

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**FEUP**

**Sistema de tracção de um  
Veículo Eléctrico de Competição**

**Tiago Manuel Silva Ramos**

**DISSERTAÇÃO (PROVISÓRIA)**

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Automação

Orientador: Prof. Dr. Armando Luís Sousa Araújo

Porto, 27 de Junho de 2011



# Resumo

Associado aos recentes desenvolvimentos tecnológicos, bem como à consciência ambiental da Engenharia, surge o trabalho apresentado nesta dissertação. Tal propõe-se efectuar o projecto, simulação e teste do “*powertrain*” de um veículo eléctrico de competição ([VEC](#)) com a motivação adicional de o mesmo vir a participar na competição [Challenge Desafio Único](#).

Assim, na prossecução destes objectivos usou-se um FIAT UNO 45S como plataforma de trabalho uma vez que é este um dos veículos do referido troféu. Tal escolha, para além de permitir uma comparação, ao nível do desempenho, com os veículos de motorização com motor de combustão interna, permite simplificar o projecto mecânico já que este se encontra bem desenvolvido ao nível da dinâmica desta competição.

A dissertação inicia com a apresentação das soluções existentes no mercado, de modo a sustentar a escolha da topologia, dos componentes a adquirir (motor e controlador) e de todos os pressupostos para um trabalho desta índole.

Paralelamente ao estudo, realizou-se a modelação de ambos os sistemas, tanto do protótipo eléctrico como do veículo de combustão recorrendo a ferramentas de simulação Simulink/Matlab, de modo a obter resultados que permitissem comparar o desempenho de ambos.

O sistema de tracção eléctrica, do qual fazem parte o conversor electrónico de potência, a máquina eléctrica e o controlador, foi simulado de acordo com as necessidades do veículo, sendo o resultado comparado com o sistema de tracção utilizado no FIAT UNO do [Challenge Desafio Único](#).

Na vertente prática deste projecto, realizaram-se vários ensaios à máquina eléctrica, e respectivo controlador, de modo a validar o seu funcionamento. Efectuada a validação do sistema de tracção passou-se à concepção do VEC. Assim, foi adquirido um veículo convencional, com motor de combustão, e efectuou-se a sua transformação mecânica. Posteriormente desenvolveram-se os sistemas necessários ao acoplamento e suporte de forma a fixar a máquina eléctrica e conversor ao veículo. Com o veículo a circular realizaram-se ensaios que permitiram concluir da velocidade máxima atingida, da autonomia e fiabilidade

do VEC. Desta forma, os objectivos deste projecto foram atingidos com sucesso tendo sido criada uma excelente plataforma de trabalho que, com certeza, irá ser objecto de inovação e melhorias de forma a termos na FEUP, entre 2013 e 2014, um veículo para participar num troféu de veículos totalmente eléctricos.

**Palavras-chave:** Veículo eléctrico, Veículo de Combustão Interna, Motores de tracção, Controladores de motores de tracção, Baterias de Tracção.

# Abstract

Framed by the recent technological developments, as well as environmental issues, this thesis intends to present the project and development of an electrical competition vehicle (VEC) powertrain that be able to compete in the Challenge Desafio Único.

We chose a FIAT UNO 45S as a working platform. This car is already used in this competition, so enabling a comparison between the performances of the two solutions. Also the mechanical design will be simplified because of the good knowledge of the vehicle derived of its use in this competition.

Initially we present solutions already on the market in order to enable the choice of topology, components to buy (motor and controller) and all the conditions for a work of this kind.

Parallel to this study, a modeling and simulation of the electric vehicle prototype powertrain, as well as the combustion engine, are done. This uses the simulation tools, Simulink/Matlab. Obtained results are then used to compare the performance of both.

The electric drive system, which includes the converter power electronics, the electric machine and the controller, was simulated and scaled according to the needs of the vehicle and results compared with the drive system used in the conventional FIAT UNO of Challenge Desafio Único.

Practical aspect of this project deals with several tests made on the electric machine and its driver in order to validate its operation. After validating the proper functionality of the traction systems a vehicle was acquired. It was mechanically repaired and, subsequently, various mechanical and support systems were developed in order to attach the electrical machine and converter into the vehicle.

Finally with the vehicle running, it was possible to perform tests in order to obtain the maximum speed, autonomy and reliability of the vehicle. Thus, the main objective of this project was successfully accomplished by creating an excellent platform for work that can be innovated and improved in order to have, between 2013 and 2014, in FEUP, a vehicle to race in a challenge with only electric vehicles.

**Keywords:** electric vehicle, internal combustion vehicles, traction motors, controllers motors drive, traction batteries.

# Agradecimentos

Ao meu orientador, o Professor Doutor Armando Luís Sousa Araújo, pela amizade, pelo empenho, pela confiança depositada, pelos níveis de exigência, assim como pela ajuda e dedicação ao longo da realização da dissertação.

Ao Professor Doutor José Manuel Ferreira Duarte, pelos conselhos e conhecimentos transmitidos relativamente à mecânica e dinâmica do Fiat Uno 45 S, bem como a ajuda imprescindível no projecto e concepção dos suportes e acoplamentos mecânicos.

Ao Professor Doutor Adriano Carvalho pela dinamização do projecto, pelo empenho demonstrado na realização deste projecto.

Ao Professores Doutores Carlos Araújo Sá e ao Engenheiro Pinheiro Jorge pela ajuda prestada nos ensaios da máquina eléctrica.

Ao Desafio Único por me ter acolhido e recebido sempre de braços abertos, dispondo de veículos para a realização de testes.

Aos meus colegas de projecto, destacando o João Queirós, o Rui Santos e o Tiago Rocha pela companhia, pelos conselhos, pelas ajudas, pelas risadas, pelas conversas, pela humildade e acima de tudo pela amizade.

À minha família, que me têm apoiado incondicionalmente, pela confiança depositada, pelo orgulho, pelas frases amigas, pelos conselhos, pelos sorrisos e abraços.

Aos patrocinadores deste projecto, destacando a FEUP, o Desafio Único, o DEEC - Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores, o DEmec - Departamento de Engenharia Mecânica, o MIT Portugal, a Efacec, a PaintDrive e a A2 Publicidade.

O meu muito obrigado a todos que contribuíram com algo para esta Dissertação.

Muito Obrigado!



# Índice

Resumo .....	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos .....	VII
Índice.....	ix
Lista de figuras .....	xiii
Lista de tabelas .....	xix
Abreviaturas e Símbolos .....	xxi
Capítulo 1 .....	1
Introdução.....	1
1.1 - Apresentação do Projecto VEC - Veículo Eléctrico de Competição .....	2
1.2 - Importância dos Veículos Eléctricos .....	4
1.3 - Veículos Eléctricos de Competição: Benefícios e Desafios .....	5
1.4 - Motivação e Objectivos .....	6
1.5 - Estrutura da dissertação.....	7
Capítulo 2 .....	9
Estado de Arte.....	9
2.1 - O Veículo Automóvel Eléctrico - Perspectiva Histórica .....	9
2.2 - Veículos Eléctricos a Baterias (BEV) .....	14
2.2.1 - Constituição.....	14
2.2.2 - Topologias.....	15
2.3 - Sistema de Propulsão de Veículos Eléctricos .....	17
2.3.1 - Motores Eléctricos .....	20
2.3.1.1 - Motor de Corrente Contínua CC .....	20
2.3.1.2 - Motor de Indução CA .....	22
2.3.1.3 - Motor de Síncronos de Ímanes Permanentes .....	24
2.3.1.4 - Motor de Relutância Comutado.....	26
2.3.2 - Conversores de Potência.....	27
2.3.3 - Estratégias de Controlo .....	30
2.3.3.1 - Controlo directo por orientação de campo.....	31
2.3.3.2 - Controlo indirecto por orientação de campo .....	32
2.3.3.3 - Space Vector Modulation .....	36
2.3.3.4 - Controlo por orientação de campo com base em sensores de Hall .....	38
2.3.4 - Comparação dos Sistemas de Propulsão .....	39

2.4 - Sistemas de Armazenamento de Energia .....	41
2.4.1 - Baterias .....	42
2.4.2 - Supercondensadores .....	44
2.4.3 - Pilhas de Combustível (Full-Cell) .....	44
2.5 - Conclusão .....	45
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>47</b>
Motores Síncronos de Ímanes Permanentes.....	47
3.1 - Constituição .....	48
3.1.1 - Materiais dos ímanes permanentes.....	51
3.2 - Modelo dinâmico do PMSM .....	52
3.2.1 - Transformação Trifásico-Bifásica: Transformada de Clark.....	52
3.2.2 - Transformação de Rotação: Transformada de Park .....	56
3.3 - Conclusão .....	61
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>63</b>
Space Vector Modulation.....	63
4.1 - Princípio de funcionamento .....	63
4.2 - Plataformas de desenvolvimento e implementação de controladores de máquinas eléctricas .....	67
4.2.1 - Microcontroladores .....	67
4.3 - Conclusões.....	69
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>71</b>
FIAT UNO 45S - Desafio Único .....	71
5.1 - História do Desafio Único .....	71
5.2 - FIAT UNO 45S.....	72
5.3 - Sistema de Propulsão .....	73
5.3.1 - Motor .....	73
5.3.2 - Caixa de Velocidades .....	74
5.3.3 - Relação nas Rodas.....	75
5.3.4 - Pneus e Jantes .....	75
5.4 - Modelo Dinâmico do Veículo.....	76
5.4.1 - Força de Atrito de Rolamento.....	76
5.4.2 - Força de atrito Aerodinâmica .....	77
5.4.3 - Força de subida de planos inclinados .....	77
5.4.4 - Força de aceleração .....	77
5.4.5 - Força total de tracção.....	78
5.5 - Desempenho do Veículo.....	78
5.5.1 - Resultados por Prova.....	78
5.6 - Conclusões.....	79
<b>Capítulo 6.....</b>	<b>81</b>
Simulação do PowerTrain .....	81
6.1 - Veículo a Combustão.....	81
6.1.1 - Motor a Gasolina.....	81
6.1.2 - Selector de Velocidades.....	82
6.1.3 - Dinâmica do Veículo .....	82
6.1.4 - Veículo Completo a Combustão .....	83
6.2 - Veículo Eléctrico .....	85
6.2.1 - Motor Eléctrico.....	85
6.2.2 - Controlo do PMSM .....	86
6.2.3 - Veículo Completo com Motor Eléctrico.....	88
6.3 - Conclusões obtidas nas simulações.....	91
<b>Capítulo 7.....</b>	<b>93</b>
Hardware e Software utilizado.....	93

7.1 - Máquina Eléctrica PMS 150W.....	94
7.1.1 - Encoder .....	96
7.1.2 - Sensor de Temperatura .....	97
7.1.3 - Sistema de Refrigeração.....	98
7.2 - Controlador .....	99
7.2.1 - Interface CAN (USB-para-CAN) .....	102
7.2.2 - Dissipador de Calor .....	102
7.2.3 - Software e plataforma de interface do controlador.....	103
7.3 - Conclusões .....	105
<b>Capítulo 8.....</b>	<b>107</b>
Implementação e Resultados Experimentais.....	107
8.1 - Ensaio ao PMS 150W .....	107
8.1.1 - Banca de Ensaio .....	107
8.1.2 - Ensaio do PMS 150W como Gerador .....	110
8.1.2.1 - Ensaio em vazio .....	111
8.1.2.2 - Ensaio em carga.....	111
8.1.3 - Ensaio do PMS 150W como Motor .....	114
8.1.3.1 - Ensaio em vazio .....	116
8.1.3.2 - Ensaio com carga .....	117
8.2 - Veículo Eléctrico de Competição .....	119
8.2.1 - Preparação do Veículo .....	120
8.2.1.1 - Suporte de fixação do PMS 150W ao veículo .....	120
8.2.1.2 - Suporte de fixação do controlador no veículo .....	121
8.2.1.3 - Acoplamento do PMS 150W.....	121
8.2.1.4 - Distribuição de peso do Veículo .....	122
8.2.2 - Ensaio ao Veículo Eléctrico .....	122
8.2.2.1 - Com as rodas levantadas .....	123
8.2.2.2 - Em estrada .....	123
8.2.3 - Testes finais conduzindo o VEC.....	123
8.3 - Conclusões .....	124
<b>Capítulo 9.....</b>	<b>125</b>
Conclusões e Futuros Desenvolvimentos.....	125
9.1 - Conclusões Finais .....	125
9.2 - Futuros Desenvolvimentos.....	126
<b>Referências .....</b>	<b>i</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>v</b>
Anexo A - Transformações de Coordenadas.....	v
A.1 Transformações de Clark.....	v
A.2 Transformada de Park .....	ix
Anexo B - Análise de mercado das máquinas eléctricas bem como do respectivo controlador .....	xi
B.1 Máquinas Eléctricas .....	xi
B.2 Controladores/Inversores .....	xii
Anexo C - Estudo sobre a caixa de velocidades .....	xv
Anexo D - Manual do controlador GEN4-80.....	xix
Anexo E - Distribuição dos vários sistemas no veículo.....	xxi



# Lista de figuras

Figura 1.1- Diagrama do Projecto do Veículo Eléctrico de Competição .....	3
Figura 1.2 - Diagrama da Sub-Equipa - Conversão do Veículo .....	3
Figura 1.3 - Diagrama de blocos do Sistema de Conversão .....	4
Figura 1.4 - Problemáticas Ambientais.....	6
Figura 2.1 - Carro vencedor da primeira Competição de Veículos Eléctricos[8] .....	10
Figura 2.2 - VE que em 1899, estabeleceu o recorde de velocidade [9] .....	10
Figura 2.3 - Veículo de Competição Eléctrico de DRAG RACE (Arranques) [11] .....	13
Figura 2.4 - Veículo de Competição Eléctrico da Formula Student [12] .....	13
Figura 2.5 - Veículo de Competição Eléctrico da EVCUP- 3 categorias [13].....	13
Figura 2.6 - Veículo de Competição Eléctrico preparado para Provas de Montanha [14] .....	14
Figura 2.7 - Topologia básica do BEV [2] .....	14
Figura 2.8 - Esquema de constituição de um BEV [2].....	15
Figura 2.9 - Topologias de BEV [2] .....	16
Figura 2.10 - Diagrama de bloco de um sistema eléctrico de propulsão [2] .....	18
Figura 2.11 - Os dois grupos de tipos de motor a considerar para veículos eléctricos [2] .....	18
Figura 2.12 - Constituição do motor de corrente contínua[19].....	21
Figura 2.13 - Curvas características do motor DC [20] .....	22
Figura 2.14 - Diagrama vectorial do motor de indução [21] .....	22
Figura 2.15 - Características do Motor de Indução [20] .....	23
Figura 2.16 - Característica binário-velocidade do motor PMSM [20] .....	25
Figura 2.17 - Característica binário-velocidade do motor síncrono de ímanes permanentes com controlo do ângulo de condução [20].....	25

Figura 2.18 - Motor de relutância comutado, com 8 pólos no estator e 6 pólos no rotor [24] .....	26
Figura 2.19 - Característica binário-velocidade do motor de relutância comutado [25] .....	27
Figura 2.20 - Conversor de potência em Ponte completa .....	28
Figura 2.21 - Característica Binário-Velocidade do conversor de potência em ponte completa .....	28
Figura 2.22 - Conversor de potência em ponte trifásica - inversor.....	29
Figura 2.23 - Comando dos Transístor do inversor trifásico em ponte.....	29
Figura 2.24 - Diagrama de blocos do controlo directo por orientação de campo [3].....	32
Figura 2.25 - Referencial do fluxo rotórico [3].....	33
Figura 2.26 - Diagrama de blocos do controlo indirecto por orientação de campo [3] .....	33
Figura 2.27 - Diagrama fasorial com $\delta=90^\circ$ [27].....	35
Figura 2.28 - Diagrama de blocos do controlo vectorial com encoder [27] .....	36
Figura 2.29 - Esquema do inversor trifásico .....	37
Figura 2.30 - Representação vectorial de um inversor de três braços[27] .....	38
Figura 2.31 - Diagrama de blocos do Controlo por orientação de campo com base em sensores de Hall.....	39
Figura 2.32 - Característica Binário-Velocidade comparativa dos vários tipos de motores ....	41
Figura 2.33 - Características dos distintos sistemas de armazenamento de energia .....	42
Figura 2.34 - Características de várias tecnologias de baterias [30].....	43
Figura 3.1 - Configurações da máquina PMSM de fluxo axial [31] .....	48
Figura 3.2 - PERM MOTOR PMS 150W - Constituição e Construção[32].....	49
Figura 3.3 - Rotor de um PMSM de fluxo axial (esquerda) e um dos ímanes permanentes (direita) [31].....	49
Figura 3.4 - Estator de um PMSM de fluxo axial antes (esquerda) e depois de bobinar (direita) [31].....	49
Figura 3.5 - Configurações da máquina PMSM de fluxo radial [31] .....	50
Figura 3.6 - Distribuição dos ímanes permanentes no rotor [31] .....	51
Figura 3.7 - Densidade de fluxo de magnetização versus campo dos ímanes permanentes [33].....	52
Figura 3.8 - Modelo trifásico do PMSM.....	53
Figura 3.9 - Sistemas de coordenadas do PMSM[35].....	57
Figura 3.10 - Diagrama de blocos do modelo em coordenadas dq do PMSM [34] .....	60

Figura 4.1 - Decomposição do vector referência de tensão [37].	64
Figura 4.2 - Exemplo de sinais de comando aplicados ao inversor [37]	66
Figura 5.1 - Fiat Uno 45 S - Categoria FEUP 1 do Desafio Único	72
Figura 5.2 - Motor 999 cm <sup>3</sup> do Fiat Uno 45 S	73
Figura 5.3 - Curva da potência e binário do motor (Manual Fiat)	74
Figura 5.4 - Caixa de Velocidades	74
Figura 5.5 - Diagrama de forças aplicadas ao veículo	76
Figura 6.1 - Bloco Simulink do motor a gasolina	82
Figura 6.2 - Selector Caixa de Velocidades	82
Figura 6.3 - Diagrama de Blocos representativo da dinâmica do Fiat Uno	83
Figura 6.4 - Simulação em Simulink do Fiat Uno 45S a Combustão	83
Figura 6.5 - Pontos de travagem Circuito Vasco Sameiro	84
Figura 6.6 - Gráfico representativo do pedal do acelerador durante uma volta ao Circuito Vasco Sameiro	84
Figura 6.7 - Gráfico do binário do motor e velocidade do veículo	85
Figura 6.8 - Modelo do Motor Síncrono de Ímanes Permanentes do Simulink	85
Figura 6.9 - Parâmetros característicos da Máquina Síncrona de Ímanes Permanentes	86
Figura 6.10 - Diagrama de Blocos do controlo vectorial e controlo de velocidade de um PMSM	87
Figura 6.11 - Diagrama de bloco do controlador de velocidade	87
Figura 6.12 - Diagrama de bloco do controlador vectorial	88
Figura 6.13 - Simulação em Simulink do Fiat Uno com sistema de propulsão eléctrica	88
Figura 6.14 - Veículo eléctrico: Acelerador, Velocidade do veículo e binário no veículo	89
Figura 6.15 - Corrente no barramento DC	90
Figura 6.16 - Valores referentes ao motor e controlador durante a simulação	90
Figura 7.1 - Máquina Síncrona de Ímanes Permanentes - PMS 150W	94
Figura 7.2 - Curva característica do rendimento versos rpm do motor PMS 150W	95
Figura 7.3 - Curva característica da percentagem de binário nominal por percentagem de -velocidade do motor PMS 150W	96
Figura 7.4 - Encoder - AM256 com íman	97
Figura 7.5 - Sinais de saída apresentados pelo encoder	97

Figura 7.6 - Sensor de temperatura, HTY84/130 .....	97
Figura 7.7 - Radiador/Permutador de calor, e respectivo ventilador.....	98
Figura 7.8 - Bomba eléctrica de recirculação de água .....	98
Figura 7.9 - Controlador GEN4-80 - SEVCON.....	99
Figura 7.10 - Corrente permitida versus Base de temperatura do controlador .....	101
Figura 7.11 - Modulo Interface CAN (USB-para-CAN).....	102
Figura 7.12 - Página Inicial do Software - comunicação do computador com o controlador .	103
Figura 7.13 - Configurações do controlador .....	104
Figura 7.14 - Janela interface do veículo .....	105
Figura 7.15 - Janela de monitorização em tempo real .....	105
Figura 8.1 - Suporte do motor para a banca de testes .....	108
Figura 8.2 - Banca de ensaio da máquina síncrona de ímanes permanentes PMS 150 W nos ensaios como gerador .....	108
Figura 8.3 - Controlador Emerson, responsável pelo controlo da máquina de indução da Siemens.....	108
Figura 8.4 - Transdutor de binário e respectiva interface .....	109
Figura 8.5 - Banca de ensaio da máquina síncrona de ímanes permanentes PMS 150 W nos ensaios como motor .....	109
Figura 8.6 - Cargas Resistivas de 4kW a 230V .....	112
Figura 8.7 - Autotransformador trifásico da Siemens .....	112
Figura 8.8 - Diagrama de blocos exemplificativo da montagem dos sistemas a utilizar nos ensaios da máquina síncrona de ímanes permanentes como motor .....	115
Figura 8.9 - Esquema de ligações do controlador SEVCON GEN4-80.....	115
Figura 8.10 - Placa de comando do controlador .....	116
Figura 8.11 - Banca de ensaios da máquina eléctrica como motor.....	116
Figura 8.12 - Esquema da banca de ensaios de motores .....	118
Figura 8.13 - Preparação do veículo - Antes.....	120
Figura 8.14 - Preparação do veículo - Depois .....	120
Figura 8.15 - Suporte de fixação e acoplamento do PMS 150 W à caixa de velocidade e ao veículo .....	121
Figura 8.16 - Suporte de fixação do controlador no veículo .....	121
Figura 8.17 - Acoplamento do PMS 150W à caixa de velocidades.....	122

Figura 8.18 - Distribuição de peso do VEC.....	122
Figura 8.19 - Percurso realizado durante os ensaios ao veículo.....	123



## Lista de tabelas

Tabela 1-1 - Organização da Dissertação .....	7
Tabela 2-1 - Características de Veículos Eléctricos [2] .....	12
Tabela 2-2 - Características do conversor de potência em ponte completa .....	28
Tabela 2-3 - SSVs e tensões de fases [26] .....	37
Tabela 2-4 - Comparação dos sistemas de propulsão [28].....	40
Tabela 4-1 - Definição de $t_1$ e $t_2$ para cada sector [38] .....	65
Tabela 4-2 - Atribuição dos <i>duty-cycles</i> para cada braço do inversor de acordo com o sector [38].....	66
Tabela 5-1 - Folha de características do Fiat Uno 45 S .....	72
Tabela 5-2 - Relação de Carretos da caixa de velocidades.....	75
Tabela 5-3 - Relação de multiplicação do diferencial.....	75
Tabela 5-4 - Relação de desmultiplicação nas rodas .....	75
Tabela 5-5 - Referências das medidas dos pneus e da marca das jantes .....	76
Tabela 5-6 - Parâmetros do Fiat Uno 45 S inerentes ao calculo da força de atrito aerodinâmica.....	77
Tabela 5-7 - Época 2010 Desafio Único - Categoria FEUP1 - TEMPOS.....	78
Tabela 7-1 - Folha de características do motor eléctrico PMS 150 W .....	95
Tabela 7-2 - Características da Bomba de água eléctrica .....	98
Tabela 7-3 - Folha de características do controlador SEVCON GEN4-80 .....	99
Tabela 7-4 - Temperatura de operação do controlador GEN4-80 .....	102
Tabela 8-1 - Resultados da máquina como gerador em vazio.....	111
Tabela 8-2 - Resultados dos ensaios da máquina como gerador com uma carga de 24,4 $\Omega$ . ..	113

Tabela 8-3 - Resultados dos ensaios da máquina como gerador com duas cargas em paralelo de $12,2 \Omega$ .....	114
Tabela 8-4 - Resultados dos ensaios da máquina como motor em vazio .....	117
Tabela 8-5 - Resultados dos ensaios da máquina como motor com carga variada .....	119

# Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

BEV	Battery Electric Vehicle (Veículo eléctrico a baterias)
BJT	Bipolar-Junction Transistor
CA	Corrente Alternada
CAD	Computer aided design (Desenho assistido por computador)
CC	Corrente Contínua
DC	Direct current motor (Motor de corrente contínua)
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
DSP	Digital signal processor (Processador de sinal digital)
EM	Electromagnetic (Electromagnético)
EV	Electric Vehicle (Veículo eléctrico)
FCEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veículo eléctrico de células de combustível)
FEM	Finite element method (Método dos elementos finitos)
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FIA	Federação Internacional do Automóvel
FOC	Field oriented control - vector control (Controlo por orientação de campo - Controlo vectorial)
Fuzzy	Fuzzy Control (Controlo fuzzy)
GTO	Gate turn-off thyristor
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Veículo eléctrico híbrido)
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
IM	Induction motor (Motor de indução)
KERS	Kinetic Energy Recovery Systems (Sistema de Recuperação de Energia Cinética)
MARC	Model reference adaptive control (Modelo de referência de controlo adaptativo)
MCT	MOS-controlled thyristor
MOSFET	Metal-oxide field-effect transistor (Transistor efeito de campo)

NEV	Neighborhood Electric Vehicles (Veículos eléctricos de vizinhança)
NNC	Neural network control (Controlo por redes neuronais)
ONG	Organização não-governamental
PEV	Plug-in Electric Vehicle (Veículo eléctrico de recarregamento pela rede)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veículo eléctrico híbrido de recarregamento pela rede)
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor (Motor Síncrono de Ímanes Permanentes)
PWM	Pulse width modulation (modulação por largura de impulso)
STC	Self-tuning control
VEC	Veículo Eléctrico de Competição
VSC	Variable structure control (Controlo da estrutura variável)
VVVF	Variable voltage variable frequency (Tensão variável e frequência variável)
WTCC	World Touring Car Championship (Campeonato do Mundo de Carros de Turismo)

#### Lista de símbolos

$\omega$	Frequência angular
$\alpha$	Ângulo
$V_q, V_d$	Tensões de eixo de quadratura e eixo directo
$\theta$	Posição angular medida
$\omega$	Velocidade angular
$i_q, i_d$	Correntes de eixo de quadratura e eixo directo
$J$	Momento de inércia
$P$	Número de pares de pólos
$L_d$	Indutância de eixo directo
$L_q$	Indutância de eixo em quadratura
$R_s$	Resistência do estator
$k_m$	Constante do fluxo do rotor do motor de ímanes permanentes
$P_m$	Potência mecânica
$P_{ma}$	Potência referente à energia armazenada no campo magnético de eixo directo e em quadratura do estator

# Capítulo 1

## Introdução

Motivados pelas recentes e mais exigentes leis no que concerne às emissões de gases de escape dos veículos, pela escassez dos recursos energéticos de origem fóssil e tendo em considerações que as preocupações relativamente ao aquecimento global serem cada vez maiores, os veículos eléctricos têm vindo a ser vistos como uma solução para o futuro por parte dos governos, fabricantes de automóveis e consumidores.

