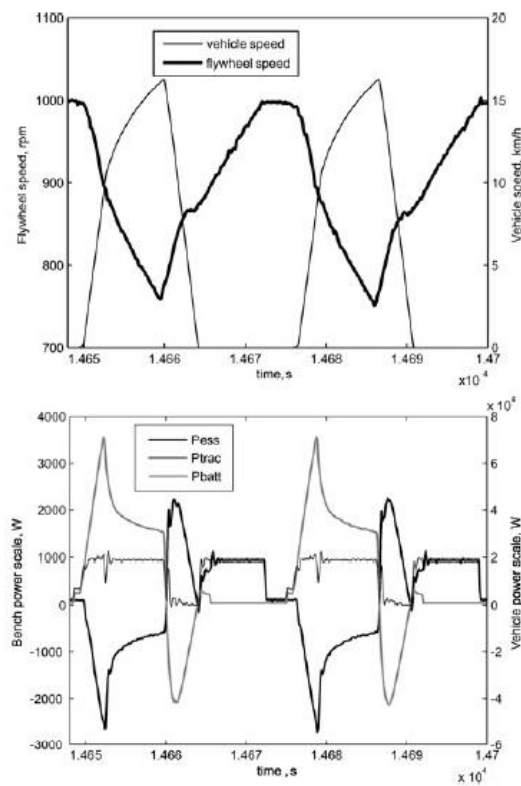


Figura B 3- Resultado experimental do sistema com a regeneração de energia total na travagem para a flywheel.