Portugal encontra-se na vanguarda relativamente à mobilidade eléctrica, apostando em novos modelos energético, visando melhorar a qualidade de vida das cidades e dos cidadãos. Nos últimos anos, o governo decretou um conjunto de incentivos e benefícios fiscais de modo a incentivar a população a trocar o seu carro de combustão antigo, por um carro novo eléctrico tentando substituir o binómio motor térmico - combustíveis fósseis, por veículos amigos do ambiente.

A sensibilização para estas questões é hoje um tema actual e pertinente. Por exemplo, a poluição existente no desporto automóvel é uma mísera percentagem comparativamente com a poluição originária na indústria e na mobilidade, no entanto já existem esforços e investimentos de forma a reduzir os gases de escape, o ruído e o consumo de combustíveis fósseis. Donde se pode salientar os carros do [WTCC](#) onde actualmente já se utilizam 10 a 20 por cento de substâncias não poluentes na gasolina e a utilização do biodiesel em substituição do diesel, bem como ao sistema [KERS](#) usado na [fórmula 1](#) que visa o armazenamento e reutilização da energia proveniente das travagens para aumentar a velocidade. Estes dois exemplos não são muito relevantes a nível ambientais, mas a nível de sensibilização já é um grande passo, visto muita da tecnologia utilizada nos veículos convencionais ser oriunda dos veículos de competição, pois a competição é uma indústria de inovação com o fim de melhorar as performances e rendimentos do conjunto carro/piloto. Assim sendo podemos dizer que a competição automóvel serve como rampa de lançamento para a indústria automóvel convencional.

## 2 Apresentação do Projecto VEC - Veículo Eléctrico de Competição

Mas para os amantes do desporto automobilístico o que os faz assistirem às competições automóveis é o barulho e o fumo, desprezando muitas das vezes os carros e os pilotos. Um carro com motores eléctricos pode ser incrivelmente veloz, pode ter arranques fantásticos, pode permitir pontos de travagem bem interessantes, mas para estes “amantes” não seria a mesma coisa.

Tendo em consideração estes pressupostos, “Será que os veículos eléctricos, poderão ser completamente desenvolvidos em competição?” Provavelmente será uma resposta que apenas o tempo e o futuro poderão responder, no entanto à data de hoje será uma mais-valia poder comparar um veículo tradicional com um veículo eléctrico e nada melhor que usar todas as regras já existentes no desporto automobilizado.

Esta dissertação surge no seguimento dos temas acima mencionadas, bem como do gosto pelo desporto automobilístico tendo como principal objectivo a concepção de um veículo eléctrico de competição a partir de um veículo convencional, tendo principal incidência no sistema de propulsão e tracção (POWERTRAIN).

### 1.1 - Apresentação do Projecto VEC - Veículo Eléctrico de Competição

O Projecto do Veículo Eléctrico de Competição ([VEC](#)) consiste na conversão de um veículo urbano convencional, num veículo de competição com tracção totalmente eléctrica.

O desenvolvimento de um veículo eléctrico obriga a que sejam reunidos conteúdos teóricos de diversas áreas de engenharia, desde a engenharia mecânica/automóvel que influência directamente a aerodinâmica e a transmissão do veículo, passando pela engenharia electrotécnica, cada vez mais influente e decisiva no desenvolvimento do motor eléctrico e na electrónica de potência, até à engenharia química associada à problemática das baterias.

O projecto mecânico e a preparação do veículo serão realizados pelos quatros elementos responsáveis pela conversão do veículo com a ajuda do Prof. Dr. José Ferreira Duarte e dos técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A conversão do veículo será realizada pelos quatros alunos de electrotecnicia sendo eles responsáveis pelo sistema de tracção, pelo sistema de alimentação, pelo sistema de sensorização e telemetria e pelo sistema de monitorização. O diagrama de blocos presente na Figura 1.1 representa o projecto e preparação do veículo eléctrico de competição.

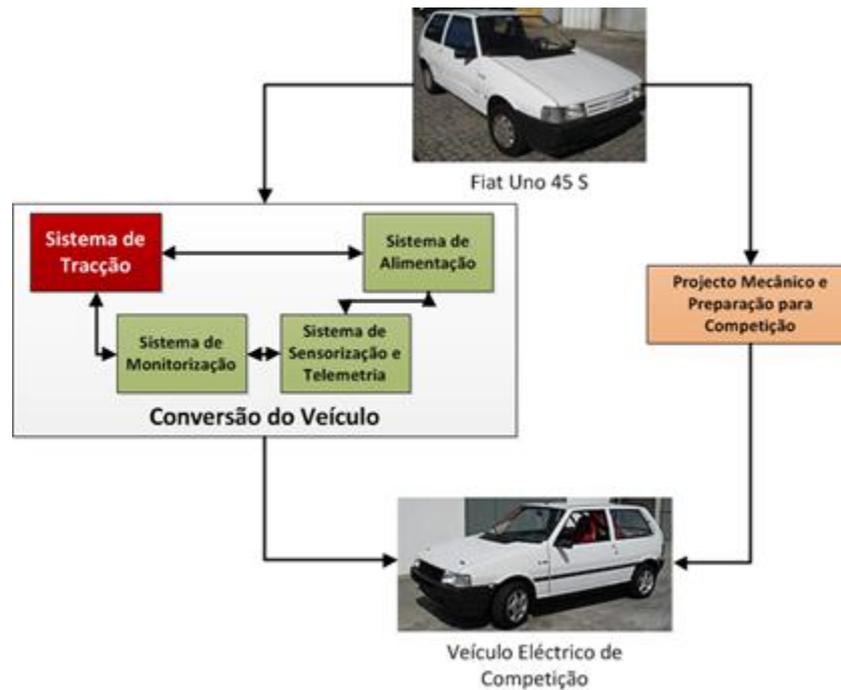


Figura 1.1- Diagrama do Projecto do Veículo Eléctrico de Competição

A conversão do veículo será realizada por quatro elementos, um encarregue do sistema de tracção, outro do sistema de alimentação e gestão de energia, outro responsável pela sensorização e telemetria e por fim outro responsável pela monitorização do veículo eléctrico. Visto ser necessário posteriormente interligar todos os sistemas, é imprescindível garantir uma coordenação efectiva dentro desta sub-equipa, sendo esta efectuada pelo Prof. Dr. Armando Araújo. A Figura 1.2 ilustra o exposto.

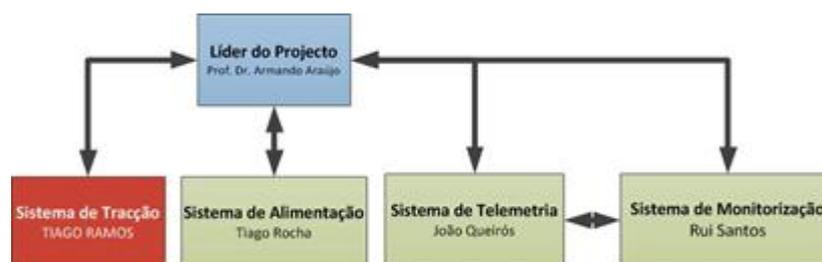


Figura 1.2 - Diagrama da Sub-Equipa - Conversão do Veículo

O sistema de conversão do veículo terá por base o diagrama de blocos apresentado na Figura 1.3, onde se pode verificar a necessidade da interligação dos vários subsistemas.

O diagrama interliga três subsistemas, sendo o primeiro responsável pelo sistema de alimentação e gestão de energia (contorno verde), o segundo pelo sistema de tracção (contorno castanho) e por fim o terceiro responsável pelo sistema mecânico (contorno laranja).

## 4 Importância dos Veículos Eléctricos

O sistema de alimentação e gestão de energia será estudado e implementado pelo elemento da equipa Tiago Rocha, enquanto que os restantes sistemas serão estudados e implementados ao longo desta dissertação pelo autor.

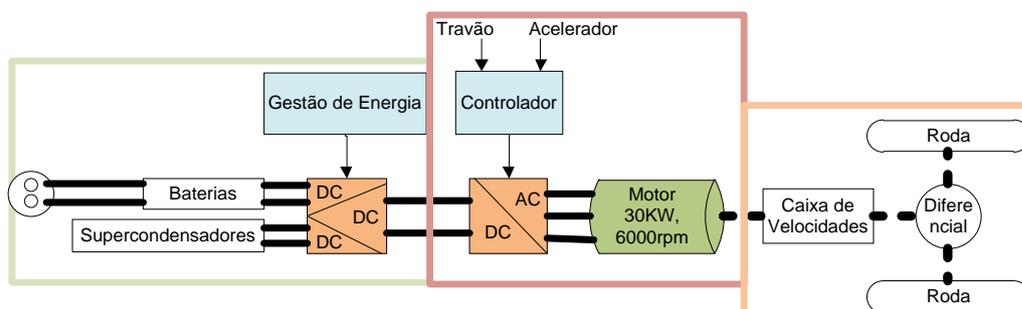


Figura 1.3 - Diagrama de blocos do Sistema de Conversão

## 1.2 - Importância dos Veículos Eléctricos

O veículo eléctrico é uma invenção com mais de 100 anos que consiste num veículo com um motor eléctrico que é alimentado a electricidade proveniente de um acumulador (ou bateria), que contém energia armazenada sob a forma de um potencial electroquímico.[1]

Esta forma de motorização é a mais eficiente de todas as conhecidas, devido às excelentes propriedades do motor eléctrico, que disponibiliza um elevado binário a baixas rotações, mantendo uma potência constante num grande intervalo. Além disso, não consome energia quando parado e tem uma transferência de energia eléctrica para mecânica superior a 90%, pois muita pouca energia se perde em aquecimento do motor, como é normal no motor a combustão.[2]

Os veículos eléctricos são ligados à rede eléctrica para serem carregados de energia, podendo esta operação ser efectuada em qualquer tomada eléctrica. Para além disso, estes veículos conseguem ter a capacidade de regenerar energia, ou seja, recuperar nas descidas e travagens parte da energia despendida no esforço de subida ou aceleração, aumentando ainda mais a sua eficiência global no uso da energia.[2]

Os veículos eléctricos não têm qualquer emissão directa de gases nocivos ou outro tipo de partículas, pois não existe nenhum processo de combustão a bordo. As emissões associadas a este tipo de transporte vêm da produção da energia.[1]

No caso em que a energia usada tem origem em fontes de energia renováveis, como é o caso de Portugal que tem uma excelente capacidade nesta área, a poluição libertada em todo o processo é praticamente zero. Isso quer dizer que se consegue colocar um veículo em circulação recorrendo a energia “limpa” proveniente do ambiente e sem impactos poluentes.

### 1.3 - Veículos Eléctricos de Competição: Benefícios e Desafios

Os impactos ambientais e as alterações climáticas, até aqui, menosprezadas por muitos por serem de evolução lenta, estão à vista e bem presentes no nosso dia-a-dia pela sua severidade e frequência.[3]

Cada vez mais se ouve falar na sustentabilidade, no aquecimento global, na eficiência e dependência energética, estes temas têm sido aprofundados ao longo das décadas estando directamente ligados à evolução das energias renováveis (Figura 1.4).

A poluição na competição “rainha” do automobilismo ([Fórmula 1](#)) é directamente proporcional aos gastos. Como curiosidade, cada volta que um carro de Fórmula 1 realiza custa cerca de 2,5 mil euros. A média de gastos num fim-de-semana de corrida é de 21,5 milhões de euros. Todo esse dinheiro é gasto em combustível, pneus, chassis, motores, travões. Esses números foram calculados numa pesquisa feita pela revista britânica “[Business F1](#)”.

Além da exorbitância de dinheiro, todos esses gastos trazem reflexos directos para o meio ambiente. Segundo a mesma publicação, uma equipa de ponta chega a gastar cerca de 200 mil litros de gasolina durante um ano de competições, percorrendo cerca de 300 mil quilómetros. Isso dá uma média de 0,66 litros por quilómetro, até 10 vezes mais do que a média de consumo de um carro convencional, que tem uma média a rondar os 0,07 litros por quilómetro.

De acordo com um estudo realizado por um grupo de (ONG'S) francesas, cada litro de gasolina gasta corresponde a 2,3 quilos de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Isso significa que, por ano, um carro de Fórmula 1 emite 460 mil quilos de CO<sub>2</sub>, contra 30600 quilos de CO<sub>2</sub> dos carros convencionais.

Num mundo cada vez mais tomado por pessoas conscientes das suas responsabilidades com a sustentabilidade do meio ambiente, os desportos a motor parecem estar destinados ao fracasso. A única situação que contraria esta realidade consiste nos elevados interesses envolvidos, por parte das empresas de combustíveis, peças, pneus que patrocinam este tipo de desporto de forma a retirar dividendos indirectamente.

A Federação Internacional de Automobilismo ([FIA](#)) demonstra certa preocupação com essas questões ambientais. Algumas fornecedoras de combustível para a Fórmula 1 já misturam 5% de etanol à gasolina usada nas provas, tendo como objectivo aumentar esta percentagem para 11%. A FIA, como medida de sensibilização, iniciou uma campanha denominada “Make Cars Green” (Torne o seu carro verde) para mostrar às pessoas em geral como reduzir a poluição emitida pelos seus carros.[4]

Mas estas medidas não combatem definitivamente a poluição, pois existem outros tipos de poluição que afectam as pessoas, como por exemplo a poluição sonora.

Sabendo da não poluição directa dos veículos eléctricos poder-se-á no futuro apenas ter desporto automobilizado recorrendo a veículos eléctricos sendo este um grande benefício para a sobrevivência deste mesmo desporto.

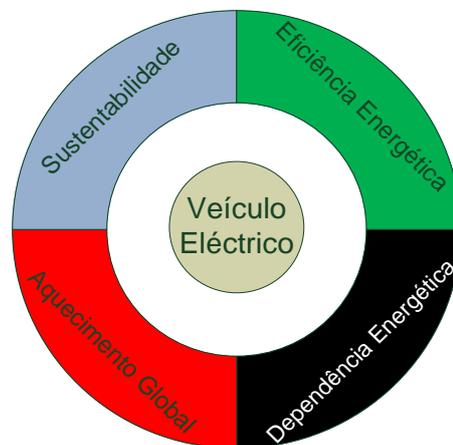


Figura 1.4 - Problemáticas Ambientais

### 1.4 - Motivação e Objectivos

Nos últimos anos tanto como nos que se avizinham tem-se vindo a detectar um investimento acentuado na dinamização dos veículos com propulsão totalmente eléctrica, nomeadamente por parte dos maiores fabricantes.

Perante esta situação nota-se uma preocupação em conceber sistemas de tracção eléctrica mais eficientes e com perdas reduzidas, valorizado assim o sector dos motores e controladores eléctricos.

O motor síncrono de ímanes permanentes (PMSM) têm sofrido grandes inovações, sendo reconhecido como um forte candidato para a propulsão de veículos eléctricos.[5]

Neste âmbito juntamente com a filosofia da competição automóvel [Challenge Desafio Único](#) que consiste em proporcionar aos amantes da velocidade uma oportunidade de pilotar um carro de corrida a custo reduzido, surgiu a ideia de converter um veículo comercial (Fiat Uno 45 S) num veículo eléctrico de competição ([VEC](#)).

Pretende-se estudar o desempenho típico do Fiat Uno da categoria FEUP 1 do [Challenger Desafio Único](#) de modo a comparar este sistema de tracção com o sistema eléctrico a desenvolver.

Visto estar prevista a participação do veículo eléctrico juntamente com os veículos de combustão interna é necessário garantir a mesma dinâmica entre os dois, sendo necessário projectar e dimensionar os sistemas de tracção eléctrica.

## 1.5 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em nove capítulos. O primeiro e presente capítulo trata da introdução ao documento, onde se contextualiza, referencia e explicita o projecto, definindo objectivos e apresentando a contribuição do autor.

O segundo capítulo consiste numa análise ao estado de arte dos veículos eléctricos, com ênfase nas tecnologias associadas à propulsão, alimentação e armazenamento de energia dos veículos automóveis.

O terceiro capítulo apresenta em detalhe a envolvência teórica subjacente ao motor síncrono de ímanes permanentes e possíveis métodos de controlo.

O capítulo quatro apresenta o princípio de funcionamento do método de controlo *Space Vector Modulation* bem como das plataformas necessárias à sua implementação.

O veículo adoptado para o projecto será estudado e apresentado no capítulo cinco.

O capítulo seis apresenta as simulações do sistema a combustão e do sistema totalmente eléctrico.

No capítulo sete serão apresentados todos os sistemas a utilizar na vertente prática desta dissertação, tanto a nível de hardware como software.

O capítulo oito apresenta a implementação e ensaio dos vários sistemas a utilizar na concepção e preparação do veículo

As conclusões do trabalho realizado, bem como algumas perspectivas de evolução futura do projecto apresentado na presente dissertação preenchem o capítulo nove.

A Tabela 1-1 ilustra o exposto:

Tabela 1-1 - Organização da Dissertação

Capítulo 1	Descrição do trabalho e dos respectivos objectivos
Capítulo 2	Descrição do estado de arte dos veículos eléctricos, motores eléctricos, controladores, sistemas de alimentação
Capítulo 3	Motores Síncronos de Ímanes Permanentes
Capítulo 4	Space Vector Modulation
Capítulo 5	Estudo do veículo adoptado, Fiat Uno 45 S
Capítulo 6	Simulação do sistema a combustão e do sistema totalmente eléctrico.
Capítulo 7	Apresentação dos sistemas a utilizar na vertente prática desta dissertação, tanto a nível de hardware como software.
Capítulo 8	Implementação e ensaio dos vários sistemas a utilizar na concepção e preparação do veículo
Capítulo 9	Conclusões gerais do trabalho e Trabalhos Futuros



# Capítulo 2

## Estado de Arte

Neste Capítulo irá ser aprofundada a temática dos veículos eléctricos, realizando inicialmente uma breve análise histórica. Sendo seguidamente apresentados os veículos eléctricos a baterias (BEV) destacando a sua constituição, bem como as possíveis topologias que os caracterizam.

Serão apresentados os vários sistemas de propulsão eléctrica já utilizados na tracção de veículos eléctricos destacando os motores, os conversores e as respectivas técnicas de controlo.

Por fim efectuar-se-á uma breve descrição dos sistemas de alimentação utilizados em veículos eléctricos a baterias.

### 2.1 - O Veículo Automóvel Eléctrico - Perspectiva Histórica

A história dos veículos eléctricos começou em meados do século XIX com a invenção do motor eléctrico por Michael Faraday em 1821. Entre 1832 e 1839 surgiu o primeiro carro eléctrico construído na Escócia por Robert Anderson e funcionava com baterias não recarregáveis [6].

Estes tipos de veículos foram os mais populares e os mais usados até à viragem do século, sendo comercializados à razão de 10 carros eléctricos por cada carro a gasolina [7]. A primeira competição automóvel na América decorreu no ano de 1895 e foi ganho por Charles Duryea num EV (Figura 2.1), de salientar que os veículos eléctricos detinham o recorde de velocidade (Figura 2.2).



Figura 2.1 - Carro vencedor da primeira Competição de Veículos Eléctricos[8]



Figura 2.2 - VE que em 1899, estabeleceu o recorde de velocidade [9]

A nível comercial a primeira aplicação de carros eléctricos deu-se em 1897, nos Estados Unido, com a construção de uma frota de táxis para a cidade de Nova Iorque, por parte da Electric Carriage & Wagon Company de Filadélfia [7].

O principal motivo para este declínio deveu-se a Henry Ford que começou a produzir em massa veículos a gasolina que chegaram ao mercado por metade do preço de um veículo eléctrico, uma vez que a produção dos veículos eléctricos era realizada de forma manualmente e unidade a unidade. As vantagens dos veículos a gasolina não eram apenas o preço mais atractivo mas também a velocidade atingida por este tipo de veículos. A juntar a estes factores, o facto de não existir infra-estruturas eléctricas fora das cidades, a adição de um arrancador eléctrico aos motores a gasolina, fazendo os arranques dos motores menos perigosos e mais cómodos, fez com que por altura da primeira grande guerra o carro eléctrico praticamente desaparecesse do mercado, sendo apenas reavivados mais tarde por volta dos anos 60 [6].

Apenas a salientar o facto de que embora os carros eléctricos tenham sido postos de parte, a electricidade ainda fazia mover os comboios nas minas de carvão e nos metropolitanos, onde o fumo não podia existir e os eléctricos, veículos muito populares nas cidades desde o princípio do século XX até hoje. Nos anos 40 do séc. XX foram introduzidos os comboios a diesel, que começaram a substituir o vapor e nos meados dos anos 50 do séc. XX a maioria das linhas principais estavam já equipados com locomotivas a diesel [6].

Os avanços tecnológicos fizeram com que o comboio eléctrico fosse encarado como uma alternativa viável aos outros comboios da altura fazendo com que grandes linhas ferroviárias comesçassem a ser electrificadas a partir dos anos 60 do séc. XX [6].

As primeiras crises do petróleo 1973 e 1979, conjuntamente com uma nova preocupação ambiental, com os novos avanços tecnológicos no campo das baterias e o surgimento de novos dispositivos electrónicos veio alterar a mentalidade e criar novas oportunidades de mercado relativamente ao carro eléctrico [7], veículos que desde sempre foram considerados veículos suaves e limpos.

O processo de crescimento da quota de mercado dos veículos eléctricos acentuou-se a partir de 1990, altura a partir da qual o valor do barril de crude tem atingido valores cada vez mais altos batendo recordes todos os anos. Associado a este problema e às questões ambientais que afectam o clima a nível global, levaram à procura de novas fontes de energia alternativas. Por forma a contornar estes problemas começaram a surgir no mercado novos modelos de veículos eléctricos com tracção totalmente ou parcialmente eléctrica [2], podendo ser classificados de acordo com os diversos tipos abaixo enumerados.

- EV (*electric vehicle*) - Veículo eléctrico
- BEV (*battery electric vehicle*) - Veículo eléctrico a baterias
- PEV (*plug-in electric vehicle*) - Veículo eléctrico de recarregamento pela rede
- NEV (*neighborhood electric vehicles*) - Veículos eléctricos de vizinhança
- FCEV (*plug-in hybrid electric vehicle*) - Veículo eléctrico de células de combustível
- HEV (*hybrid electric vehicle*) - Veículo eléctrico híbrido
- PHEV (*plug-in hybrid electric vehicle*) - Veículo eléctrico híbrido de recarregamento pela rede

Um veículo eléctrico, tal como o nome indica, é um veículo cuja fonte de energia é eléctrica. Na verdade os tipos de veículos eléctricos mais comuns são os veículos eléctricos de baterias (BEV) e os veículos eléctricos híbridos (HEV).

Os BEV são veículos que recorrem a energia proveniente de baterias colocadas a bordo, que poderão ser recarregadas em andamento bem como em postos de abastecimento próprios.

Sendo a densidade de energia existente em baterias inferior à da gasolina, o desenvolvimento de células de combustível tem aumentado nos últimos anos. Apesar de mais complexo e dispendioso, o desenvolvimento comercial de veículos eléctricos híbridos permitiu o aumento de desempenho e autonomia dos veículos eléctricos. De modo a diminuir o custo, têm sido realizados esforços de melhoramento de diversos subsistemas eléctricos dos veículos híbridos (motor eléctrico, electrónica de potência, unidade de gestão de energia e baterias).

Os referidos tipos de veículos eléctricos encontram-se actualmente em diferentes fases, encontrando-se já em comercialização os BEV's e os HEV's. A Tabela 2-1 mostra uma comparação entre os tipos de veículos referidos.

Tabela 2-1 - Características de Veículos Eléctricos [2]

Tipos de veículos eléctricos	BEV	HEV
Propulsão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motor Eléctrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motor Eléctrico</li> <li>• Motor de Combustão Interna</li> </ul>
Fonte de Energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baterias</li> <li>• Supercondensadores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baterias</li> <li>• Supercondensadores</li> <li>• Gasolina/Gasóleo</li> </ul>
Proveniência da Energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rede Eléctrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rede Eléctrica</li> <li>• Postos de combustível</li> </ul>
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissão poluente nula</li> <li>• Independência do petróleo</li> <li>• Autonomia de 100-200 Km</li> <li>• Elevado custo inicial</li> <li>• Disponível comercialmente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissão poluente reduzida</li> <li>• Longa Autonomia</li> <li>• Dependência do petróleo</li> <li>• Estrutura complexa</li> <li>• Disponível comercialmente</li> </ul>
Principais Questões	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestão da bateria</li> <li>• Propulsão de alto desempenho</li> <li>• Facilidades de carregamento energético</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestão de múltiplas fontes de energia</li> <li>• Dependente do ciclo de condução</li> <li>• Gestão e dimensões da bateria</li> </ul>

O agitar do mercado dos veículos eléctricos, no início dos anos 90, despoletou novamente as corridas. No Arizona com o patrocínio da Arizona Public Service Company (APS), concessionária da rede eléctrica que servia o Arizona, um pequeno grupo de veículos corria sobre a oval no Phoenix International Raceway, sendo a maioria dos veículos originária de conversões de veículos. A corrida teria sido dentro da normalidade excepto com o aparecimento de um Honda Civic convertido para eléctrico especificamente para corridas e alimentado por uma bateria de zinco-ar. A bateria de zinco-ar sendo algo inovador provocou grande interesse entre as empresas de automóveis e resultou na produção de uma bateria de zinco-ar para computadores [10].

Desde o seu renascimento humilde em 1991, o veículo eléctrico de corrida cresceu originando várias classes contendo mais de cem veículos em competição. As corridas de veículos eléctricos foram aprovadas pela Federação Internacional do Automóvel (FIA), sendo intitulada por [FIA Alternative Energies Cup](#) [4].

Os Estados Unidos organizam competições entre instituições académicas com a ajuda de empresas de energia e electrónica no intuito de melhorar o desempenho dos veículos eléctricos [10].

Nos últimos anos, corridas deste tipo têm sido realizadas pelo mundo, donde se destacam as provas de Drag Race (Figura 2.3) muito conhecidas nos Estados Unidos da América onde veículos competem em pistas rectas com o objectivo de saber qual o carro mais veloz em curtas distância (400 metros). A Formula Student Electric (Figura 2.4), consiste numa competição de protótipos monolugares projectados e concebidos em ambiente académico, de modo a inovar e desenvolver novas tecnologias, aumentando a competitividade dentro da competição. A EVCUP (Figura 2.5) consiste em provas de circuito com diferentes veículos eléctricos separados por três categorias distintas, sendo a primeira destinada a veículos de pequena potência (veículos citadinos), a segunda a veículos desportivos e a terceira a protótipos. E por fim as provas de montanha, (Figura 2.6), onde o objectivo é realizar uma subida no menor tempo possível.

A maioria destas competições são patrocinadas por universidades, grandes empresas do sector automóvel, energético e do sector dos pneus.

Assim sendo pode-se concluir que tanto a vertente desportiva como a vertente comercial encontram-se em grande evolução, sendo encetados grandes esforços de modo a evoluir a tecnologia da tracção eléctrica.



Figura 2.3 - Veículo de Competição Eléctrico de DRAG RACE (Arranques) [11]



Figura 2.4 - Veículo de Competição Eléctrico da Formula Student [12]



Figura 2.5 - Veículo de Competição Eléctrico da EVCUP- 3 categorias [13]



Figura 2.6 - Veículo de Competição Eléctrico preparado para Provas de Montanha [14]

## 2.2 - Veículos Eléctricos a Baterias (BEV)

Sabendo dos objectivos do projecto bem como dos tipos de veículos mencionados na secção anterior (2.1), destaca-se o BEV visto cumprir os requisitos do projecto que dará origem a esta dissertação. Assim sendo será efectuada uma análise mais aprofundada deste tipo de veículos, apresentando o modo de funcionamento e as topologias possíveis.

### 2.2.1 - Constituição

O BEV é constituído basicamente por um motor eléctrico de tracção e como fonte de energia as baterias químicas, Figura 2.7.

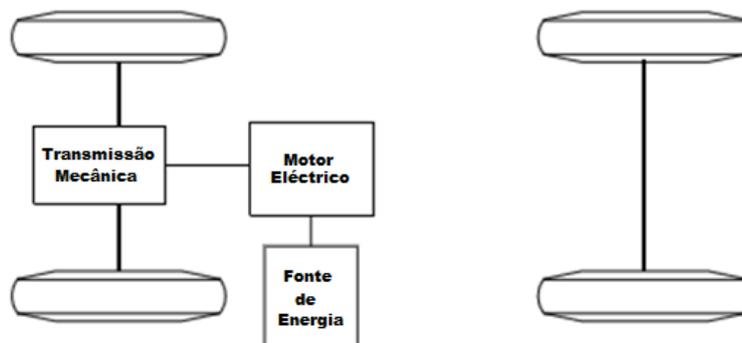


Figura 2.7 - Topologia básica do BEV [2]

O fluxo de energia nos veículos eléctricos de baterias ocorre principalmente em cabos eléctricos flexíveis, em detrimento das ligações mecânicas verificadas nos veículos de combustão interna, adoptando uma configuração de subsistemas distribuídos. A utilização de diferentes sistemas de propulsão implica diferenças na configuração do sistema, assim como a utilização de diferentes fontes de armazenamento de energia implica diferentes formas de reabastecimento [2].

Na Figura 2.8, ilustra-se a constituição de um BEV, constituído pelo subsistema de propulsão eléctrica, subsistema de fonte de armazenamento de energia, e subsistema auxiliar.

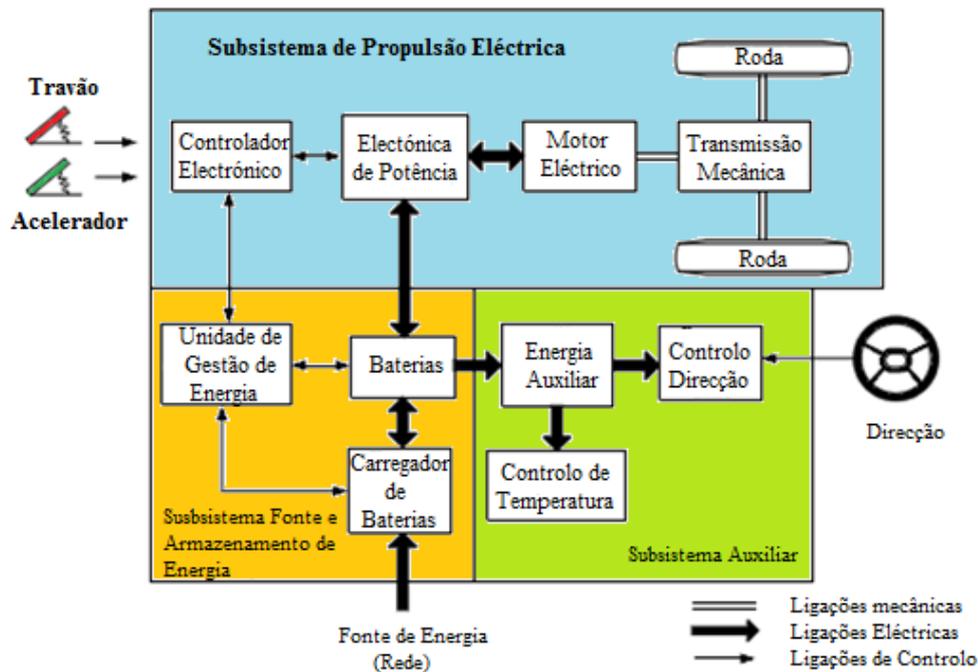


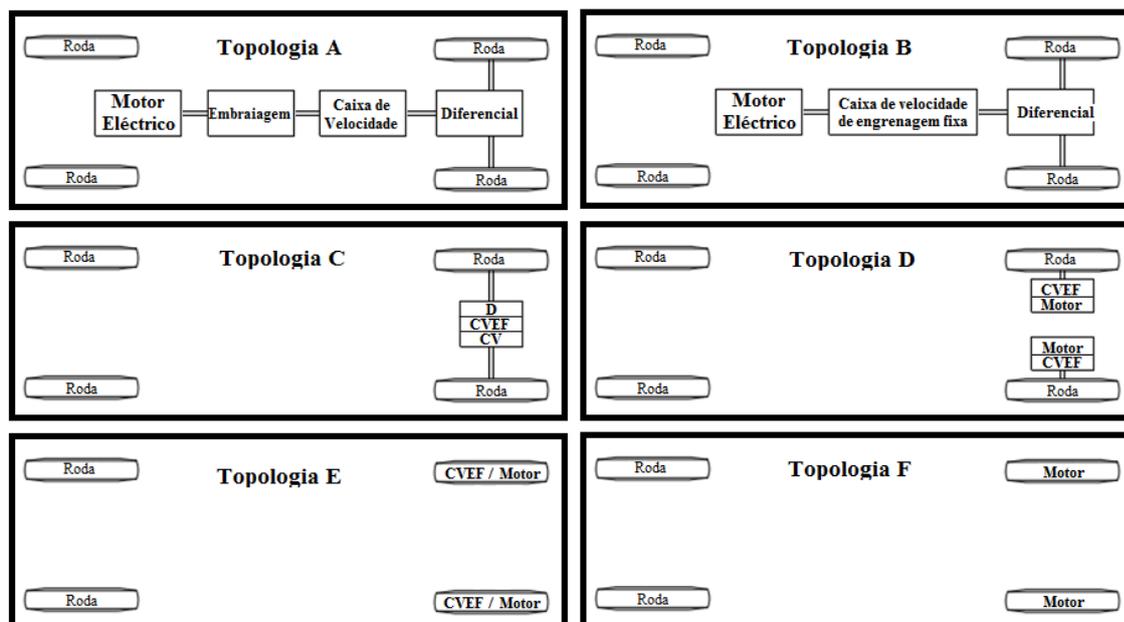
Figura 2.8 - Esquema de constituição de um BEV [2]

Através das entradas de controlo dos pedais de travão e acelerador do veículo, o controlador electrónico disponibiliza sinais de controlo adequados à ligação e corte dos dispositivos de electrónica de potência, cuja função incide na regulação do fluxo de energia entre a fonte de armazenamento de energia e o motor eléctrico. O sentido inverso de fluxo de energia, deve-se à energia regenerativa originada pelo processo de travagem num veículo eléctrico, sendo esta armazenada na fonte de armazenamento de energia. A unidade de gestão de energia colabora com o controlador electrónico de modo a controlar a recuperação de energia regenerativa de travagem, cooperando igualmente com a unidade de reabastecimento de energia, de modo a gerir o respectivo reabastecimento.

A fonte auxiliar de energia disponibiliza a potência necessária com diferentes níveis de tensão para todos os módulos auxiliares, como o controlo de temperatura, unidade de controlo de direcção e de toda a electrónica de controlo e sensorização [2].

### 2.2.2 - Topologias

Os BEV podem ser caracterizados por diversas topologias, sendo as mais utilizadas apresentadas na figura seguinte.



Legenda:

D - Diferencial                      E- Embraiagem                      CV- Caixa de Velocidades

CVEF - Caixa de Velocidades de Engrenagem Fixa                      M - Motor

Figura 2.9 - Topologias de BEV [2]

A topologia A (Figura 2.9), é constituída pelo motor eléctrico, embraiagem, caixa de velocidades e diferencial, podendo o motor acciona as rodas dianteiras ou traseiras (tracção dianteira ou traseira). Esta topologia é muito utilizada na conversão de veículos convencionais, pois diminuí a complexidade mecânica, aproveitando a maioria dos sistemas originais do veículo, trocando apenas o motor de combustão por um idêntico mas eléctrico.

Na topologia B (Figura 2.9), substituindo a caixa de velocidades por uma engrenagem fixa, torna-se possível proceder à remoção da embraiagem, diminuindo o peso e tamanho do mecanismo de transmissão. Esta configuração é constituída apenas pelo motor eléctrico, engrenagem fixa, e diferencial.

Integrando o conceito de motor frontal e tracção dianteira transversal, a topologia C (Figura 2.9) é constituída pelo motor eléctrico, engrenagem fixa, e diferencial, integrados num eixo entre as rodas motrizes.

Na topologia D (Figura 2.9), a acção do diferencial em curvas pode ser electronicamente disponibilizada por 2 motores eléctricos operando a diferentes velocidades, conduzindo separadamente as duas rodas motrizes, através de uma engrenagem fixa.

De modo a reduzir o caminho mecânico de transmissão entre o motor eléctrico e as rodas motrizes, na configuração E, o motor eléctrico é colocado no interior das rodas, associado a uma engrenagem planetária fixa, que reduz a velocidade do motor para a velocidade desejável na roda.

Eliminando a existência de qualquer engrenagem, na configuração F, o motor eléctrico é directamente aplicado às rodas, possuindo um rotor exterior de baixa velocidade. Neste caso,

o controlo de velocidade do motor eléctrico é equivalente ao controlo da velocidade das rodas, e conseqüentemente do veículo.

A escolha das configurações apresentadas depende do tamanho e aplicação do veículo eléctrico. Presentemente, as configurações B e C são as mais populares, enquanto as configurações E e F têm sido utilizadas meramente para demonstrações estando ainda em fase de desenvolvimento e testes.

## 2.3 - Sistema de Propulsão de Veículos Eléctricos

Finda a apresentação dos BEV, torna-se importante fazer referência aos sistemas de propulsão eléctrica visto desempenharem um papel vital nos veículos eléctricos. O motor eléctrico combinado com toda a electrónica de potência associada aos controladores e conversores de potência determinam em grande medida o sucesso do desempenho de um veículo.

O motor eléctrico tem como funcionalidade converter energia eléctrica em energia mecânica proporcionando a movimentação do veículo, podendo também estar habilitado a regenerar energia para a sua fonte de alimentação, através da frenagem regenerativa.

O conversor de potência é responsável por garantir o fornecimento adequado dos níveis de tensão e corrente ao motor. Este necessita de um controlador electrónico, pois é através dos sinais provenientes do controlador electrónico que o sistema de conversão de potência consegue regular o trânsito de energia de forma a controlar o binário e a velocidade do motor. O controlador electrónico pode ser dividido em três unidades funcionais. A unidade de sensorização tem a função de medir parâmetros necessários ao controlo como é o exemplo da corrente, tensão, temperatura, velocidade, binário e fluxo, de modo a enviar esses parâmetros para o circuito de interface. O circuito de interface tem a função de adaptar os sinais oriundos dos sensores de forma a serem decodificados e interpretados pelo processador. O processador tem a função de processar os dados de forma a gerar sinais de controlo para o conversor de potência.

O diagrama de blocos presente na Figura 2.10 ilustra o sistema de propulsão.

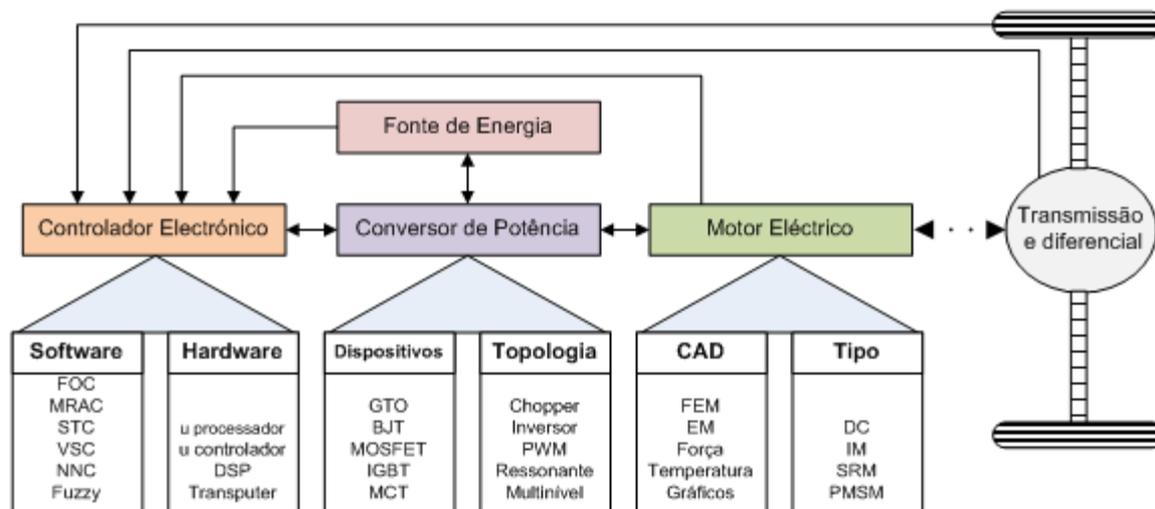


Figura 2.10 - Diagrama de bloco de um sistema eléctrico de propulsão [2]

A escolha do sistema de propulsão de um EV é obtida através de dois factores importantíssimos, o perfil de condução e as restrições inerentes à construção do veículo.

O perfil de condução inclui as acelerações, a velocidade máxima, a inclinação média ou máxima, a travagem e a autonomia. As restrições de construção dependem do volume e do peso do veículo.

Assim sendo, as características desejadas para um veículo eléctrico influenciam o processo de escolha do sistema eléctrico de propulsão, sendo possível adaptar o sistema às necessidades/requisitos.

Sabendo que o controlador electrónico depende do conversor de potência, o conversor de potência depende do motor e do sistema de alimentação, e o motor depende das necessidade/requisitos já mencionados, chega-se à conclusão que o primeiro sistema a escolher será o motor eléctrico.

Os motores para veículos eléctricos podem ser classificados em dois grandes grupos, nomeadamente um que inclui motores com comutador/colector e outro que inclui os motores sem comutador.

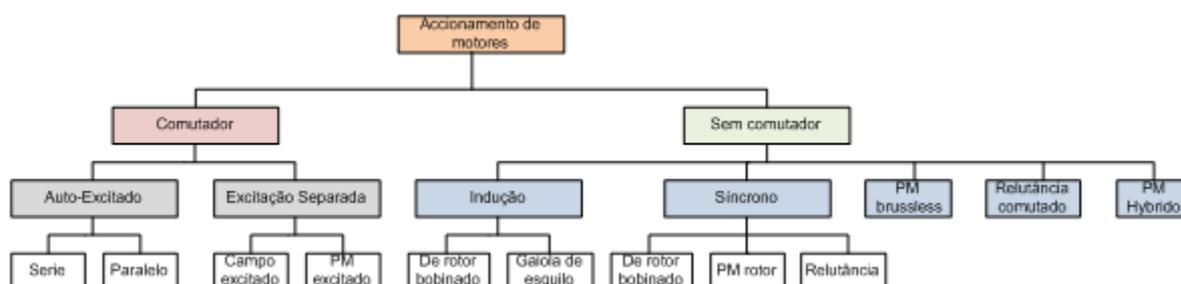


Figura 2.11 - Os dois grupos de tipos de motor a considerar para veículos eléctricos [2]

No grupo mais à esquerda (Figura 2.11) estão inseridos os tradicionais motores de corrente contínua (CC) que incluem os motores de excitação em série, excitação em paralelo,

excitação composta, excitação separada e de ímanes permanentes. Tradicionalmente estes motores estiveram sempre relacionados com a tracção eléctrica devido à sua característica binário-velocidade adaptar-se para as solicitações da tracção de um veículo e o seu controlo ser relativamente simples. No entanto, os motores CC necessitam de comutadores/colectores e escovas para que flua corrente para a armadura, tornando-os assim menos fiáveis e menos adequados para trabalhar a altas velocidades necessitando de manutenção periódica [2].

Para além disso, uma característica muito importante que os motores para os EV's devem possuir é uma elevada densidade de potência. Os motores CC bobinados apresentam precisamente uma baixa densidade de potência. De qualquer forma, muito devido à maturidade da tecnologia envolvida nestes motores e à sua facilidade de controlo, os motores CC são usados desde longa data como forma de propulsão de EV's [15].

As recentes evoluções tecnológicas fizeram com que os motores sem colectores avançassem, sendo dotados de maior eficiência, densidades de potência mais elevadas e custos de operação mais reduzidos que os motores CC tradicionais [16, 17].

O grupo mais à direita (Figura 2.11), referente aos motores sem controlador aparece hoje em dia num plano mais atractivo e desejável. Assim sendo, os motores de corrente alternada (CA) tornaram-se, nos últimos anos, muito mais atractivos como meios de propulsão de EV's.

De entre os motores CA sem comutador, sem dúvida o ganhou grande aceitação como propulsor para EV's foi o motor de indução. As razões para isto têm a ver com o seu baixo custo, altíssima fiabilidade e operação com muito baixa necessidade de manutenção.

Substituindo os enrolamentos dos motores síncronos convencionais com ímanes permanentes, os motores síncronos de ímanes permanentes eliminam assim as escovas, os slip-rings e, sem enrolamentos, eliminam também as perdas no cobre. Actualmente este tipo de motor é também denominado motor de corrente alternada sem escovas e com ímanes permanentes, ou ainda motores sem escovas com ímanes permanentes de alimentação sinusoidal, devido à alimentação ser corrente alternada sinusoidal e a configuração sem escovas. Dado este tipo de motores ser análogo em funcionamento aos motores síncronos tradicionais, eles podem funcionar a partir de uma fonte sinusoidal ou uma fonte de modulação de largura de impulso (PWM) sem a necessidade de qualquer tipo de comutação electrónica [18].

Quando os ímanes são montados na superfície do rotor, o motor comporta-se como um motor síncrono sem saliências uma vez que a permeabilidade dos ímanes permanentes é similar à do ar. Colocando esses ímanes no interior do circuito magnético do rotor, a saliência causa um binário resistente adicional, que facilita a operação numa escala mais alargada de velocidades na região de potência constante. Por outro lado, abandonando os enrolamentos ou os ímanes permanentes fazendo uso propositadamente da saliência do rotor, são criados os motores síncronos de relutância. Estes motores geralmente são simples e pouco dispendiosos mas com fraca potência de saída. À semelhança dos motores de indução, os motores de

Ímanes permanentes habitualmente usam controlo por orientação de campo para aplicações que exijam maior performance. Como são motores com uma densidade de potência e eficiência elevadas, são vistos nos dias que correm como potenciais competidores com os motores de indução para aplicações em veículos eléctricos [2].

Outro tipo de motor reconhecido como tendo algum potencial para ser usado em aplicações de tracção em veículos eléctricos é o motor de relutância comutada. Basicamente este motor deriva-se directamente dos motores de passo de relutância variável. Os motores de relutância comutada apresentam as vantagens de terem uma construção simples, custo de produção baixo e excepcionais características binário-velocidade para aplicação em veículos eléctricos. O problema com estes motores é que, apesar de apresentarem uma construção bastante simples, no que respeita ao controlo o mesmo já não pode ser dito. Tradicionalmente estes motores utilizam sensores para detectarem a posição relativa entre o rotor e o estator. Estes sensores são normalmente vulneráveis a vibrações mecânicas e muito sensíveis à temperatura e à sujidade. Pelas razões atrás apresentadas, a presença deste tipo de sensores reduz a fiabilidade dos motores e limita algumas aplicações dos mesmos [2].

De seguida serão apresentados de forma mais aprofundada os tipos de motores, conversores de potência e controladores electrónicos mencionados anteriormente, sendo posteriormente efectuada uma comparação entre todos.

### 2.3.1 - Motores Eléctricos

Nesta secção serão apresentados os tipos de motores eléctricos já utilizados na tracção eléctrica, sendo efectuada posteriormente uma comparação dos respectivos motores de modo a saber qual o que tem melhor performance para o projecto.

#### 2.3.1.1 - Motor de Corrente Contínua CC

O motor de corrente contínua ou motor DC, Figura 2.12, possui um rotor constituído por um enrolamento, rodando livremente entre os pólos do estator. Motores de pequena e média dimensão possuem um ou dois pares de pólos, podendo os maiores possuir cinco ou mais pares de pólos. De notar que a velocidade de rotação do motor de corrente contínua não se encontra relacionada com o número de pólos.

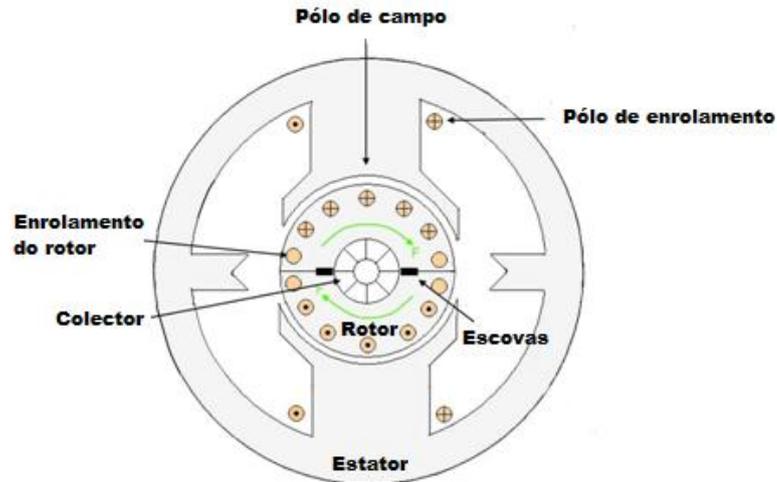


Figura 2.12 - Constituição do motor de corrente contínua[19]

A corrente eléctrica é fornecida ao enrolamento do rotor por uma fonte de corrente contínua, aplicada através de escovas a um colector, sendo a rotação originada pela interacção entre o campo eléctrico do rotor e o campo magnético existente entre os pólos norte e sul do estator. Para manter esta interacção e a direcção de rotação do rotor, torna-se necessário que o sentido da corrente seja invertido duas vezes por cada ciclo de rotação do rotor, no caso de um par de pólos, conectando os enrolamentos do rotor ao colector, de modo a que as escovas entrem alternadamente em contacto com as terminações opostas dos enrolamentos do rotor, em cada  $180^\circ$  da rotação [19].

Apesar da característica binário-velocidade do motor de corrente contínua cumprir as exigências de tracção eléctrica, Figura 2.13, este motor apresenta uma construção volumosa, baixo rendimento e fiabilidade, elevada necessidade de manutenção devido à utilização de escovas que se deterioram com o funcionamento, e o custo e debilidade do colector utilizado [20].

Os recentes desenvolvimentos da electrónica de potência, possibilitaram a implementação prática de motores de corrente alternada sem contactos, caracterizados por elevada velocidade, rendimento, densidade de potência, assim como baixo custo de operação e reduzida necessidade de manutenção, relativamente ao motor de corrente contínua. Devido ao custo dos elementos de electrónica de potência, os motores de corrente alternada são utilizados para potências elevadas, sendo os motores de corrente contínua, uma alternativa para potências mais baixas [20].

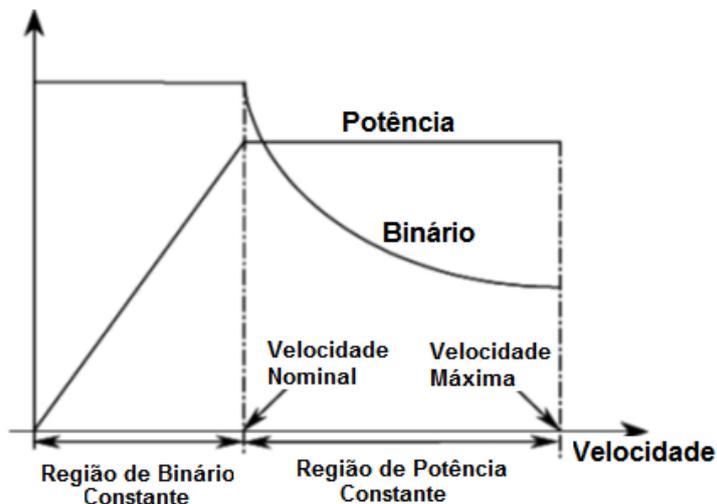


Figura 2.13 - Curvas características do motor DC [20]

### 2.3.1.2 - Motor de Indução CA

O motor de indução, Figura 2.14, desenvolve binário pela interacção do campo magnético radial produzido pela corrente nos enrolamentos do estator, e a corrente no rotor induzida por indução electromagnética entre os enrolamentos do estator e do rotor [21].

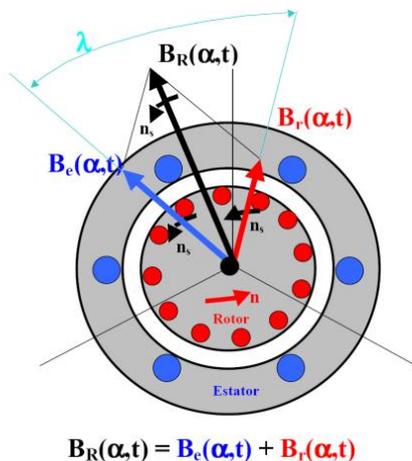


Figura 2.14 - Diagrama vectorial do motor de indução [21]

O estator é constituído por pequenas cavas onde se encontra o enrolamento trifásico. O rotor pode possuir igualmente um enrolamento trifásico, assim como apresentar uma configuração em “gaiola de esquilo” [19]

Aplicando uma tensão trifásica aos enrolamentos do estator, gera-se um campo magnético girante que induz uma força electromotriz nos enrolamentos do rotor, produzindo binário. Neste tipo de motor a velocidade de rotação do rotor difere da velocidade do campo magnético girante do estator, verificando-se a existência de escorregamento, dependente da carga aplicada ao motor. Com o aumento da velocidade de rotação a corrente induzida

diminui, visto diminuir a velocidade do campo magnético girante do estator em relação à velocidade do rotor [19].

A velocidade do campo girante no estator, assim como a velocidade de rotação do rotor, são determinadas pelo número de pares de pólos, diminuindo com o aumento do número destes.

Esta importante característica para motores industriais é de pouca relevância em motores de veículos eléctricos, onde a velocidade do veículo é controlada através da frequência da tensão trifásica aplicada [19].

O motor de indução é muito utilizado em veículos eléctricos, visto apresentar construção simples, custo razoável, robustez, capacidade de operação em ambientes adversos, e reduzida manutenção devido à ausência de escovas. Apresenta igualmente a capacidade de gerar velocidades mais elevadas que os motores de corrente contínua, e sendo a potência no veio do motor proporcional ao produto do binário pela velocidade de rotação, torna-se possível reduzir o peso e o tamanho, recorrendo a uma adequada caixa de velocidades [19].

Na Figura 2.15 representam-se diversas características do motor de indução, em função da velocidade, procedendo a uma variação na frequência de alimentação.

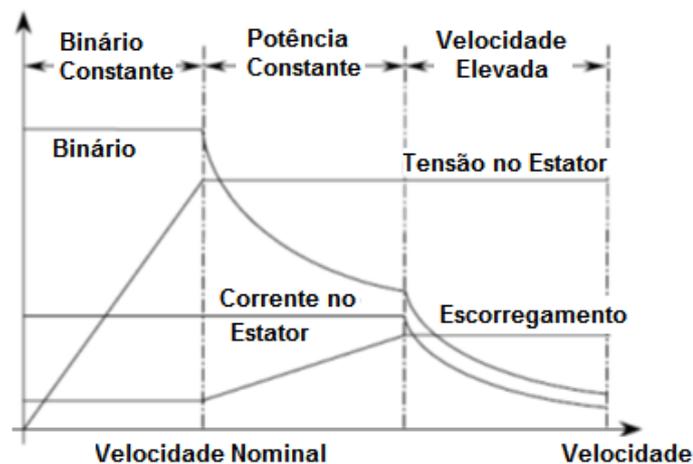


Figura 2.15 - Características do Motor de Indução [20]

De modo a melhorar o desempenho dinâmico do motor de indução para aplicação em veículos eléctricos, existem diversos métodos de controlo que alteram a frequência, permitindo ampliar a gama de velocidade para cerca de 4 vezes relativamente à velocidade nominal, apesar da diminuição de rendimento a altas velocidades [15].

A extensão da gama de velocidade com potência constante para além da velocidade nominal é acompanhada de atenuação de fluxo, visto não ser possível aumentar a tensão de alimentação para além do seu valor nominal. Contudo, a existência de um declínio do binário limita a extensão da gama de potência constante, sendo atingido o binário mínimo para a velocidade crítica [20].

O motor de indução possui como desvantagens perdas elevadas devido à utilização de enrolamentos no estator, reduzido factor de potência e factor de utilização do inversor, sendo estas mais críticas para velocidades elevadas [22, 23].

Com a actualíssima notícia produzida pela Toyota no Salão Automóvel de Detroit, mencionada abaixo, é possível verificar a preocupação em inovar e aprontar novas soluções para o futuro.

*“A Toyota está a desenvolver um motor eléctrico de indução, que substituirá o magnético actualmente utilizado no Prius”* - Automotor 2011-01-14

Devido à dependência de minerais raros a Toyota encontra-se recentemente a desenvolver uma nova tecnologia para os motores de indução. A possível quebra no fornecimento de Dispósio e Neodímio, utilizados no fabrico de motores eléctricos de ímanes permanentes, que alimentam a quase totalidade de motores eléctricos dos grandes fabricantes, está directamente ligada com esta nova tecnologia a ser desenvolvida. Esta tecnologia encontra-se numa fase avançada sendo o motor mais leve e mais eficiente do que o motor de indução utilizado nos veículos da marca.

### 2.3.1.3 - Motor de Síncronos de Ímanes Permanentes

O motor PMSM é um tipo de motor síncrono em que os enrolamentos do estator são idênticos aos do motor de indução. O rotor é constituído por ímanes permanentes, criando pólos magnéticos que rodam sincronamente. Não havendo enrolamentos no rotor, são aí inexistentes as perdas de Joule, contribuindo para um aumento de rendimento comparativamente ao motor de indução. Para além desta vantagem, o campo magnético excitado por ímanes permanentes de elevado produto energético, possibilita a redução do peso e volume total do motor para uma dada potência de saída, contribuindo para uma elevada densidade de potência [15].

A fiabilidade do motor PMSM é elevada, visto que a sua excitação não apresenta risco de dano mecânico, defeitos ou sobreaquecimento. A dissipação de calor é realizada de modo mais eficiente neste motor, visto ocorrer principalmente no estator. Este tipo de motores apresenta fluxo magnético constante, ausência de escovas e estrutura simples. No entanto, apresenta uma zona de potência constante reduzida, Figura 2.16 [15].

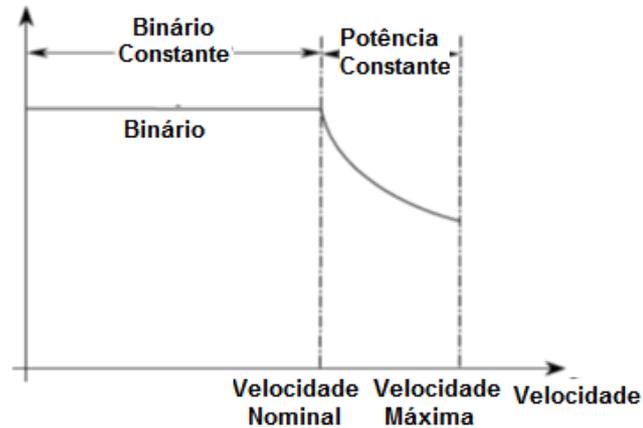


Figura 2.16 - Característica binário-velocidade do motor PMSM [20]

De modo a aumentar a gama de velocidades do motor, pode se proceder ao controlo do ângulo de condução do conversor de potência acima da velocidade nominal, Figura 2.17. A gama de velocidade pode ser alargada para cerca de quatro vezes relativamente à velocidade nominal, no entanto o rendimento na gama de velocidade elevada diminui, originando desmagnetização do motor [20].

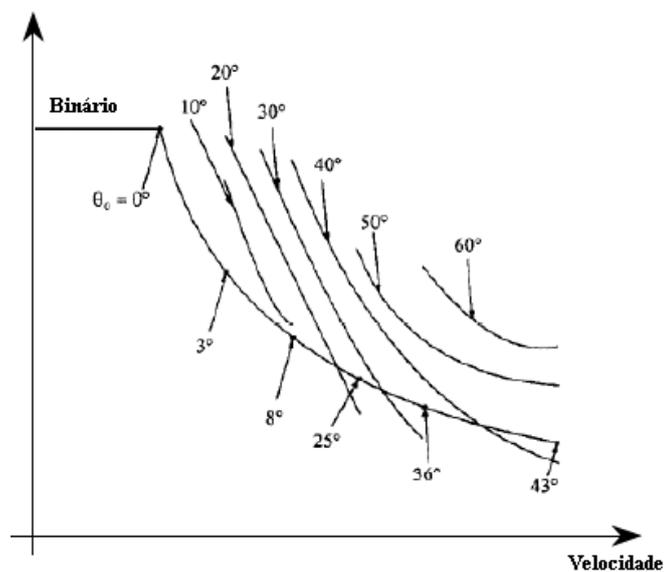


Figura 2.17 - Característica binário-velocidade do motor síncrono de ímanes permanentes com controlo do ângulo de condução [20]

Como desvantagens deste motor, tem-se o considerável custo do material magnético permanente com alta coercibilidade, e a possibilidade de desmagnetização deste [19].

O motor síncrono de ímanes permanentes é o motor com maior capacidade de competir com o motor de indução, em sistemas de propulsão para veículos eléctricos.

### 2.3.1.4 - Motor de Relutância Comutado

O motor de relutância comutado é considerado um tipo especial de motor síncrono, sendo a sua operação dependente da disponibilidade de elementos de electrónica de potência adequados. A principal diferença entre o motor síncrono convencional e este motor consiste no facto de o estator possuir pólos salientes, em que os enrolamentos de cada pólo são conectados em série, com os enrolamentos do pólo oposto. O rotor é concebido de modo a fornecer um número de pólos salientes inferior ao do estator, não possuindo ímanes permanentes ou enrolamentos [19].

Uma configuração típica deste motor encontra-se na Figura 2.18, existindo diversas combinações de pólos do estator e do rotor.

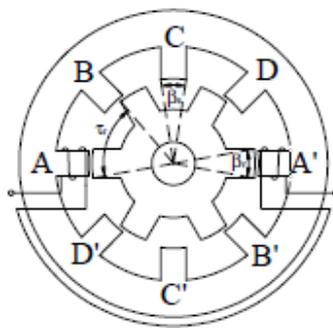


Figura 2.18 - Motor de relutância comutado, com 8 pólos no estator e 6 pólos no rotor [24]

O motor é impulsionado sincronamente, alimentando sequencialmente os pares de pólos opostos do estator, recorrendo ao controlo através de um sensor de posição do rotor. O par de pólos do rotor que se encontra mais próximo dos referidos pólos do estator, tende a deslocar-se em direcção a estes, de modo a que o circuito magnético reduza a relutância e maximize o fluxo magnético. Para velocidades abaixo da velocidade nominal, este motor proporciona o máximo binário disponível, sendo que a velocidades superiores, a corrente nos enrolamentos do estator não se mantém no seu máximo, sendo limitada pelo tempo disponível para aplicação da máxima tensão de funcionamento, diminuindo o binário com o aumento da velocidade [19].

Devido à simplicidade do rotor e à eficiência do princípio de funcionamento, este motor consegue melhorias de fiabilidade, flexibilidade, volume, e potência por unidade de peso. O motor de relutância comutado apresenta igualmente como vantagens a simplicidade de construção (apesar de design e controlo complicados), baixo custo de produção, característica binário-velocidade ideal para aplicação em veículos eléctricos, Figura 2.19, possuindo uma gama de potência constante relativamente alargada [18].

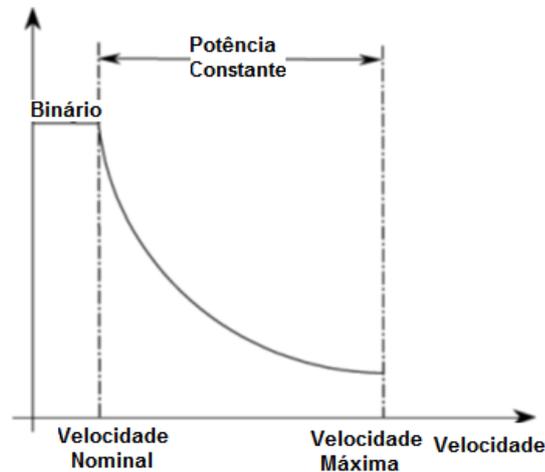


Figura 2.19 - Característica binário-velocidade do motor de relutância comutado [25]

No entanto, este motor possui ondulação no binário a baixas velocidades, traduzindo-se em problemas de ruído, podendo este problema ser resolvido controlando a forma dos pulsos de corrente em cada enrolamento de pares de pólos do estator [19].

Recentemente foi desenvolvido um modelo ideal aproximado do motor de relutância comutado, utilizando análise de elementos finitos, de modo a minimizar as perdas totais do motor. Foi desenvolvido igualmente um método de controlo difuso por deslizamento de modo a controlar as não linearidades do motor [15].

### 2.3.2 - Conversores de Potência

A evolução das topologias de conversores de potência normalmente segue a evolução dos dispositivos de potência, visando atingir a densidade de energia, alta eficiência, controlabilidade e confiabilidade.

Nesta secção serão abordados os conversores de potência utilizados no controlo dos motores eléctricos acima mencionados, sendo esta exposição baseada na referência [27].

Na verdade os conversores de potência podem ser divididos em quatro, donde se destacam os conversores:

- AC-AC;
- AC-DC (rectificador);
- DC-AC (inversor);
- DC-DC.(chopper)

Estando perante um projecto de um veículo eléctrico a bateria apenas é relevante referenciar os conversores DC-DC e os conversores DC-AC, que permitam a regeneração de energia cumprindo assim um dos requisitos do projecto.

Os conversores DC-DC surgiram na década de 60 do século passado, com tirístores a operar a baixa frequência de comutação. Agora eles podem ser operados em dezenas e centenas de quilo hertz. Em aplicações de propulsão eléctrica, o conversor DC-DC de dois quadrantes permite converter a tensão contínua da bateria para outra gama de tensão durante o modo de condução e durante a travagem regenerativa permite reverter o fluxo de energia.

Além disso, os conversores DC-DC de quatro quadrantes, (Figura 2.20), são empregados para o controlo de velocidade reversível e regeneradora dos motores DC (Figura 2.21 e Tabela 2-2).

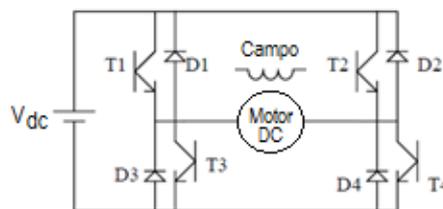


Figura 2.20 - Conversor de potência em Ponte completa

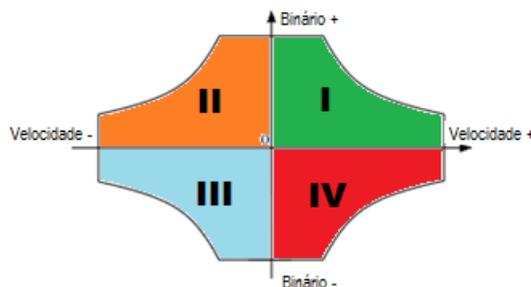


Figura 2.21 - Característica Binário-Velocidade do conversor de potência em ponte completa

Tabela 2-2 - Características do conversor de potência em ponte completa

Função	Quadrante	Velocidade	Binário	Potência saída
Motor (sentido horário)	I T1(on) e T4(on)	Positiva (+)	Positivo (+)	Positiva (+)
Travagem regenerativa (sentido horário)	IV T2(on) e T3(on)	Positiva (+)	Negativo (-)	Negativa (-)
Motor (sentido anti-horário)	III T2(on) e T3(on)	Negativa (-)	Negativo (-)	Positiva (+)
Travagem regenerativa (sentido anti-horário)	II T1(on) e T4(on)	Negativa (-)	Positivo (+)	Negativa (-)

Os inversores são geralmente do tipo alimentado em tensão e do tipo de alimentado em corrente. Devido à necessidade de uma indutância grande em série de forma a emular uma fonte de corrente, conversores de corrente alimentados raramente são utilizadas para propulsão eléctrica. Na verdade, inversores alimentados com tensão são usados quase que exclusivamente, porque eles são muito simples e podem ter fluxo de potência em qualquer direcção. O típico conversor trifásico em ponte completa está apresentado na Figura 2.22.

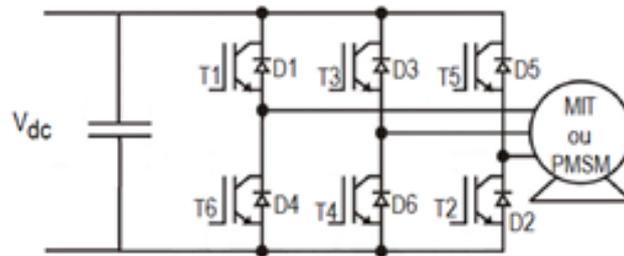


Figura 2.22 - Conversor de potência em ponte trifásica - inversor

Na Figura 2.22 está representado um conversor alimentado por um barramento DC, em ponte completa trifásica com IGBT's, que permite controlar a amplitude e a frequência das tensões de alimentação a aplicar ao motor. O método de funcionamento é muito idêntico ao do conversor DC-DC em ponte completa apenas é acoplado mais um braço à ponte, ou seja mais dois transístores a comutar.

Na Figura 2.23 é possível verificar a ordem com que os transístores comutam, de notar que encontram-se sempre três transístores ligados ao mesmo tempo. Um transístor quando ligado permanece ligado durante  $180^\circ$ , mas existem comutações a cada  $60^\circ$ . Os transístores do mesmo braço operam complementarmente

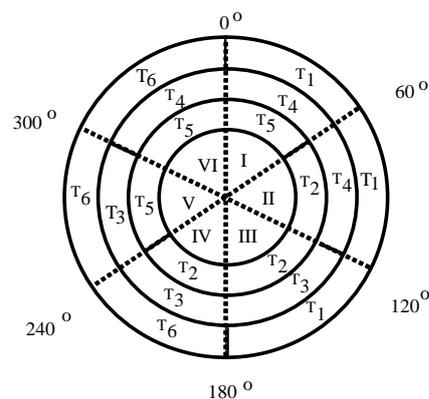


Figura 2.23 - Comando dos Transístor do inversor trifásico em ponte

A sua forma de onda de saída do conversor DC-AC pode ser rectangular, seis etapas ou PWM, dependendo da estratégia de mudança para as diferentes aplicações. Por exemplo, uma forma de onda rectangular é produzida para um motor DC brushless. Deve-se notar que a

saída de seis etapas está um pouco obsoleto pois a amplitude não pode ser directamente controlada e é rica em harmónicos. Por outro lado, a forma de onda PWM tem baixo conteúdo harmónico e a sua magnitude e frequência fundamental podem ser facilmente variadas de forma a se poder controlar a velocidade.

O uso do controlo de corrente para o inversor alimentado em tensão é particularmente atractivo para accionamentos de motores de alta performance, pois o binário do motor e o fluxo estão directamente relacionados com a corrente controlada. O estado de arte dos actuais sistemas de PWM controlado são a banda de histerese, o controlo de corrente instantânea com PWM de tensão e PWM por espaço vectorial

### 2.3.3 - Estratégias de Controlo

As estratégias de controlo utilizadas nos controladores electrónicos serão aprofundadas nesta secção visto terem a função de efectuar o comando dos semicondutores (drives) utilizados nos conversores de potência. Têm a função de controlar as grandezas inerentes à tracção eléctrica (velocidade e binário) através da corrente e da tensão aplicada ao motor, bem como das componentes electromagnéticas nele produzidas.

Sendo os motores de indução e os motores síncrono de ímanes permanentes os mais utilizados na tracção eléctrica leva-nos a fazer referência apenas aos controladores electrónicos usados nos respectivos motores.

Os motores de indução podem ser controlados através de métodos de controlo escalar e métodos de controlo por orientação de campo. Os métodos escalares apesar da sua simples implementação e desempenho estático aceitável, não permitem controlar os regimes dinâmicos onde os transitórios de tensões e correntes podem danificar a electrónica de potência, apresentando um fraco desempenho dinâmico. Assim sendo não serão sujeitos a estudo.

O controlo por orientação de campo, ou controlo vectorial, é aplicado em máquinas eléctricas AC para que o seu controlo se torne equivalente ao das máquinas DC de excitação separada. Este método de controlo foi inicialmente aplicado a motores de indução e posteriormente aplicado a motores síncronos de ímanes permanentes.

O controlo por orientação de campo possibilita o desacoplamento entre as componentes de binário e fluxo, permitindo respostas transitórias semelhantes às da máquina de corrente contínua com excitação independente, melhorando o comportamento dinâmico, e apresentando uma eficaz reacção à variação de velocidade garantindo uma produção máxima de binário com um menor número de ondulações.

No controlo por orientação de campo, é importante o conhecimento da posição do fluxo ligado no rotor. Assim, este método de controlo nos motores de indução pode ser classificado como directo ou indirecto, dependendo do método de obtenção da referida posição do fluxo ligado no rotor. O controlo directo do binário, apesar da distorção verificada no fluxo e

binário para baixas velocidades, apresenta como principais vantagens a simplicidade de implementação e a capacidade de controlar directamente o binário, permitindo respostas rápidas, embora mais lentas do que as verificadas no controlo por orientação de campo.

### 2.3.3.1 - Controlo directo por orientação de campo

No controlo directo, a posição do fluxo do rotor é medida directamente através de sensores. Também pode ser estimada através de algum processamento de sinal a medidas aos terminais da máquina. Uma vez que não é possível utilizar sensores que meçam directamente o fluxo do rotor, para se obter a informação desejada, é necessário empregar alguns cálculos a partir dos sinais que seja possível de obter.

O fluxo obtido através dos referidos sensores no entreferro não é o fluxo ligado no rotor, mas sim o fluxo de magnetização. Recorrendo à medição da corrente no estator, torna-se então possível obter o fluxo ligado no rotor segundo as componentes directa e de quadratura, no referencial dq, através das equações (2.1) e (2.2), respectivamente.

Admitindo o vector de fluxo ligado no rotor alinhado com o eixo directo no referencial dq, apenas tem interesse a equação (2.1).

$$\psi_{dr} = \frac{L_r}{L_m} \psi_{dm} - L_{ls} i_{ds} \quad (2.1)$$

$$\psi_{qr} = \frac{L_r}{L_m} \psi_{qm} - L_{ls} i_{qs} \quad (2.2)$$

Sendo difícil a medição directa de binário electromagnético, recorre-se à equação (2.3), dependente dos parâmetros construtivos da máquina,  $L_r$  e  $L_m$ , da corrente no estator, e do fluxo do rotor. Considerando o vector de fluxo alinhado com o eixo directo no referencial dq, tem-se a equação (2.4), resultante da equação (2.3).

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds}) \quad (2.3)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} i_{qs} \quad (2.4)$$

O diagrama de bloco da Figura 2.24, ilustra princípio do controlo directo por orientação do campo.

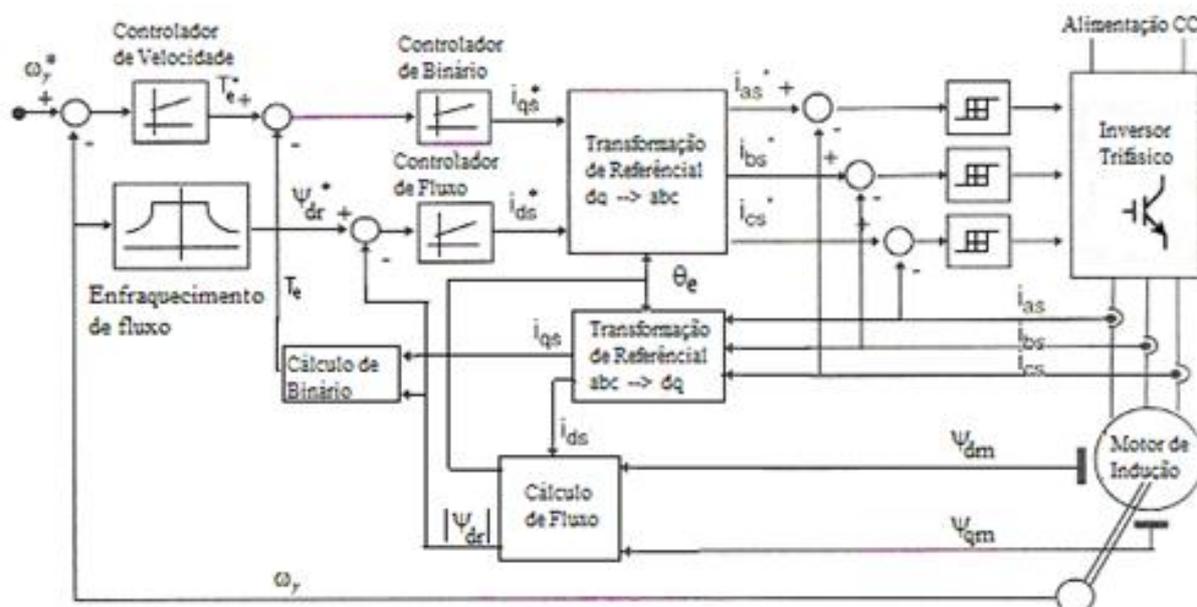


Figura 2.24 - Diagrama de blocos do controlo directo por orientação de campo [3]

O controlador de velocidade permite gerar um valor de binário de referência proporcional ao erro verificado entre a referência e valor medido da velocidade eléctrica de rotação, enquanto a função de enfraquecimento de fluxo origina uma referência de fluxo função da velocidade eléctrica de rotação.

Nas malhas de binário e fluxo, o erro verificado entre as referências e os valores medidos destas grandezas, aplicado respectivamente aos controladores de binário e fluxo, permite obter as componentes de corrente no referencial dq,  $i_{ds}^*$  e  $i_{qs}^*$ , e consequentemente as componentes de corrente de referência  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ ,  $i_c^*$ , pela transformação de coordenadas. O erro verificado entre estas e as componentes de corrente medidas  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ , aplicado a controladores de histerese, permite obter os sinais de comando PWM dos IGBT do inversor trifásico controlado em corrente. Controlando as correntes injectadas no estator da máquina, o comportamento dinâmico destas pode ser desprezado.

Apesar do método de controlo directo ser relativamente insensível às variações dos parâmetros do rotor, o seu desempenho torna-se lento para velocidades reduzidas, devido à existência de variações na resistência do estator [26].

### 2.3.3.2 - Controlo indirecto por orientação de campo

Em alternativa ao método directo, o método indirecto por orientação de campo, Figura 2.26, estima o valor de fluxo no rotor, em vez de proceder à medição directa através de sensores de fluxo, onde para velocidades reduzidas, se verificam pequenos desvios de valores.

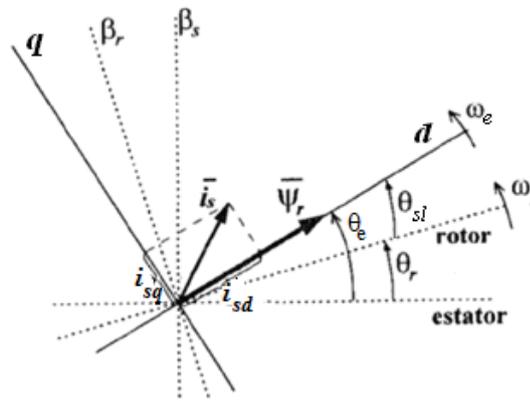


Figura 2.25 - Referencial do fluxo rotórico [3]

Observando a Figura 2.25, considera-se o vector de fluxo alinhado com o eixo directo no referencial dq, rodando à velocidade de sincronismo  $\omega_e$ , e com um ângulo  $\theta_{sl}$  de avanço relativamente a um referencial fixo ao rotor. Correspondendo o ângulo  $\theta_{sl}$  à velocidade do campo girante do estator em relação ao rotor  $\omega_{sl}$ , a posição  $\theta_e$  do fluxo rotórico é dada pela integração da soma desta última com a velocidade eléctrica de rotação, equação (2.5).

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt = \int \left( \omega_r + \frac{R_r L_m i_{qs}}{L_r \psi_{dr}} \right) dt \quad (2.5)$$

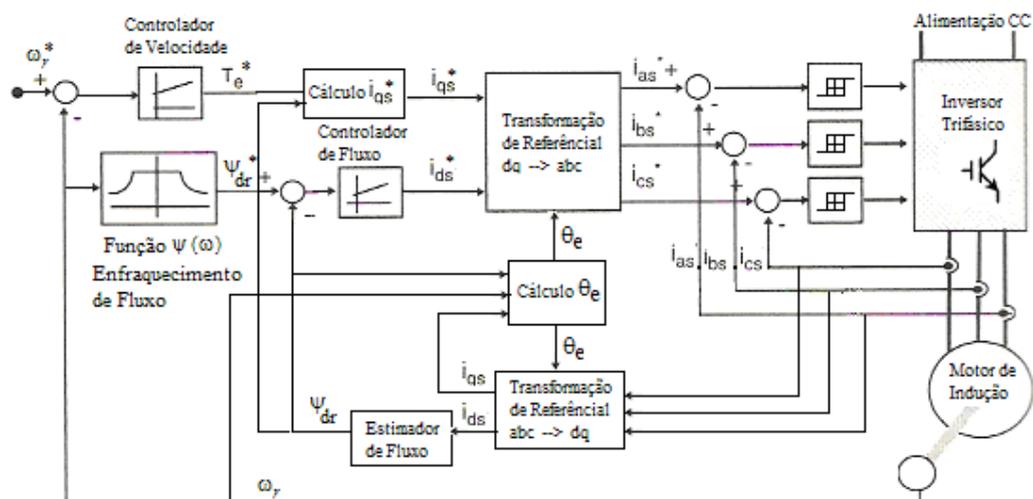


Figura 2.26 - Diagrama de blocos do controlo indirecto por orientação de campo [3]

Como no método directo, o controlador de velocidade gera um valor de binário de referência proporcional ao erro verificado entre a referência e o valor medido da velocidade eléctrica de rotação, produzindo a função de enfraquecimento de fluxo numa referência de fluxo em função da velocidade eléctrica de rotação. Obtido o valor de referência de binário electromagnético a desenvolver e sabendo o valor de fluxo estimado a partir das correntes nos enrolamentos do estator, torna-se possível determinar a componente de corrente no estator  $i_{qs}^*$ .

O erro verificado entre a referência e o valor estimado de fluxo, aplicado ao controlador de fluxo, permite obter a componente de corrente no estator  $i_{ds}^*$ . De realçar o desacoplamento existente entre o controlo do binário electromagnético e o controlo do fluxo magnético.

Identicamente ao que se verifica no método de controlo directo, as componentes de corrente de referência  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ ,  $i_c^*$  são obtidas através da transformação de coordenadas entre o referencial dq e abc. O erro verificado entre estas e as componentes medidas  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  é aplicado a controladores de histerese, permitindo obter os sinais de comando PWM dos IGBT do inversor trifásico controlado em corrente [3].

Nos motores Síncronos de Ímanes Permanentes para implementar o controlo por orientação de campo é necessário adquirir uma informação da posição do rotor, a qual usualmente é obtida através de sensores de elevada resolução tais como encoders ou resolvers. Estes sensores para além de serem bastante dispendiosos, podem deslocar-se conduzindo a uma posição errada do rotor. Uma das soluções possíveis é a utilização de métodos de controlo sem qualquer sensorização da posição do rotor o que conduz à implementação de algoritmos complexos de estimação da posição e da velocidade. Estes métodos além da sua complexidade e elevada carga computacional também possuem alguns problemas na detecção da posição inicial no momento de arranque do motor e no funcionamento a baixas velocidades, uma vez que utilizam algoritmos que estimam as forças contra electromotrizes que assumem valores bastante baixos e ruidosos a baixas velocidades de rotação. Outra das soluções é a utilização de sensores de baixa resolução, como é o caso dos sensores de efeito de hall que facilmente são inseridos no estator da máquina eléctrica. Usualmente são utilizados três sensores que permitem obter uma informação da posição do rotor com uma resolução de 60 graus eléctricos. Esta solução permite implementar o controlo por orientação de campo, dispensando os encoders ou resolvers e evitando a utilização de algoritmos complexos para a estimação da posição do rotor e da velocidade.

Nos motores síncronos de ímanes permanentes à medida que o rotor roda, existe um ângulo entre o fluxo magnético do estator e o fluxo magnético do rotor. Se estes dois campos magnéticos não estiverem desfasados de  $90^\circ$ , as forças contra electromotrizes e as correntes vão estar também desfasadas e o binário produzido não vai ser máximo. Através da detecção da posição do rotor é possível utilizar um método de controlo que imponha um desfasamento de  $90^\circ$  entre os dois campos magnéticos.

Quando existe um desfasamento de  $90^\circ$  entre os dois campos magnéticos, então  $\delta=90^\circ$  o que permite obter um binário máximo de acordo com a equação (2.6) e com o fasor da Figura 2.27.

$$T_e = \frac{3P}{2} \lambda_{af} i_s \quad (2.6)$$

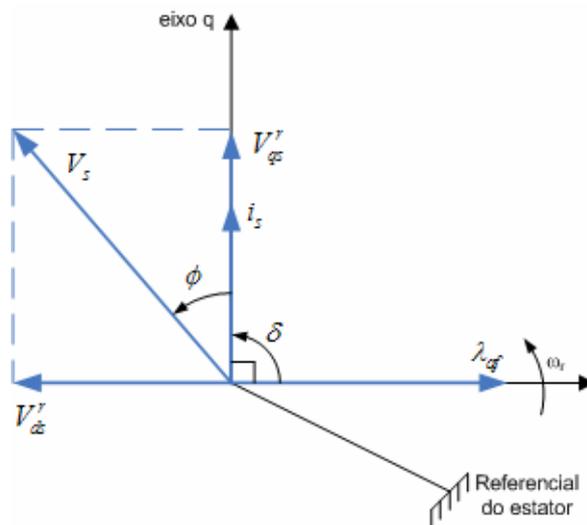


Figura 2.27 - Diagrama fasorial com  $\delta=90^\circ$  [27]

Este método de controlo utiliza as transformadas de Clarke e de Park para converter um sistema de três eixos dependente do tempo (coordenadas a, b, c) num sistema de dois eixos independente do tempo e que roda em sincronismo com o fluxo do rotor (coordenadas d, q).

Através das projecções anteriormente apresentadas é possível obter uma estrutura de controlo similar ao motor DC de excitação separada, sendo controlável independentemente o binário e o fluxo de magnetização produzidos uma vez que estes são directamente proporcionais a  $I_q$  e  $I_d$ , respectivamente.

Na Figura 2.28 é apresentado o diagrama de blocos deste controlador. O sinal de referência  $I_q$  é definido de acordo com a amplitude do binário que o motor deve produzir. A referência de corrente ( $I_d$ ) relativa ao fluxo de magnetização é mantida nula para obter o nível óptimo de binário. Uma vez que se trata de um sistema equilibrado, o somatório das correntes é nulo o que possibilita o calculo de uma das correntes através das outras duas, eliminando assim a necessidade de medir três correntes. A partir das correntes medidas é obtido o vector da corrente no referencial do rotor através das transformadas anteriormente referidas. Assim, é possível calcular o erro em relação aos sinais de referência, a aplicar aos controladores PI. Estes dois controladores geram as tensões  $V_q$  e  $V_d$  que, depois de aplicada a transformada inversa são aplicadas ao motor.

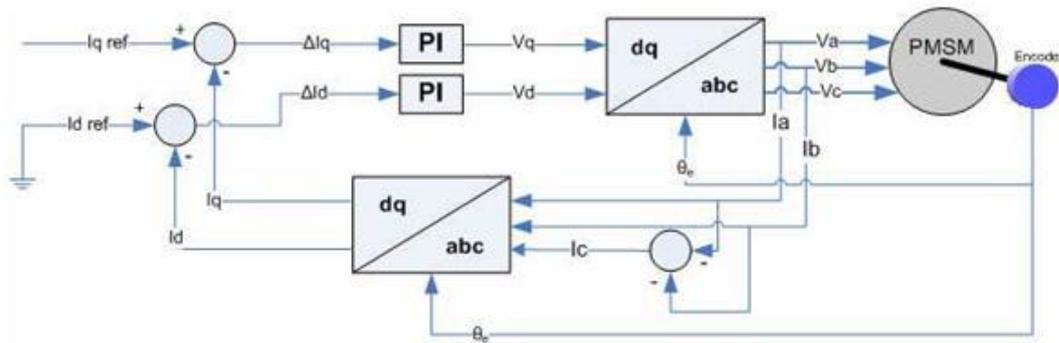


Figura 2.28 - Diagrama de blocos do controlo vectorial com encoder [27]

No diagrama de blocos da figura anterior é apresentado o caso mais simples do controlo por orientação de campo em que a posição do rotor é adquirida por um encoder. Neste caso também é pressuposto que o conversor electrónico de potência é ideal, ou seja que as tensões geradas pelo controlador são directamente aplicadas ao motor.

### 2.3.3.3 - Space Vector Modulation

A técnica Space Vector Modulation (SVM) tornou-se a mais popular e importante técnica de PWM pois permite comandar inversores trifásicos de tensão aplicados no controlo de motores de Indução AC, motores Brushless DC, motores de Relutância e motores Síncronos de Ímanes Permanentes. É uma técnica que permite aplicação de níveis de tensão mais elevados ao motor e menor distorção harmónica [27].

Esta técnica baseia-se na representação vectorial do inversor e realiza a transformação de tensões no plano  $\alpha\beta$  directamente em sinais de PWM. As principais vantagens inerentes a este método são: a tensão de saída é 15% maior do que nos métodos de modulação usuais permitindo um uso mais eficiente da fonte de tensão de alimentação DC, maior eficiência, o número de comutações dos semicondutores é cerca de 30% menor do que utilizando o método convencional Sinusoidal Pulse Width Modulation [27].

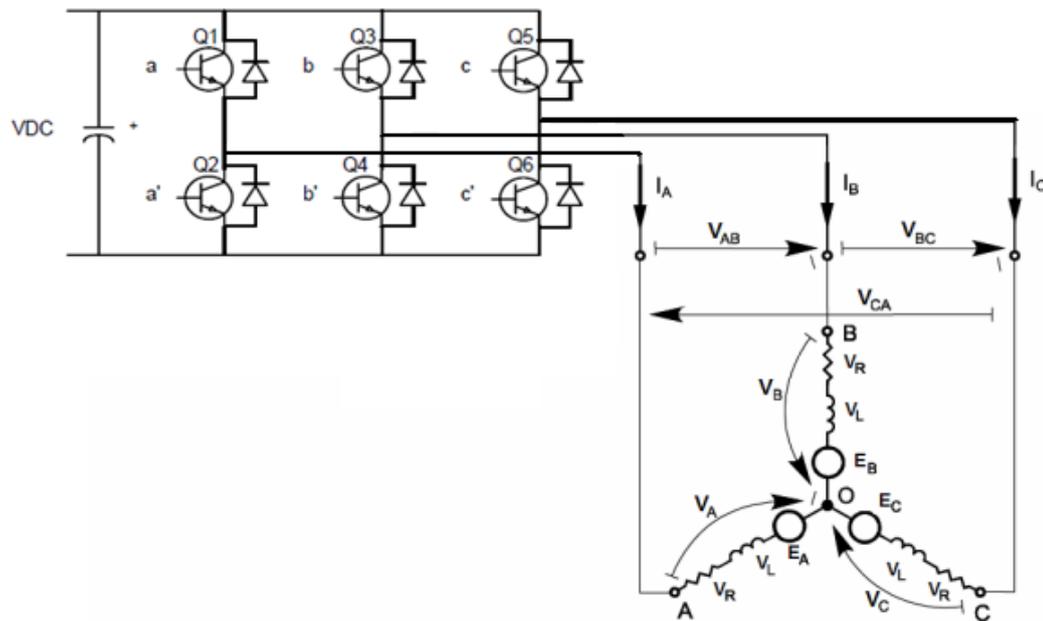


Figura 2.29 - Esquema do inversor trifásico

Considerando que o estado de cada braço do inversor é representado pelo estado da variável  $S_x$  ( $S_x=1$  se o semicondutor superior estiver fechado e o inferior estiver aberto e vice-versa para  $S_x=0$ ) e que o inversor tem três braços de acordo com a Figura 2.29, o inversor pode assumir oito estados diferentes. Na Tabela 2-3 podem ser vistos os oito estados possíveis do inversor e as respectivas tensões entre fases.

A transformada inversa de Park permite converter as componentes do vector de tensão do referencial rotacional do estator ( $V_d$  e  $V_q$ ) em componentes no referencial estacionário do estator ( $V_\alpha$  e  $V_\beta$ ). Através dos oito estados diferentes do inversor, é possível criar oito vectores (sendo dois deles vectores nulos), chamados switching state vectors (SSVs), que dividem o plano  $\alpha\beta$  em seis sectores. Assim, é possível representar qualquer vector através da soma dos switching state vectors adjacentes [27].

Tabela 2-3 - SSVs e tensões de fases [26]

$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_{AB}$	$V_{BC}$	$V_{CA}$	SSV
0	0	0	0	0	0	$V_{000}$
1	0	0	$V_{DC}$	0	$-V_{DC}$	$V_0$
1	1	0	0	$V_{DC}$	$-V_{DC}$	$V_{60}$
0	1	0	$-V_{DC}$	$V_{DC}$	0	$V_{120}$
0	1	1	$-V_{DC}$	0	$V_{DC}$	$V_{240}$
0	0	1	0	$-V_{DC}$	$V_{DC}$	$V_{300}$
1	0	1	$V_{DC}$	$-V_{DC}$	0	$V_{360}$
1	1	1	0	0	0	$V_{111}$

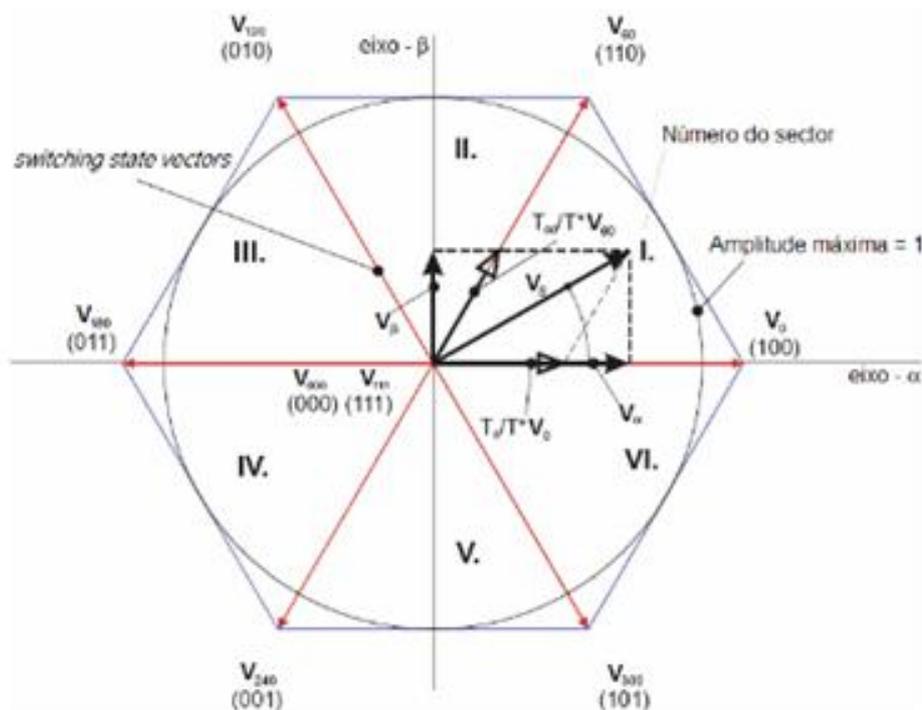


Figura 2.30 - Representação vectorial de um inversor de três braços[27]

A técnica SVM consiste basicamente em três etapas:

- Identificação do sector onde se encontra o vector  $V_s$ ;
- Decomposição do vector  $V_s$  nos switching state vectors adjacentes,  $V_x$  e  $V_{x-60}$ ;
- Cálculo do PWM em função do duty cycle.

Este método de controlo será aprofundado mais a frente no capítulo 4.

#### 2.3.3.4 - Controlo por orientação de campo com base em sensores de Hall

Na Figura 2.31 é apresentado o diagrama de blocos do controlador por orientação de campo de motores síncronos de ímanes permanentes com base em sensores de Hall.

Como é possível observar o bloco “Estimador de  $\omega$  e  $\theta_e$ ” determina a velocidade e a posição instantânea do rotor. A estimação da velocidade é utilizada para determinar o erro de velocidade que é aplicado a um controlador PI que gera a referência da corrente  $I_q$ . A estimação da posição do rotor é utilizada para calcular a projecção das correntes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  na referencial dq e a projecção de  $V_q$  e  $V_d$  no referencial  $\alpha\beta$  realizada no interior do bloco SVM.

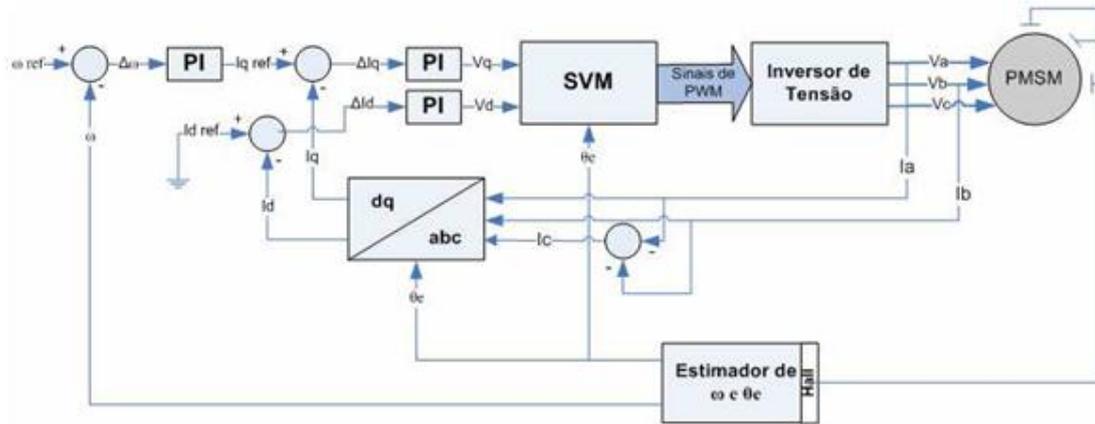


Figura 2.31 - Diagrama de blocos do Controlo por orientação de campo com base em sensores de Hall

### 2.3.4 - Comparação dos Sistemas de Propulsão

Analisando comparativamente os sistemas de propulsão eléctrica mencionados anteriormente, o motor de indução e o motor síncrono de ímanes permanentes são actualmente os sistemas de propulsão mais adequados a aplicações em veículos eléctricos. Esta afirmação resulta dos três factores determinantes para a selecção do conjunto motor controlador sendo eles o rendimento, o peso e o custo.

Na

Tabela 2-4 é possível verificar a comparação existentes entre os quatro tipos de motores mencionados anteriormente, dos quais se destacam como já referido o motor síncrono de ímanes permanentes e o motor de indução.

Sabendo que cada tipo de motor tem o seu respectivo controlador, pode-se diferenciar o rendimento do motor, do controlador e do conjunto motor e controlador, Tabela 2-4. Os valores referentes ao rendimento encontram-se em percentagem (%).

Relativamente ao peso estabeleceu-se o valor 1 ao motor síncrono de ímanes permanentes de modo a se efectuar uma comparação com os restantes tipos de motores. O sistema de comparação apresentado para o peso é também utilizado para comparar o custo.

Tabela 2-4 - Comparação dos sistemas de propulsão [28]

	Rendimento (%)			Peso		Custo
	Motor	Controlador	Motor e controlador	Motor	Motor e controlador	
Motor de corrente contínua	80	98	78	4	4,5	2
Motor de indução	90	93	84	2	3	0,5
Motor Síncrono de Ímanes Permanentes	97	93	90	1	2	1
Motor de Relutância comutado	94	90	85	1,5	2,5	1,5

É importante ressaltar que a eficiência da máquina depende da relação binário-velocidade imposta pelo ciclo de condução, e se a máquina está a funcionar na região de enfraquecimento de campo ou não. A área de alta eficiência para uma máquina de indução é mostrada para estar entre as áreas de alta eficiência de um PMSM e um SRM, Figura 2.32.

Na verdade através da Figura 2.32 é possível concluir que o PMSM consegue ter rendimentos superiores a baixas velocidades e com binários bastante elevados, performance importante na tracção eléctrica. Assim sendo, o PMSM consegue ter as melhores prestações relativamente aos restantes motores referenciados.

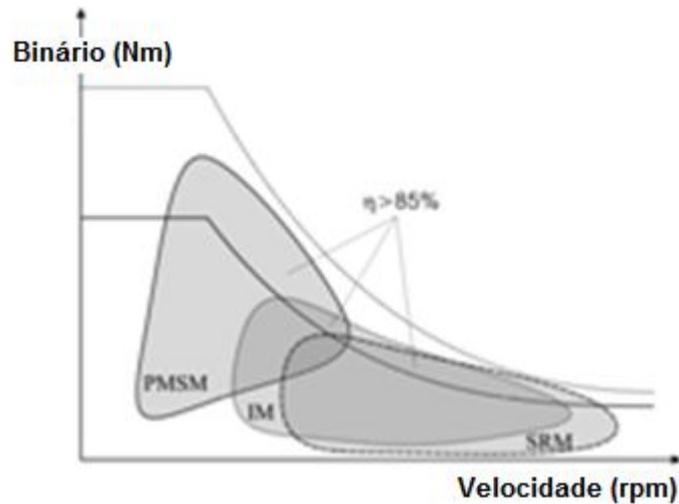


Figura 2.32 - Característica Binário-Velocidade comparativa dos vários tipos de motores

## 2.4 - Sistemas de Armazenamento de Energia

O sistema de armazenamento de energia não está directamente relacionado com o sistema de propulsão do EV, apesar de ser bastante importante visto ser a fonte de armazenamento e fornecimento de energia ao sistema de propulsão.

Para que o sistema de propulsão funcione correctamente é necessário garantir um bom dimensionamento da fonte de energia bem como do seu comportamento.

Na verdade este sistema constitui o principal obstáculo à comercialização dos veículos eléctricos, devido ao preço/densidade de energia. Na escolha da fonte de energia para um veículo é necessário ter em conta a sua densidade de energia (Wh/kg) e de potência (W/kg), de modo a ter autonomia e aceleração suficiente, respectivamente. Existem, no entanto, outro tipo de características desejadas tais como: rápida carga, descarga completa, baixo custo, ciclo de vida elevado, taxa de auto-descarga e de carga de alta eficiência, seguras, livre de manutenção, amigas do ambiente e recicláveis.

Na Figura 2.33 é representado um mapa de densidade de energia e de potência de várias fontes de energia.

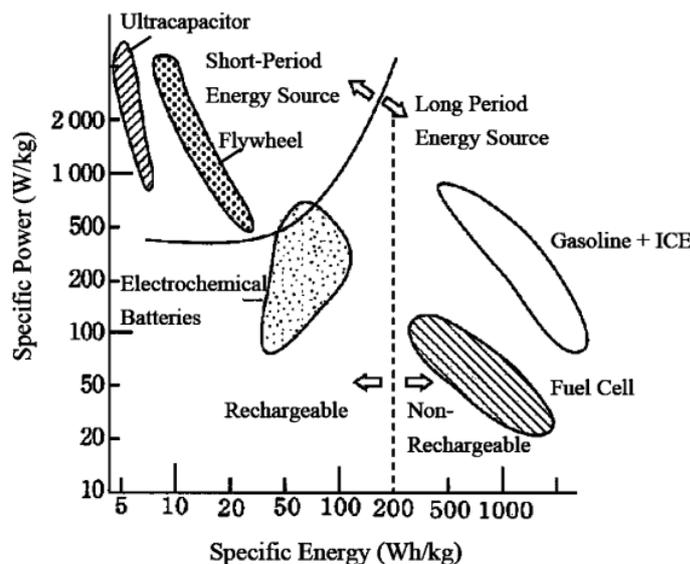


Figura 2.33 - Características dos distintos sistemas de armazenamento de energia

O uso de múltiplas fontes de energia permite eliminar o compromisso entre a densidade de energia e de potência, resultando na escolha de fontes de energia em extremos opostos do gráfico apresentado (elevado valor de energia específica e de potência específica). No caso do HEV, a gasolina é uma fonte de elevada energia específica com o objectivo de aumentar a autonomia do veículo e a bateria é uma fonte recarregável com o objectivo de ajudar nas acelerações, reduzir as emissões e usada na travagem regenerativa. Normalmente, nos sistemas com baterias e supercondensadores, o funcionamento é realizado à base das baterias e, os picos gerados durante as cargas (Travagens) e descargas (Acelerações e subidas) das baterias são fornecidos pelos supercondensadores, resultando em menor potência fornecida por estas, aumentando assim a eficiência [15, 29].

Existem opiniões de que a densidade de energia e potência das actuais baterias e dos condensadores são suficientes para conceber veículo eléctricos atractivos. Por outro lado, os críticos afirmam que ainda é cedo. Outros problemas associados a estas fontes de energia são o ciclo de vida e o custo [18].

#### 2.4.1 - Baterias

As tecnologias principais de baterias usadas actualmente na indústria automóvel reduzem-se a dois tipos: hidreto metálico de níquel (NiMH) e iões de lítio (Li-Ion), Figura 2.34.

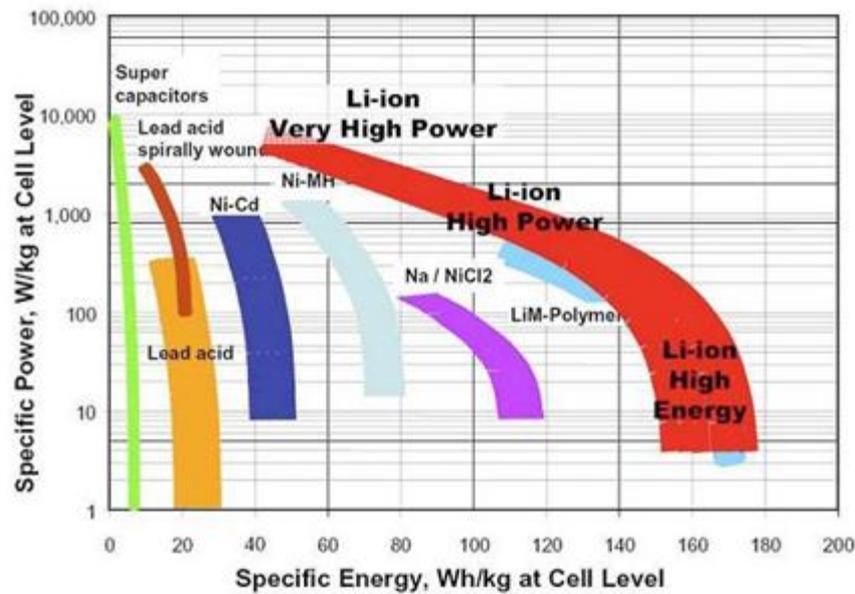


Figura 2.34 - Características de várias tecnologias de baterias [30]

As baterias NiMH são usadas na maioria dos HEVs vendidos. Os pontos fortes destas baterias são a longevidade, o ciclo de vida e a segurança. Os pontos fracos resumem-se em limitações na densidade de potência e energia e baixas perspectivas de redução de custo.

Por outro lado, a tecnologia Li-Ion apresenta o potencial de corresponder aos requisitos de uma grande variedade de veículos eléctricos. Apresentam maior densidade de potência e energia do que as NiMH, mas requerem um maior controlo de tensão e temperatura das células. Actualmente, as atenções no desenvolvimento de baterias para a indústria automóvel estão viradas para as tecnologias Li-Ion e para tecnologias magnésio enxofre. O desenvolvimento destas baterias dá-se em múltiplas direcções conforme o material usado na sua construção.

No entanto, o desenvolvimento de baterias Li-Ion está limitado a trocas de entre as seguintes categorias: densidade de potência e de energia, durabilidade, segurança e custo. Por exemplo, o aumento da densidade de potência requer maior tensão que reduz a longevidade e segurança e aumenta o custo. O aumento da densidade de energia tende a reduzir a densidade de potência. Ao optimizar a densidade de potência e energia, longevidade e segurança irá aumentar o custo da bateria. De referir ainda a importância da tipologia, do desempenho e do perfil de uso do veículo eléctrico na definição de metas tecnológicas das baterias [10]. Existem grandes ambições de diferentes entidades, quer nas características energéticas, como também associadas ao ciclo de vida da bateria, existindo grandes investimentos de modo a melhorar estes parâmetros.

“Numa entrevista à margem do Salão de Detroit, os responsáveis pela marca japonesa (Toyota) adiantaram ainda que a marca estará a desenvolver uma bateria de magnésio e enxofre, que terá o dobro da capacidade das actuais baterias de iões de lítio e aumentar significativamente a autonomia dos modelos eléctricos.”- Automotor 2011-01-14

### 2.4.2 - Supercondensadores

A utilização de supercondensadores como armazenamento de energia esteve sempre muito condicionada, devido às limitações existentes na densidade de energia e na gama de capacidades que lhes é característica. Com os desenvolvimentos tecnológicos surgiram condensadores electroquímicos (ou de dupla-camada), que conseguem aliar o pouco volume com densidades de energia e capacidades bastante mais elevadas que os condensadores usuais.

Actualmente, os supercondensadores podem carregar-se e descarregar-se quase indefinidamente, têm um tempo de vida útil muito longo, permitem correntes de descarga elevadas, os tempos de carga e de descarga são semelhantes e bastante curtos (30 segundos aproximadamente), são fabricados com materiais não tóxicos, relativamente baratos e apresentam um rendimento bastante elevado. São utilizados nos veículos de propulsão eléctrica, como fonte de armazenamento de energia auxiliar ou como buffers de energia eléctrica ao absorverem os picos de carga existentes no sistema e, como resultado, alongam o tempo de vida das baterias, devido à menor utilização destas [29].

### 2.4.3 - Pilhas de Combustível (Full-Cell)

Ao contrário das baterias, a pilha de combustível é um aparelho electroquímico que gera continuamente energia, em vez de a armazenar, enquanto lhe for fornecido hidrogénio. A eficiência da conversão, o funcionamento sem ruído, as emissões praticamente nulas, o rápido reabastecimento e a durabilidade, são algumas das vantagens deste tipo de tecnologia. O hidrogénio parece ser o combustível não poluente ideal, pois apresenta grande densidade de energia e o produto da reacção da pilha de combustível é apenas água [15].

De acordo com a Figura 2.33, a energia específica da pilha de combustível é equivalente à da gasolina, contudo, a sua potência específica é bastante menor, concluindo-se que o desempenho do arranque de um veículo com pilha de combustível seria inferior em comparação com o do veículo convencional. A integração da bateria ou supercondensador com a pilha de combustível podem melhorar o desempenho do arranque do veículo, tornando a realçar que, com múltiplas fontes de energia criteriosamente seleccionadas, o desempenho dos veículos pode ser bastante melhorado [18].

Este tipo de tecnologia é visto como uma solução a longo prazo, mas encontra-se ainda numa fase prematura, principalmente devido a todos os problemas associados ao manuseamento e armazenamento do hidrogénio.

## 2.5 - Conclusão

Este capítulo abranger toda a temática necessária à compreensão do princípio de funcionamento dos veículos eléctricos, destacando todos os sistemas e controlos fundamentais.

Através do estudo comparativo tanto ao nível das máquinas eléctricas como das técnicas de controlo utilizadas nos controladores, concluiu-se que o PMSM consegue superar as restantes máquinas pois permite ter rendimentos superiores a baixas velocidades e com binários bastante elevados.

Por outro lado, o método de controlo que permite retirar a máxima performance do conjunto máquina eléctrica e controlador é o SVM, pois consegue fornecer níveis de tensão mais elevados e menor distorção harmónica que os restantes métodos apresentados.

Através dos sistemas de alimentação estudados concluiu-se que a interligação dos supercondensadores como as baterias será cada vez uma realizada, tendo os supercondensadores a função de armazenar e fornecer energia muito rapidamente protegendo assim as baterias

Desta forma será aprofundado no capítulo 3 a máquina eléctrica de ímanes permanentes e por conseguinte no capítulo 4 o controlo Space Vector Modulation.



## Capítulo 3

# Motores Síncronos de Ímanes Permanentes

No capítulo anterior conclui-se que o motor PMSM tem a melhor performance, sendo o mais indicado a utilizar na tracção de veículos eléctricos. Desta forma o presente capítulo incidirá sobre o processo de construção do PMSM, bem como dos materiais construtivos utilizados.

Após a apresentação da máquina, serão detalhados os procedimentos para obtenção de um modelo no referencial síncrono dq para um motor com rotor a íman permanente.

A mudança construtiva deste tipo de motor em relação ao motor síncrono convencional dá-se no rotor, onde o enrolamento bobinado sobre o núcleo de material ferro-magnético é substituído por um maciço ferro-magnético coberto por um material magnético (íman), no qual os pólos fornecem um fluxo magnético co-senoidal no entreferro.

O modelo trifásico convencional não se mostra adequado para o uso em controlo, pois, as grandezas do estator estão segundo um referencial estacionário, estando as grandezas do rotor segundo um referencial girante com a velocidade do rotor. Este facto origina que as indutâncias apresentem dependência temporal, o que torna complexa a resolução das equações dinâmicas. Com o uso de transformações adequadas entre sistemas de coordenadas pode-se obter um modelo bifásico num único referencial.

Com base no exposto, será apresentada uma transformação entre o sistema de representação trifásico e um sistema de representação bifásico equivalente do ponto de vista magnético e da potência absorvida. Para tal, são estabelecidas as relações entre os parâmetros eléctricos do sistema de representação trifásica, que é o caso físico real, e os parâmetros eléctricos do sistema equivalente de representação bifásica. Posteriormente, será apresentada a transformação de rotação entre referenciais bifásicos e sua aplicação ao motor.

O modelo do motor será explicitado em termos das dinâmicas das seguintes variáveis: posição ( $\theta$ ), velocidade do eixo do motor ( $\omega$ ), corrente de eixo directo ( $i_d$ ) e corrente de eixo

em quadratura ( $i_q$ ) do estator, de modo a ser possível posteriormente implementar uma técnica de controlo do motor.

### 3.1 - Constituição

As máquinas eléctricas partem todas do mesmo princípio, transformar energia eléctrica em energia mecânica, sendo constituídas por uma parte móvel (rotor) e por uma parte fixa (estator).

Sendo o PMSM uma máquina eléctrica, possui também um rotor e um estator, mas a sua construção pode variar entre fluxo axial ou radial.

A máquina PMSM de fluxo axial pode ser configurada de diversas formas permitindo adequar a estrutura da máquina à sua aplicação, sendo possível alterar o número de rotores e de estatores bem como a sua disposição. As configurações possíveis são:

- Estrutura com um rotor e um estator, Figura 3.1(a).
- Estrutura, em que o estator está localizado entre os rotores, Figura 3.1(b).
- Estrutura, na qual o rotor está localizado entre os estatores, Figura 3.1(c).
- Estrutura de vários estados, incluindo três rotores e dois estatores, Figura 3.1(d).

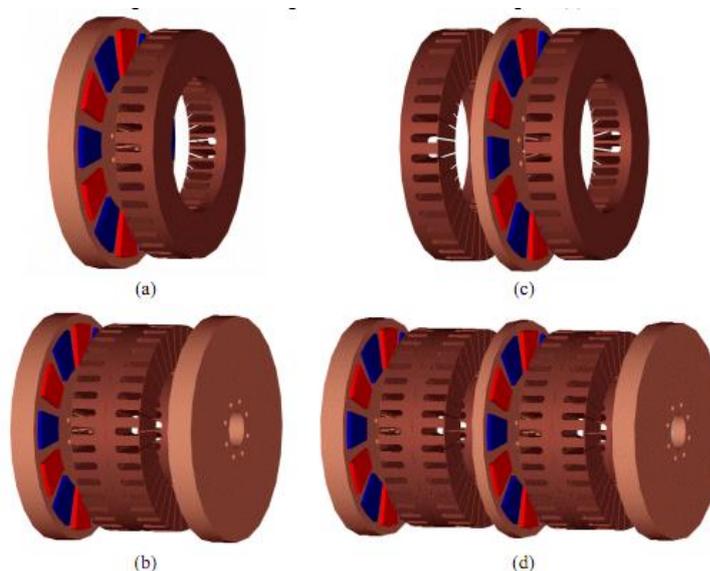


Figura 3.1 - Configurações da máquina PMSM de fluxo axial [31]

A máquina a utilizar na vertente prática desta dissertação é um PMSM de fluxo axial - PMS 150W da empresa [PERMMOTOR](#). Através da Figura 3.2, é possível determinar o tipo de configuração utilizada nesta máquina sendo ela uma máquina síncrona de ímanes permanentes de fluxo axial (Figura 3.1 (c)).

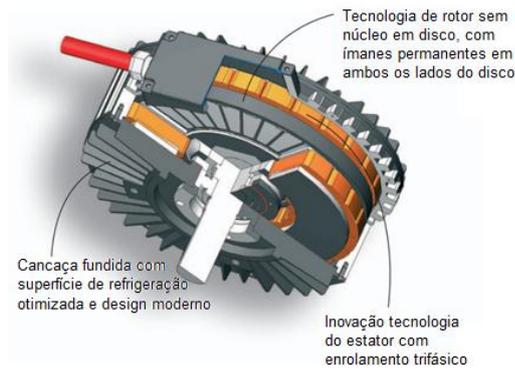


Figura 3.2 - PERM MOTOR PMS 150W - Constituição e Construção[32]

Na Figura 3.3, é possível observar a estrutura do rotor em disco de uma máquina síncrona de ímanes permanentes bem como os ímanes permanentes e a sua disposição ao longo do disco.



Figura 3.3 - Rotor de um PMSM de fluxo axial (esquerda) e um dos ímanes permanentes (direita) [31]

Em ambos os lados do rotor estão dois estatores laminados com ranhuras radiais orientadas, que assumem o enrolamento trifásico, Figura 3.4. Devido a essa divisão do estator em duas partes simétricas consegue-se melhorar a troca de calor com o exterior através das alhetas de alumínio. O binário de interação entre os ímanes permanentes do rotor e as ranhuras do estator (*cogging*) é praticamente eliminado através de uma tecnologia especial onde núcleo do estator é fechado [32].

O fluxo magnético criado nos ímanes permanentes corre axial ao longo das duas condutas de ar e através dos dentes dos núcleos do estator. Assim sendo, consegue-se ter uma máquina com pouco peso e com muito baixa inércia com a particularidade de possuir um núcleo [32].



Figura 3.4 - Estator de um PMSM de fluxo axial antes (esquerda) e depois de bobinar (direita) [31]

Já no que concerne à máquina de fluxo radial a configuração mais utilizada é aquela em que o estator é externo e o rotor é interno, tal como ilustrado na Figura 3.5 (a-b).

A configuração da máquina PMSM com rotor externo e estator interno, Figura 3.5 (c), é apropriada para aplicações onde o rotor pode ser integrado directamente no sistema a movimentar. Esta configuração encontra-se neste momento a ser muito utilizada nos veículos eléctricos com motores na roda (*InWheel*).

A configuração apresentada na Figura 3.5(d), representa uma máquina com um estator entre dois rotores. Esta configuração tem uma estrutura mecânica bastante elaborada que aumenta significativamente o binário e reduz o volume da máquina. Estando o estator localizado no interior da máquina a dissipação do calor torna-se muito difícil o que requer uma recirculação de ar muito eficiente no interior da máquina.

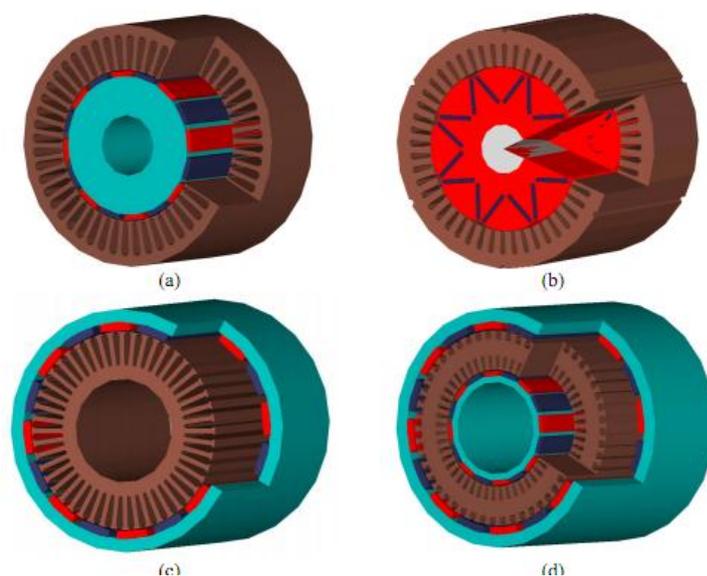


Figura 3.5 - Configurações da máquina PMSM de fluxo radial [31]

Em contraste com as máquinas de fluxo axial, que são fabricadas quase exclusivamente com ímanes à superfície, as máquinas de fluxo radial permitem várias configurações relativamente à localização dos ímanes no rotor, como é possível visualizar na Figura 3.6.

A montagem dos ímanes à superfície é bastante simples manufactura e assemblagem. Os ímanes permanentes colocados à superfície do rotor limitam a velocidade de rotação da máquina pois as forças centrífugas que estes sofrem aumentam com a velocidade de rotação, o que pode originar um desacoplamento do íman.

Existem já várias soluções que permitem a fixação dos ímanes ao rotor, como é o caso:

- Materiais compósitos como a fibra de vidro ou carbono;
- Reforço cilíndrico de aço inoxidável;

A primeira técnica cria dificuldades relativamente à dissipação de calor no rotor. A segunda técnica apresenta também problemas relativamente às correntes de Foucault e ao conteúdo harmónico induzido pelas correntes de alimentação.

Existem várias configurações com os ímanes enterrados, Figura 3.6 (d-f). Estas configurações são de maior complexidade de manufactura e de montagem, mas permitem uma maior velocidade de rotação do rotor sem por em risco os ímanes.

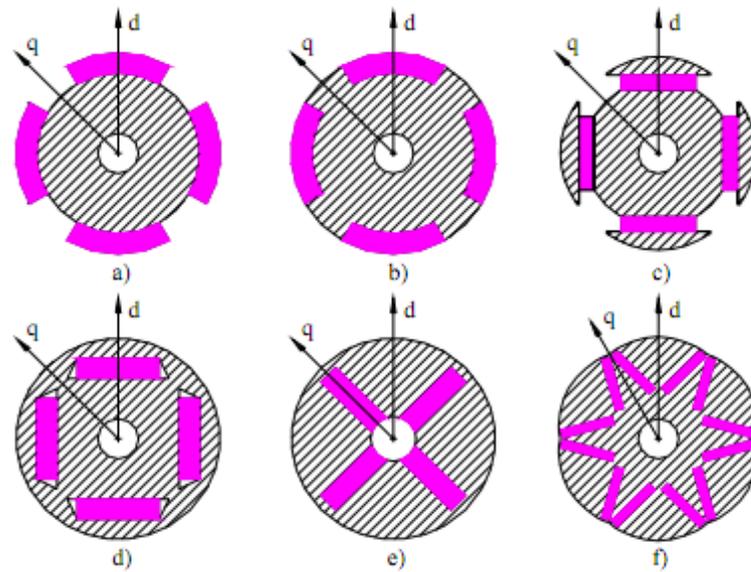


Figura 3.6 - Distribuição dos ímanes permanentes no rotor [31]

### 3.1.1 - Materiais dos ímanes permanentes

O desempenho da máquina é afectado directamente pelas propriedades dos materiais do qual os ímanes permanentes são constituídos. A principal forma de melhorar e perceber o desempenho da máquina tem por base o conhecimento dos materiais bem como a sua selecção.

Os primeiros materiais magnéticos eram fabricados em aço endurecido, visto serem facilmente magnetizados, no entanto, tinham propriedades fracas devido à muito baixa densidade de fluxo e à fácil desmagnetização.

Nos últimos anos outros materiais magnéticos como alumínio, níquel e ligas de cobalto (ALNICO), de ferrite de estrôncio ou de ferrite de bário (ferrite), samário cobalto (primeira geração de ímanes de terra rara) (SmCo) e neodímio-ferro boro (segunda geração de ímanes de terra rara) (NdFeB) têm sido desenvolvidos e utilizados nos ímanes permanentes.

Os ímanes de terras raras são classificados em duas classes: samário cobalto (SmCo) e ímanes de neodímio ferro boreto (NdFeB). Os ímanes de SmCo têm níveis mais elevados de

densidade de fluxo, mas são muito caros. Os ímanes de NdFeB são neste momento os mais utilizados nas máquinas eléctricas de ímanes permanentes.

A densidade de fluxo de magnetização versus campo dos ímanes inumerados acima é ilustrada na Figura 3.7.

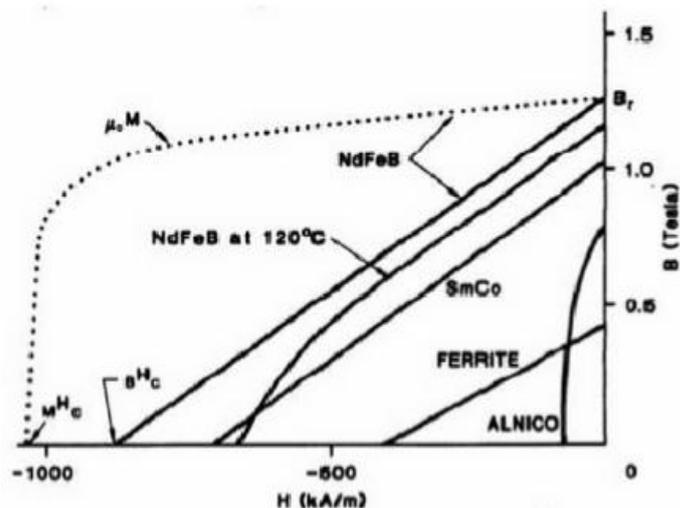


Figura 3.7 - Densidade de fluxo de magnetização versus campo dos ímanes permanentes [33]

## 3.2 - Modelo dinâmico do PMSM

Nas subsecções seguintes aborda-se a modelação dinâmica do PMSM, baseado no exposto na referência [34]. Inicialmente apresenta-se a transformada de Clark que transforma a representação trifásica numa representação bifásica. Com esta transformação ocorre a redução da ordem. Posteriormente, realiza-se a transformação de rotação, que projecta a representação bifásica num único referencial bifásico estacionário. Maiores detalhes sobre a transformada de Park e Clark são apresentados no anexo A.

Desta forma e realizando os passos anteriores obtém-se o modelo do motor síncrono em coordenadas dq, sendo possível realizar o projecto dos controladores para a corrente de eixo directo e para a posição angular.

### 3.2.1 - Transformação Trifásico-Bifásica: Transformada de Clark

A Figura 3.8 apresenta o modelo trifásico do PMSM no eixo de referência estacionário.

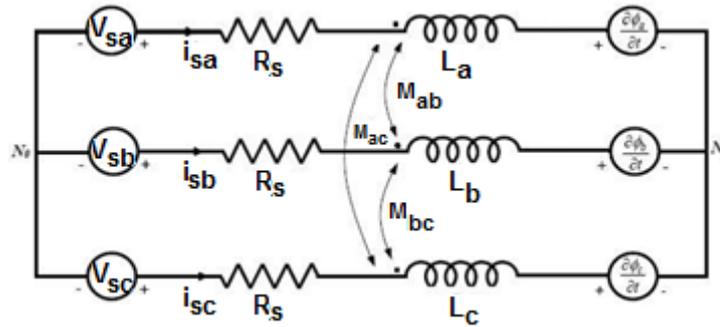


Figura 3.8 - Modelo trifásico do PMSM

A partir das leis da física, pode-se obter a equação matricial dos enrolamentos do estator:

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi'_a \\ \phi'_b \\ \phi'_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Considerando que  $M_{ab}$ ,  $M_{ac}$ ,  $M_{bc}$  são os valores das indutâncias mútuas entre as respectivas fases do estator, podemos representar a equação matricial do fluxo do estator:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Onde  $\phi_{ar}$ ,  $\phi_{br}$ ,  $\phi_{cr}$  são os fluxos concatenados do rotor com as fases do estator. Através da distribuição senoidal da indução magnética no entreferro obtém-se:

$$\begin{aligned} \phi_{ar} &= \phi_{arm} \cos \theta \\ \phi_{br} &= \phi_{arm} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \phi_{cr} &= \phi_{arm} \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Sendo  $\phi_{srm}$  o fluxo máximo concatenado do rotor com as fases do estator. Então a equação 3.3 na forma compacta é representada da seguinte forma:

$$[\phi_{s3}] = [L_{s3}][i_{s3}] + [\phi_{sr}] \quad (3.4)$$

Sendo:

$$[\phi_{sr}] = [\phi_{sr} \quad \phi_{br} \quad \phi_{cr}]^T \quad (3.5)$$

Considerando-se a variação da relutância segundo a direcção radial do rotor, como ocorre nas máquinas de pólos salientes. As indutâncias próprias e mútuas, podem ser modeladas em

função do ângulo de deslocamento do rotor e da distribuição senoidal do fluxo no entreferro sendo representadas por:

$$\begin{aligned}
 L_a &= L_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\
 L_b &= L_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \\
 L_c &= L_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \\
 M_{ab} &= -\frac{1}{2}L_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \\
 M_{ac} &= -\frac{1}{2}L_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \\
 M_{bc} &= -\frac{1}{2}L_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Após definidas as equações electromagnéticas que representam o comportamento do motor síncrono de ímanes permanentes, pode-se aplicar a transformada de Clark às equações do estator. Assim sendo, o estator trifásico é transformado no seu equivalente bifásico, no referencial estacionário. A transformação utilizada é definida pela matriz K (anexo A):

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Sendo esta invariante relativamente à potência, temos que  $[K]^{-1} = [K]^T$ .

Aplicando a transformação K na equação 3.2:

$$K[v_{s3}] = K[R_{s3}][i_{s3}] + [\phi'_{s3}] \tag{3.8}$$

A relação de transformação de K permite escrever:

$$[i_{s3}] = K^{-1}[i_{s20}] \tag{3.9}$$

Sendo  $[i_{s20}] = [i_\alpha, i_\beta, i_0]^T$ , com  $i_0$  representando a componentes de sequência zero.

Aplicando a equação 3.9 na equação 3.8, temos:

$$K[v_{s3}] = K[R_{s3}]K^{-1}[i_{s20}] + K[\phi'_{s3}] \tag{3.10}$$

Assumindo a máquina como sendo simétrica e equilibrada, as componentes de sequência zero, tanto para a corrente ( $i_0$ ) como para a tensão ( $v_0$ ), são nulas, e serão desprezadas, o

que leva a definir o novo vector da corrente do estator no referencial bifásico estacionário  $i_{s2}$ , como  $[i_{s2}] = [i_\alpha, i_\beta]^T$ .

Na verdade, como  $[R_{s3}]$  é proporcional à matriz identidade, sabe-se que  $K[R_{s3}]K^{-1} = [R_{s3}]$ . Assim pode-se escrever:

$$[v_{s2}] = [R_{s3}][i_{s2}] + [\phi'_{s2}] \quad (3.11)$$

Sendo:

$$[v_{s2}] = [v_\alpha, v_\beta]^T, [\phi_{s2}] = [\phi_\alpha, \phi_\beta]^T \text{ e } R_{s2} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Observa-se que  $v_{s2}$  e  $\phi_{s2}$  já estão definidos desprezando as respectivas componentes de seqüência zero. Pode-se verificar que a matriz está definida como a sub-matriz (2x2) da matriz  $R_{s2}$ , onde se despreza a terceira linha e a terceira coluna.

Do mesmo modo, se aplicarmos a transformação K na equação 3.5 temos:

$$K[\phi_{s3}] = K[L_{s3}][i_{s3}] + K[\phi_{sr}] \quad (3.12)$$

Utilizando a relação dada pela equação 3.9 podemos escrever:

$$K[\phi_{s3}] = K[L_{s3}]K^{-1}[i_{s2}] + K[\phi_{sr}] \quad (3.13)$$

Finalmente, obtemos a seguinte equação para o fluxo do estator no referencial bifásico:

$$[\phi_{s2}] = [L_{s2}][i_{s2}] + \sqrt{\frac{3}{2}} \phi_{r2} [M_\theta] \quad (3.14)$$

Sendo  $\phi_{r2} = \phi_{sr}$ ,  $M_\theta = [\cos \theta, \sin \theta]^T$  e a matriz  $L_{s2}$  é dada por:

$$L_{s2} = \begin{bmatrix} 1,5L_s + 1,5L_m - 3L_m \cos^2 \theta & -3L_m \sin \theta \cos \theta \\ -3L_m \sin \theta \cos \theta & 1,5L_s + 1,5L_m + 3L_m \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Se substituirmos a equação 3.14 em 3.11, obtemos:

$$[v_{s2}] = [R_{s2}][i_{s2}] + L_{s2}[i'_{s2}] + L_{s2l}\theta'[i_{s2}] + [M_{\theta l}]\theta'k_m \quad (3.16)$$

Onde:

$$k_m = \sqrt{\frac{3}{2}} \theta_{r2}, M_\theta = [-\sin \theta, \cos \theta]^T \text{ e } :$$

$$L_{s2} = \begin{bmatrix} 6L_m \sin \theta \cos \theta & 3L_m (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) \\ 3L_m (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) & -6L_m \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Da equação 3.16 pode-se escrever a equação dinâmica das correntes como:

$$[i'_{s2}] = -[L_{s2}]^{-1}[R_{s2}][i_{s2}] - [L_{s2}]^{-1}[v_{s2}] L_{s2l} \theta' [i_{s2}] - [L_{s2}]^{-1}[M_{\theta l}] \theta' k_m + [L_{s2}]^{-1}[v_{s2}] \quad (3.18)$$

### 3.2.2 - Transformação de Rotação: Transformada de Park

Até este ponto, o que se tem é o modelo de uma máquina equivalente bifásica onde as grandezas trifásicas físicas do estator foram transformadas segundo um referencial bifásico ortogonal estacionário e as grandezas do rotor estão segundo o seu referencial girante. O passo seguinte é a transformação de todas as grandezas da máquina para um único sistema de coordenadas fixado no rotor, conhecido na literatura como sistema de coordenadas síncrono dq. A transformação do sistema  $\alpha\beta$  para o sistema dq é dada pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} v_d = v_\alpha \cos \theta + v_\beta \sin \theta \\ v_q = -v_\alpha \sin \theta + v_\beta \cos \theta \\ v_0 = v_0 \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Portanto, a matriz de rotação é matematicamente definida por:

$$\tau = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Considerando o sistema trifásico equilibrado,  $v_0 = 0$ . Portanto, excluindo na matriz a última linha e coluna, a matriz da transformação de rotação fica:

$$\tau = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

A qual transforma as grandezas do referencial  $\alpha\beta$  em grandezas no referencial dq. Em síntese, o referencial dq é um sistema de eixos ortogonais onde o eixo directo é alinhado com o eixo directo do rotor e, portanto, gira com velocidade igual à do rotor (Figura 3.9). Aplicando-se a transformação de rotação na equação 3.16 tem-se:

$$\tau[V_{s2}] = \tau[R_{s2}][i_{s2}] + \tau L_{s2} [i'_{s2}] + \tau L_{s2l} \theta' [i_{s2}] + [M_{\theta l}] \theta' m \quad (3.23)$$

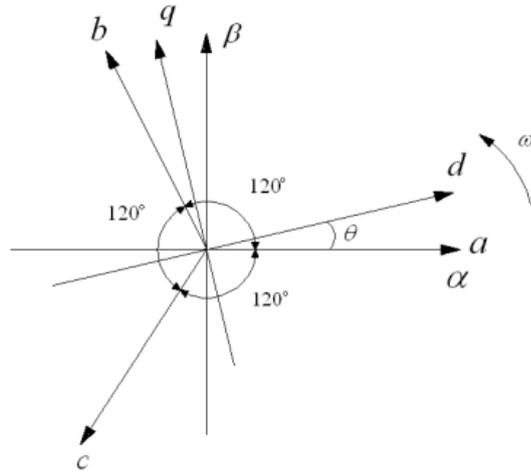


Figura 3.9 - Sistemas de coordenadas do PMSM[35]

Pela transformação de rotação, a relação entre as correntes no referencial estacionário  $\alpha\beta$  e o referencial dq é dado por:

$$[i_{s2}] = \tau^{-1}[i_{dq}] \quad (3.24)$$

Sendo:

$$i_{dq} = [i_d, i_q]^T$$

Derivando os dois lados da equação 3.23 obtemos:

$$i'_{s2} = \tau'^{-1}\theta'[i_{dq}] + \tau^{-1}[i'_{dq}] \quad (3.25)$$

Aplicando 3.25 e 3.24 em 3.23 temos:

$$\tau[v_{s2}] = \tau[R_{s2}]\tau^{-1}[i_{dq}] + \tau L_{s2}\tau\theta'[i_{dq}] + \tau L_{s2}\tau\theta'[i'_{dq}] + \tau L_{s2l}\tau\theta'[i_{dq}] + \tau[M_{\theta l}]\theta'k_m \quad (3.26)$$

Como um dos objectivos deste estudo é obter as relações entre os parâmetros do modelo bifásico e os parâmetros físicos da máquina, desenvolvendo o coeficiente do segundo termo da equação anterior, pode-se escrever:

$$L_{dq} = \begin{bmatrix} 1,5(L_s - L_m) & 0 \\ 0 & 1,5(L_s + L_m) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Com respeito às indutâncias para o modelo do motor no referencial dq, vamos definir as indutâncias em função do eixo directo ( $L_d$ ) e do eixo em quadratura ( $L_q$ ). Segundo os parâmetros físicos do motor ( $L_s$  e  $L_m$ ), são:

$$\begin{aligned} L_d &= 1,5(L_s - L_m) \\ L_q &= 1,5(L_s + L_m) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Resolvendo os demais coeficientes da equação 3.26, obtemos a seguinte expressão de tensão para o referencial dq:

$$v_{dq} = [R_{s2}][i_{dq}] + [L_{dq}]\theta'[i_{dq}] + [L_{dq}][i'_{dq}] + [L_{ldq}]\theta'[i_{dq}] + [M_{\theta dq}]\theta'k_m \quad (3.29)$$

Onde:

$$v_{dq} = [v_d, v_q]^T$$

$$L_{ldq} = \begin{bmatrix} 0 & 3L_m \\ 3L_m & 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$M_{\theta dq} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

A partir da equação 3.30, obtém-se a equação da dinâmica das correntes de estator no referencial dq como sendo:

$$[i'_{dq}] = [LR_{dq}][i_{dq}] + [LL_{dq}][i_{dq}]\theta' + [LM_{dq}]k_m\theta' + \theta'[i_{dq}] + [L_{dq}]^{-1}[i_{dq}] \quad (3.32)$$

Onde:

$$LR_{dq} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$LL_{dq} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3L_m}{L_d} \\ \frac{3L_m}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$LM_{dq} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Tem-se então determinado todas as equações de tensões e correntes para o estator segundo o referencial síncrono dq.

Com relação à equação mecânica, inicia-se analisando a equação da potência eléctrica absorvida pelo motor:

$$\begin{aligned}
 P &= v_d i_d + v_q i_q \\
 P &= L_d i_d i'_d + L_q i_q i'_q + R_s (i_d^2 + i_q^2) + [(L_d - L_q) i_d + k_m] i_q \theta'
 \end{aligned} \quad (3.36)$$

Na equação anterior, observa-se que a potência eléctrica é composta por três termos distintos: o primeiro pela potência ( $P_{mag}$ ) referente à energia armazenada no campo magnético dos enrolamentos de eixo directo e em quadratura do estator; um segundo termo, referente às perdas por efeito Joule nas resistências do estator ( $P_j$ ) e um termo relativo à potência mecânica ( $P_m$ ), desenvolvida no eixo do motor. De uma forma quantitativa, cada termo é dado por:

$$\begin{aligned}
 P_{mag} &= L_d i_d i'_d + L_q i_q i'_q \\
 P_j &= R_s (i_d^2 + i_q^2) \\
 P_m &= [(L_d - L_q) i_d + k_m] i_q \theta'
 \end{aligned} \quad (3.37)$$

A velocidade angular mecânica  $\omega_r$  relaciona-se com a velocidade angular eléctrica  $\omega$  pela seguinte equação:

$$\omega = \theta' = p \omega_r \quad (3.38)$$

Onde  $p$  é o número de pares de pólos.

Da relação mecânica conjugado-potência tem-se:

$$\begin{aligned}
 C_m &= \frac{P_m}{\omega} \\
 C_m &= p [(L_d - L_q) i_d + k_m] i_q
 \end{aligned} \quad (3.39)$$

A equação dinâmica do conjugado para o motor é dada por:

$$C_m - C_b - C_l = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.40)$$

Onde  $C_l$  é o conjugado de carga,  $J$  é o momento de inércia do sistema mecânico e  $C_b$  é o conjugado de perdas por atritos, modelado como proporcional à velocidade e ao atrito viscoso:

$$C_b = b \omega \quad (3.41)$$

Desta forma, define-se o modelo completo do motor a ímãs permanente como:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} [(L_d - L_q)i_d + k_m]i_q - \frac{b}{J} \omega - \frac{C_l}{J}$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{pL_q}{L_d} \omega i_q - \frac{1}{L_d} V_d$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_q + \frac{pL_d}{L_q} \omega i_d - p\omega \frac{k_m}{L_q} + \frac{1}{L_q} V_q$$
(3.42)

O modelo obtido para o motor síncrono no referencial dq é fundamental para a aplicação das técnicas avançadas para o controle de movimento do motor. O modelo apresenta equações de menor complexidade do que as equações do modelo trifásico, eliminando o acoplamento entre as indutâncias de estator e eliminando a variação temporal das indutâncias de estator e de rotor. A representação do modelo em diagrama de blocos é mostrada na Figura 3.10.

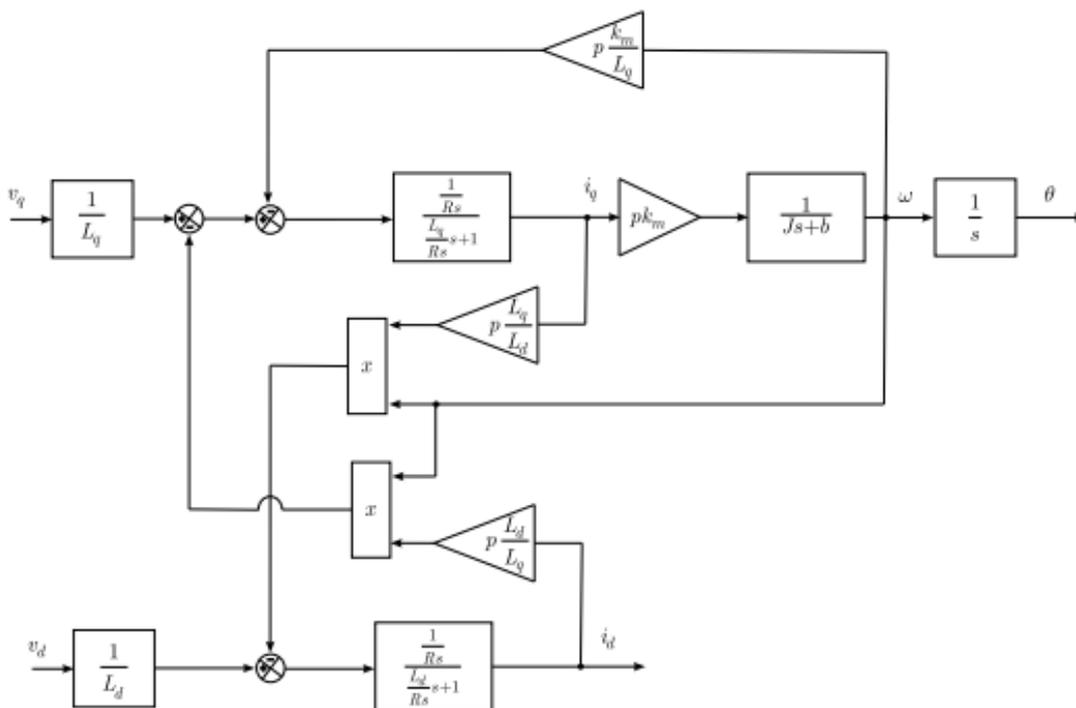


Figura 3.10 - Diagrama de blocos do modelo em coordenadas dq do PMSM [34]

### 3.3 - Conclusão

O estudo apresentado neste capítulo ostenta o princípio de funcionamento da máquina síncrona de ímanes permanentes, destacando inicialmente o complexo processo construtivo e os materiais típicos empregados na construção.

Na modelação dinâmica do PMSM, apresentou-se a transformação da representação trifásica numa representação bifásica, dando origem a uma redução da ordem. Posteriormente realiza-se a transformação de rotação, que projecta a representação bifásica num único referencial bifásico estacionário. Desta forma, obtém-se o modelo do motor síncrono em coordenadas dq. Assim, é possível realizar o projecto dos controladores para a corrente do eixo directo e para a posição angular.

No capítulo seguinte será apresentada a modulação SVM, visto permitir obter uma melhor performance da máquina, como se concluiu no capítulo 2.



# Capítulo 4

## Space Vector Modulation

Como visto no capítulo 2, a forma de onda da tensão sinusoidal aplicada ao PMSM pode ser obtida usando a técnica de modulação vectorial (SVM).

O algoritmo de controlo da orientação do campo permitirá controlar em tempo real o binário e a velocidade de rotação. Sendo este controlo muito preciso em todos os modos de operação [36].

Este capítulo aprofunda o princípio de funcionamento do controlo SVM, sendo mencionadas algumas das tecnologias de implementação mais utilizadas nesta vertente do controlo.

### 4.1 - Princípio de funcionamento

Esta técnica baseia-se na representação vectorial do inversor e realiza a transformação de tensões no plano  $\alpha\beta$  directamente em sinais de PWM. A utilização do SVM permite que este passo seja conseguido implementando apenas algumas equações [37].

Deve-se referir que com esta técnica a transformada inversa de Clarke está incluída na própria metodologia, utilizando as tensões nas coordenadas  $\alpha\beta$ .

Cada saída do inversor pode estar num de dois estados (ligado ao barramento positivo ou negativo). Como o inversor tem 3 saídas (3 fases), isso resulta num total de 8 estados possíveis, como mostrado na Tabela 2-3.

Como a entrada deste bloco está referenciada ao sistema de coordenadas  $\alpha\beta$  é necessário converter as tensões associadas a cada estado da tabela anterior para esse referencial. Depois de feita essa conversão, é possível representar os estados num diagrama vectorial (estrela SVM), o qual se apresenta na Figura 2.30.

O primeiro e último estado são considerados nulos pois todas as saídas estão ligadas ao mesmo barramento, pelo que a tensão entre linhas é nula. Estes estão representados na origem da estrela SVM. Os outros seis estados são vectores rodados 60 graus entre si [37].

O SVM permite então a representação de um vector resultante (referência de tensão do estator) como uma soma de componentes dos vectores adjacentes. Na Figura 2.30,  $U_{out}$  é o vector resultante, que está no sector entre  $U_0$  e  $U_{60}$ . Assim, durante um período de PWM ( $T$ ),  $U_0$  vai ser colocado na saída durante  $T_1$  e  $U_{60}$  durante  $T_2$ , obtendo-se como valor médio no período  $U_{out}$ . Aqui  $T_0$  representa o tempo no qual não é aplicada nenhuma tensão na saída, ou seja, é aplicado o estado nulo. Fazendo a análise para este caso, obtém-se as componentes  $U_{beta}$  e  $U_{alpha}$  de  $U_{out}$  (equação 4.1) [38].

$$\begin{aligned} T_0 &= \text{Null Vector} \\ T &= T_1 + T_2 + T_0 = \text{PWM Period} \\ U_{OUT} &= (T_1/T \cdot U_0) + (T_2/T \cdot U_{60}) \end{aligned}$$

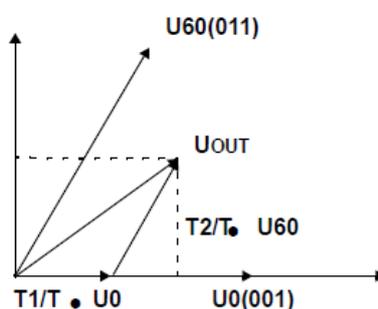


Figura 4.1 - Decomposição do vector referência de tensão [37].

$$\begin{cases} U_{beta} = \frac{T_2}{T} |U_{60}| \sin(60^\circ) \\ U_{alpha} = \frac{T_1}{T} |U_0| + \frac{T_2}{T} |U_{60}| \cos(60^\circ) \end{cases} \quad (4.1)$$

Procedendo a uma normalização pela tensão máxima por fase ( $V_{dc}/\sqrt{3}$ ), tem-se

$$t_1 = \frac{T_1}{T} = \frac{1}{2} (\sqrt{3} U_{alpha} - U_{beta}) \quad (4.2)$$

$$t_2 = \frac{T_2}{T} = U_{beta} \quad (4.3)$$

No entanto, é fácil perceber que estes valores apenas são válidos para referências de tensão no primeiro sector da estrela SVM. Pode-se no entanto mostrar que definindo as variáveis  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  se pode generalizar as expressões de  $t_1$  e  $t_2$  para todos os sectores, em função dessas 3 variáveis (equações 4.4 a 4.6 e Tabela 4-1) [38].

$$X = U_{beta} \quad (4.4)$$

$$Y = \frac{1}{2} (\sqrt{3} U_{alpha} + U_{beta}) \quad (4.5)$$

$$Z = \frac{1}{2}(-\sqrt{3}U_{\alpha} + U_{\beta}) \quad (4.6)$$

Tabela 4-1 - Definição de  $t_1$  e  $t_2$  para cada sector [38]

Sector	$U_0, U_{60}$	$U_{60}, U_{120}$	$U_{120}, U_{180}$	$U_{180}, U_{240}$	$U_{240}, U_{300}$	$U_{300}, U_0$
$t_1$	-Z	Z	X	-X	-Y	Y
$t_2$	X	Y	Y	Z	-Z	-X

No entanto, para se poder usar a tabela anterior é necessário saber em que sector se encontra o vector resultante. Para isso, converte-se as componentes  $(\alpha - \beta)$  da tensão de referência para um outro sistema de coordenadas, dado por,

$$\begin{cases} V_{ref1} = U_{\beta} \\ V_{ref2} = \frac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha} - U_{\beta}) \\ V_{ref3} = \frac{1}{2}(-\sqrt{3}U_{\alpha} - U_{\beta}) \end{cases} \quad (4.7)$$

Em seguida faz-se a seguinte análise [9]

If  $V_{ref1} > 0$  then  $a=1$ , else  $a=0$

If  $V_{ref2} > 0$  then  $b=1$ , else  $b=0$

If  $V_{ref3} > 0$  then  $c=1$ , else  $c=0$

Sendo o sector dado por  $4 \times c + 2 \times b + a$ .

Em seguida, falta apenas calcular o duty-cycle a aplicar a cada ramo do inversor. Para isso calcula-se  $t_{aon}$ ,  $t_{bon}$  e  $t_{con}$ .

$$\begin{cases} t_{aon} = \frac{1 - t_1 - t_2}{2} \\ t_{bon} = t_{aon} + t_1 \\ t_{con} = t_{bon} + t_2 \end{cases} \quad (4.8)$$

Mais uma vez, os valores a aplicar a cada ramo dependem do sector em que se está, pelo que se apresenta a seguinte tabela que generaliza os valores de  $T_a$ ,  $T_b$  e  $T_c$  (duty-cycle a aplicar nas fases a, b e c) de acordo com os valores calculados anteriormente para  $t_{aon}$ ,  $t_{bon}$  e  $t_{con}$ .

Tabela 4-2 - Atribuição dos *duty-cycles* para cada braço do inversor de acordo com o sector [38]

Sector	$U_0, U_{60}$	$U_{60}, U_{120}$	$U_{120}, U_{180}$	$U_{180}, U_{240}$	$U_{240}, U_{300}$	$U_{300}, U_0$
Ta	taon	tbon	tcon	tcon	tbon	taon
Tb	tbon	taon	taon	tbon	tcon	tcon
Tc	tcon	tcon	tbon	taon	taon	tbon

Na figura seguinte apresenta-se um exemplo do PWM resultante durante um período.

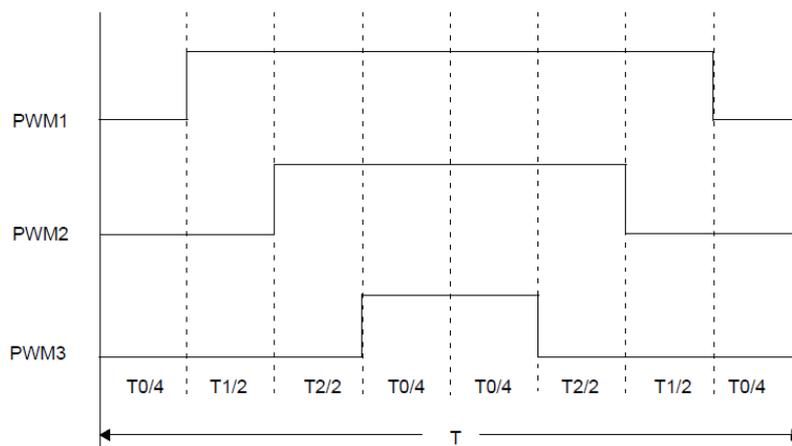


Figura 4.2 - Exemplo de sinais de comando aplicados ao inversor [37]

De forma resumida, para implementar o SVM é necessário [38]:

1. Determinar o sector
2. Calcular X, Y e Z
3. Calcular  $t_1$  e  $t_2$
4. Determinar o duty-cycle  $t_{aon}$ ,  $t_{bon}$  e  $t_{con}$
5. Atribuir os duty-cycles a Ta, Tb e Tc

Finalizado o princípio de funcionamento do SVM, conclui-se que este necessita de realizar operações de cálculo de elevada complexidade com tempos muito reduzidos. Desta forma torna-se relevante realizar uma análise das plataformas de desenvolvimento e implementação utilizados na implementação deste tipo de controlo.

## 4.2 - Plataformas de desenvolvimento e implementação de controladores de máquinas eléctricas

Nas subsecções seguintes aborda-se as plataformas de desenvolvimento e implementação de controlador, baseado no exposto na referência [27].

A variadíssima gama de dispositivos com capacidade de processamento de informação e com grande número de periféricos onde podem ser desenvolvidos e implementados controladores para motores eléctricos, são hoje em dia cada vez mais uma realidade. Os fabricantes disponibilizam ferramentas computacionais, tais como compiladores e simuladores, que permitam desenvolver controladores mais complexos num menor espaço de tempo. Grande parte desses fabricantes já possui uma gama de produtos especificamente vocacionados para a implementação de controladores de máquinas eléctricas [27].

Além da vertente dos microcontroladores existem também os circuitos lógicos programáveis tais como as FPGAs e as CPLDs (complex programmable logic device), onde estes controladores podem ser implementados [27].

Este tipo de controladores têm por base a aquisição dos sinais analógicos medidos pelos sensores e a sua conversão em sinais digitais, permitindo desta forma realizar o processamento do algoritmo de controlo com base nos novos dados adquiridos e geração dos sinais de comando do conversor electrónico de potência. Os algoritmos de controlo necessitam de ser adaptados de acordo com o tipo de máquina a controlar e da aplicação a que se destinam [27].

De seguida serão apresentados os principais dispositivos existentes no mercado para este efeito.

### 4.2.1 - Microcontroladores

Os microcontroladores são constituídos por uma unidade de processamento central (CPU- *Central Processing Unit*), módulos de memória, unidades de entradas e saídas, entre outros módulos responsáveis pela interligação de todos os módulos [27]. Estes dispositivos permitem obter um elevado nível de autonomia no controlo digital, uma vez que num único circuito integrado com capacidade de processamento e memória, reduzidas dimensões e baixo custo, é possível obter um conjunto de periféricos dedicados ao sistema onde o microcontrolador será integrado. Cada vez mais os microcontroladores são uma realidade existindo um elevado número de fabricantes com variadas gamas de modelos de 8, 16,24, 32 e 64 bit [27].

No âmbito do controlo de máquinas eléctricas existem vários controladores digitais específicos para este efeito. No mercado é possível encontrar as famílias de DSCs de 16 bits dsPIC30F e dsPIC33F da Microchip Technology, a família DSP56F80x da Freescale Semiconductor e a TMS320C2000 ou TMS320F240 da Texas Instruments, etc

## 68 Plataformas de desenvolvimento e implementação de controladores de máquinas eléctricas

Os controladores digitais de sinal (DSCs) apenas são constituídos por um circuito integrado visto que conseguem combinar o poder do cálculo das DSPs para processamento de sinais com a versatilidade dos microcontroladores e respectivos conjuntos de periféricos, sendo assim uma solução muito versátil [27]. A necessidade de implementar algoritmos de controlo cada vez mais complexos e velocidades de execução elevadas, com capacidade de obter velocidade de rotação dos motores superiores, com respostas mais precisas e eficazes e com um reduzido custo, impulsionou o aparecimento dos DSCs [27].

As principais vantagens dos DSCs para a sua utilização em controlo de movimento podem ser resumidas em:

- Redução do custo do sistema com a utilização de um circuito integrado com um vasto conjunto de periféricos dedicados;
- Controlo eficiente em toda a gama de velocidades;
- Capacidade de execução de algoritmos de alto nível para obter reduzido ripple de binário, o que resulta numa menor vibração e maior tempo de vida do sistema;
- Evita a utilização de sensores de velocidade e de posição através da possível implementação de métodos sensorless;
- Diminui o número de tabelas necessárias, reduzindo a capacidade de memória utilizada;
- Controlo dos semicondutores de potência dos inversores através da geração de sinais de pwm de alta resolução;
- Permite o controlo de várias variáveis e de sistemas complexos utilizando métodos de controlo inteligentes tais como a lógica difusa e as redes neuronais;
- Realiza controlo adaptativo, uma vez que com o reduzido tempo de execução dos algoritmos é possível monitorizar o sistema e controlá-lo simultaneamente;
- Disponibiliza uma monitorização do sistema através da Fast Fourier Transform da análise do espectro. Através da observação do espectro de frequências das vibrações mecânicas, possíveis falhas podem ser detectadas em estados iniciais;
- Permite a implementação de um controlador num único circuito integrado [27].

Na área do controlo de movimento a utilização de FPGAs para implementação de algoritmos de controlo de motores é cada vez mais uma realidade, devido às vantagens concedidos por este tipo de circuitos lógicos programáveis. Um menor *time to market*, um elevado número de núcleos IP (Intellectual Property) e elevadas velocidades de processamento devido à capacidade de processamento de blocos em paralelo, têm sido as principais mais-valias que impulsionaram a sua utilização [27].

A Xilinx, a Atmel e a Altera são alguns dos fabricantes de FPGAs que disponibilizam kits vocacionados para determinadas áreas específicas como é o caso do controlo de máquinas eléctricas.

### 4.3 - Conclusões

Neste capítulo foi possível compreender o princípio de funcionamento do controlo SVM, bem como das ferramentas necessárias à sua implementação.

Com a evolução dos sistemas de processamento digital e de cálculo, torna-se possível implementar métodos de controlo de elevada complexidade/performance como é o caso do SVM.

Desta forma, através da comparação efectuada entre os vários sistemas que permitem a implementação deste método chegou-se à conclusão que as DSP's, as FPGA e as DSC's permitem efectuar este tipo de controlo com excelente performance.



# Capítulo 5

## FIAT UNO 45S - Desafio Único

Neste capítulo será estudado o Fiat Uno 45 S preparado para a Challenge Desafio Único. Inicialmente realiza-se uma breve ressalva sobre a história do Troféu Automóvel Challenge Desafio Único, estudado o Fiat Uno 45 S de troféu. A análise incidirá no sistema de propulsão a combustão e no conjunto caixa de velocidades e diferencial, ou seja, no sistema de tracção.

Posteriormente será realizado um estudo dinâmico do veículo uma vez que os parâmetros dinâmicos inerentes ao veículo influenciam o seu comportamento. Os dados dinâmicos permitem calcular a energia necessária para movimentar o veículo em diferentes planos.

Por fim ocorrerá a apresentação de dados característicos de um veículo durante as provas da época de 2010 da Challenge Desafio Único, que permitirá listar os requisitos necessários à modelação do veículo eléctrico de competição.

### 5.1 - História do Desafio Único

Em 2006/2007 surgiu o Projecto Desafio Único. Este projecto fazia parte dos projectos PESC - Projectar, Empreender e Saber Concretizar. Os PESC são projectos que surgem com o objectivo de desenvolver as capacidades de trabalho em grupo multidisciplinar, de projecto, de concretização, de liderança e de empreendedorismo.

O projecto Desafio Único tinha como objectivo a construção de um veículo de competição de baixo custo. Inicialmente foi escolhido o Fiat Uno 45 S (Figura 5.1) devido ao elevado número de veículos existentes no país, bem como o baixo preço dos mesmos.

Paralelamente à construção do veículo foi elaborada a regulamentação técnica e desportiva, a fim de organizar a competição Challenge Desafio Único. Esta competição automóvel de baixo custo surgiu de uma ideia do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da FEUP em estreita colaboração com a Federação Portuguesa de Automobilismo e Karting (FPAK).

Assim surgiu o sucesso da competição automóvel de baixo custo em Portugal, pois durante 4 anos mais de 240 equipa e cerca de 500 pilotos participaram nesta competição, daí advém o sucesso.



Figura 5.1 - Fiat Uno 45 S - Categoria FEUP 1 do Desafio Único

## 5.2 - FIAT UNO 45S

O Fiat Uno 45 S foi um automóvel fabricado pela italiana FIAT, apresentado pela primeira vez no Cabo Canaveral, Flórida (EUA), palco escolhido para a sua apresentação à imprensa em 20 de Janeiro de 1983. É um carro de conceito simples e moderno, com motor transversal, tracção dianteira e suspensão McPherson com mola helicoidal à frente. Na traseira era usado eixo de torção, também com mola helicoidal. Eleito Carro do Ano na Europa no ano de estreia, 1985. Estando em comercialização em Portugal durante mais de uma década, sendo um sucesso de vendas.

Na tabela seguinte é possível verificar as características do veículo.

Tabela 5-1 - Folha de características do Fiat Uno 45 S

<b>Construtor</b>	FIAT
<b>Modelo e Tipo</b>	UNO 45 S
<b>Peso Mínimo</b>	680 Kg
<b>Comprimento total</b>	3644 / 3689 mm +/- 1,5%
<b>Largura</b>	1555 / 1562 mm +/- 1,5%
<b>Distância entre eixos</b>	2361,5 mm +/- 1%
<b>Cilindrada</b>	999,05 cm <sup>3</sup>
<b>Caixa de Velocidades</b>	5 relações , ref. C.501.5.10

## 5.3 - Sistema de Propulsão

Na presente secção, será evidenciado o sistema de propulsão/tracção utilizado num Fiat Uno 45S de troféu.

### 5.3.1 - Motor

O motor do Fiat Uno 45S - Troféu é um motor transversal de quatro cilindros em linha, contendo oito válvulas, quatro de escape e quatro de admissão. O comando das válvulas é realizado através de duas árvores de cames independentes, uma encarregue do escape e outra da admissão (Figura 5.2).

O sistema de alimentação é realizado por um único carburador, que tem a função de regular o fluxo de ar e combustível misturando-os de acordo com o comando do pedal acelerador.



Figura 5.2 - Motor 999 cm<sup>3</sup> do Fiat Uno 45 S

O gráfico da Figura 5.3 apresenta-se a característica do motor 999 cm<sup>3</sup>, que é referente ao propulsor do Fiat Uno 45 S - Original (Manual Fiat), donde se pode observar a potência máxima debitada pelo motor que ronda os 45CV (aproximadamente 33.6kW). Também é possível obter através do gráfico as rpm máximas de 6000rpm e o binário máximo que ronda os 79 Nm aproximadamente.

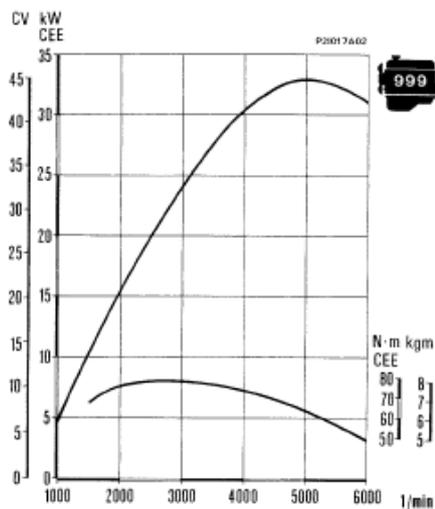


Figura 5.3 - Curva da potência e binário do motor (Manual Fiat)

### 5.3.2 - Caixa de Velocidades

A caixa de velocidade (Figura 5.4) do veículo contém 5 relações para a frente e uma para trás sendo o valor específico para cada relação apresentado na Tabela 5-2.

Incorporada na caixa de velocidades encontra-se o diferencial sendo o seu valor de desmultiplicação apresentado na Tabela 5-3.

Na verdade é possível conceber 4 configurações possíveis entre caixa e diferencial, pois segundo o regulamento existem duas relações de carretos para a quinta velocidade e duas relações de diferenciais.



Figura 5.4 - Caixa de Velocidades

Tabela 5-2 - Relação de Carretos da caixa de velocidades

Relação de Carretos	
Primeira	3,909
Segunda	2,055
Terceira	1,344
Quarta	0,978
Quinta	0,780 ou 0,837
Marcha Atrás	3,727

Tabela 5-3 - Relação de multiplicação do diferencial

Diferencial	
Relação do grupo cilíndrico redução	56/15 (3,733) ou 57/14 (4,071)

### 5.3.3 - Relação nas Rodas

A relação de desmultiplicação aplicada às rodas está apresentada na Tabela 5-4. Esta relação é nada mais nada menos que o acoplamento mecânico da caixa e do diferencial, que têm a função de aumentar a relação binário/velocidade entre o motor e a roda.

Tabela 5-4 - Relação de desmultiplicação nas rodas

RELAÇÃO NAS RODAS	
Primeira	14,592
Segunda	7,671
Terceira	5,017
Quarta	3,651
Quinta	2,912
Marcha Atrás	13,913

### 5.3.4 - Pneus e Jantes

As jantes e os pneus a utilizados no troféu têm de estar de acordo com o regulamento (Tabela 5-5). Sendo que os pneus são marcados prova a prova pela organização e as jantes têm de ser da marca mencionada.

Tabela 5-5 - Referências das medidas dos pneus e da marca das jantes

Pneu	165/65/R13 (Nortenha- Ecologicos)
Jantes	Eagle (Q&F - Competições)
Raio (m)	0,27178
Diametro (m)	0,54356
Perímetro (m)	1,707644103

## 5.4 - Modelo Dinâmico do Veículo

Para modelar o comportamento do veículo será necessário estabelecer as relações de binários que influem no seu comportamento. A forma mais usada para se obter os binários resistentes tem por base o somatório das forças aplicadas ao veículo.

A partir deste modelo (Figura 5.5) é possível obter os dados da energia necessária para a movimentação do veículo, tanto em percursos planos como em percursos inclinados (subidas).

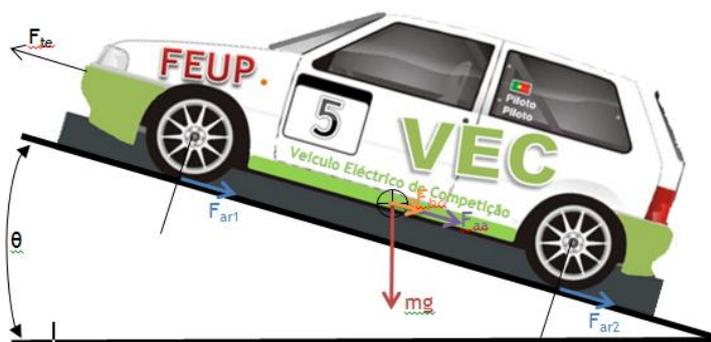


Figura 5.5 - Diagrama de forças aplicadas ao veículo

### 5.4.1 - Força de Atrito de Rolamento

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

$$F_{ar} = \mu_{rr} mg [N] \quad (5.1)$$

onde  $\mu_{rr}$  é o coeficiente de atrito. Os factores que mais influenciam o coeficiente de atrito são o tipo de pneu, ou seja, o seu composto e a pressão do mesmo. O valor de  $\mu_{rr}$  portanto mudará consoante o tipo de superfície, pressão e os pneus utilizados. Esse valor é  $\mu_{rr} = 0,007$ ,

para os pneus utilizados no troféu Challenge Desafio Único fornecidos pela Fábrica de Pneus Nortenha.

#### 5.4.2 - Força de atrito Aerodinâmica

A força de atrito aerodinâmica aplicada a um veículo depende do fluido onde se move a sua correspondente densidade ( $\rho$ ), do coeficiente de atrito dinâmico do veículo ( $C_D$ ), a área frontal ( $A_f$ ) afectada pelo fluido e da diferença de velocidades entre a velocidade do veículo ( $V$ ) e da velocidade do vento ( $V_v$ ).

A equação 4.1 representa a força de atrito aerodinâmica ( $F_{aa}$ )

$$F_{aa}[N] = \frac{1}{2} \rho C_D A_f (V - V_v)^2 \quad (5.2)$$

Os parâmetros necessários para o cálculo da força de atrito aerodinâmica foram retirados do manual de oficina da Fiat.

Tabela 5-6 - Parâmetros do Fiat Uno 45 S inerentes ao cálculo da força de atrito aerodinâmica

Densidade do ar ( $\rho$ )	1,2 Kg/m <sup>3</sup> (altura do mar)
Coeficiente de atrito dinâmico ( $C_D$ )	0,34
Área frontal ( $A_f$ )	1,83 m <sup>2</sup>

#### 5.4.3 - Força de subida de planos inclinados

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

$$F_{hc} = mg \sin \theta [N] \quad (5.3)$$

#### 5.4.4 - Força de aceleração

Se a velocidade do veículo está a mudar, então é claro, que será necessário aplicar uma força adicional à que vimos na Figura 5.5. Esta força irá dar a aceleração linear do veículo e é dada pela conhecida equação de Newton, da sua 2ª lei,

$$F_{ta} = ma[N] \quad (5.4)$$

### 5.4.5 - Força total de tracção

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

$$F_{te} = F_{ar} + F_{aa} + F_{hc} + F_{la}[N] \quad (5.5)$$

Onde,

- $F_{ar}$  é a força de atrito de rolamento, dada na equação (5.1)
- $F_{aa}$  é a força de arrasto aerodinâmico, dado pela equação (5.2)
- $F_{hc}$  é a força necessária para subir um plano inclinado dado pela equação (5.3)
- $F_{la}$  é a força necessária para dotar o veículo de aceleração linear dado pela equação (5.4)

## 5.5 - Desempenho do Veículo

De seguida serão apresentados os resultados obtidos durante a época de 2010 nos circuitos e rampas que fizeram parte da competição Challenge Desafio Único.

### 5.5.1 - Resultados por Prova

Na Tabela 5-7 é possível verificar as provas realizadas em 2010, na Challenge Desafio Único, bem como a distância de cada circuito/rampa, a inclinação média, o nº de voltas realizada, o tempo por volta/subida e a velocidade média durante a prova/subida.

Tabela 5-7 - Época 2010 Desafio Único - Categoria FEUP1 - TEMPOS

Desafio Único 2010	Distância por volta (Km)	Inclinação média (%)	Altitude (m)	Manga A (30min)	Manga B (30min)	Manga C (50min)	Média (km/h)
				nº de voltas			
				14	14	27	
Circuito Vasco Sameiro	3	0	0	25:43.079	25:42.027	51:00.346	99
				10	10	20	
Circuito do Estoril	4,183	0	0	25:03.669	25:28.994	52:02.157	100
				10	10	19	
Circuito Portimão	4,648	0	0	26:59.376	26:62.547	52:37.979	105

	Distância por subida (Km)	Inclinação média (%)	Altitude (m)	nº de Subidas por carro	Melhor subida	Média (km/h)
Rampa da Penha	2,85	6,7	179	6 subidas	2:07.529	82,61
Rampa da Falperra	5,2	5	272	6 subidas	3:18.421	94,34

## 5.6 - Conclusões

Neste capítulo, estudou-se o Fiat Uno 45 S preparado para troféu donde se retirou informação/requisitos necessários ao dimensionamento do Veículo Eléctrico de Competição.

Através dos resultados das corridas, foi possível obter as velocidades médias e os tempos necessários para percorrer tanto um circuito como uma rampa.

Com os dados adquiridos através deste estudo, tornou-se possível realizar uma análise de mercado relativa ao sistema de tracção eléctrica de forma a cumprir com o requisito de se conceber um veículo eléctrico em tudo idêntico ao Fiat Uno 45S de troféu.

Sabendo que a potência debitada pelo motor de combustão interna do Fiat Uno de Troféu varia entre os 45CV (aproximadamente 30KW) e os 50CV, podendo ir no máximo até às 6000 rpm. Estes valores deverão ser vistos como requisitos do projecto a implementar.

Desta forma realizou-se uma análise de mercado de modo a encontrar máquinas eléctricas e controladores capazes de cumprir os requisitos mencionados. Esta análise é apresentada no anexo B.1.



# Capítulo 6

## Simulação do PowerTrain

Findo o estudo dos motores síncronos de ímanes permanentes, dos respectivos controladores e conversores, bem como do veículo Fiat Uno 45 S de troféu, passou-se à análise em simulação recorrendo ao programa SIMULINK incluído no programa MATLAB R2009B, do sistema de propulsão a combustão e do sistema de propulsão totalmente eléctrico. Após esta análise individual evidenciar-se-á uma comparação entre os dois sistemas de propulsão.

### 6.1 - Veículo a Combustão

A simulação do veículo a combustão está dividida em três partes importantes. A primeira parte representa o sistema de propulsão a gasolina. A segunda parte está directamente relacionada com a relação de transmissão entre o motor e as rodas, ao qual se dá o nome de caixa de velocidades. E por fim a terceira representa a dinâmica do veículo destacando-se as forças aplicadas ao veículo, como foi mencionado no capítulo anterior.

#### 6.1.1 - Motor a Gasolina

O modelo do motor a gasolina (Figura 6.1) está disponível na biblioteca SimDriveline do Simulink. Este modelo teve de ser ajustado de acordo com os valores característicos da motorização do Fiat Uno 45 S, ou seja:

- Potência máxima = 33570 W
- Velocidade à máxima potencia = 4500 rpm
- Velocidade máxima = 6000 rpm

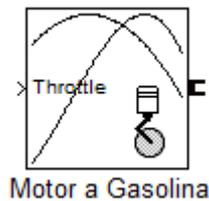


Figura 6.1 - Bloco Simulink do motor a gasolina

### 6.1.2 - Selector de Velocidades

O selector de velocidades (Figura 6.2) desenvolvido recebe uma entrada manual onde se escolhe a relação de caixa de 1 (Primeira) a 5 (Quinta). Através de um interruptor de múltiplas entradas consegue-se aplicar na saída o valor de referência correspondente à relação de caixa do Fiat Uno, de acordo com a relação de caixa inserida manualmente. Assim sendo, o valor apresentado na saída é o valor representativo da relação seleccionada que será posteriormente ligado no ponto seguinte.

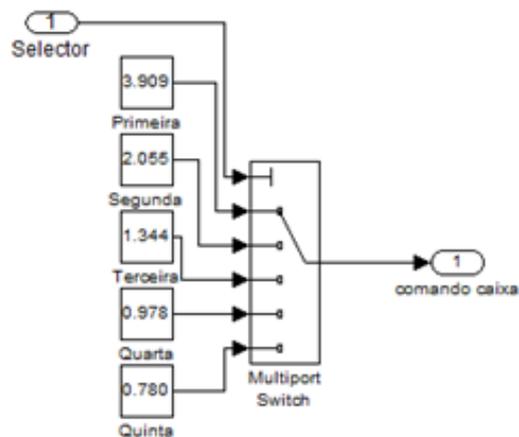


Figura 6.2 - Selector Caixa de Velocidades

### 6.1.3 - Dinâmica do Veículo

Para simular a dinâmica do Fiat Uno realizou-se um bloco onde se interligou os vários sistemas que influenciam a dinâmica do veículo, como apresentado no capítulo anterior. No diagrama de blocos Simulink apresentado na Figura 6.3, é possível verificar os blocos referentes às forças longitudinais aplicadas ao veículo, os blocos que caracterizam as rodas dianteiras responsáveis pela tracção do veículo, a caixa de velocidades e o respectivo diferencial mecânico. Interligando este sistema com os dois anteriormente mencionados é possível verificar o funcionamento do veículo, como será demonstrado no ponto 6.1.4.

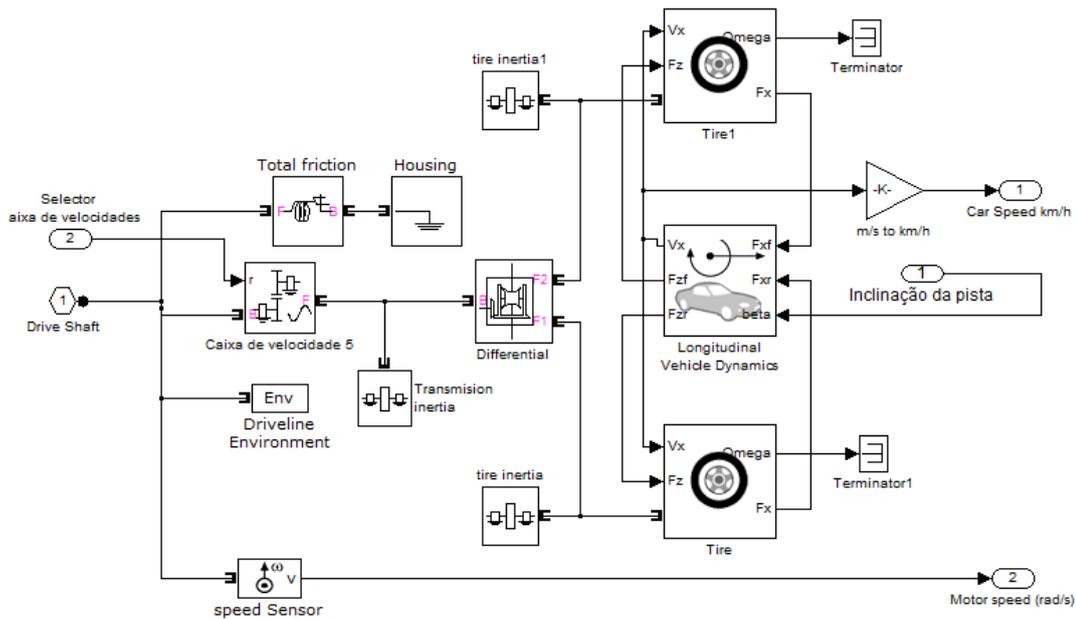


Figura 6.3 - Diagrama de Blocos representativo da dinâmica do Fiat Uno

### 6.1.4 - Veículo Completo a Combustão

No diagrama de blocos presente na Figura 6.4, é possível presenciar a interligação de todos os sistemas acima mencionados.

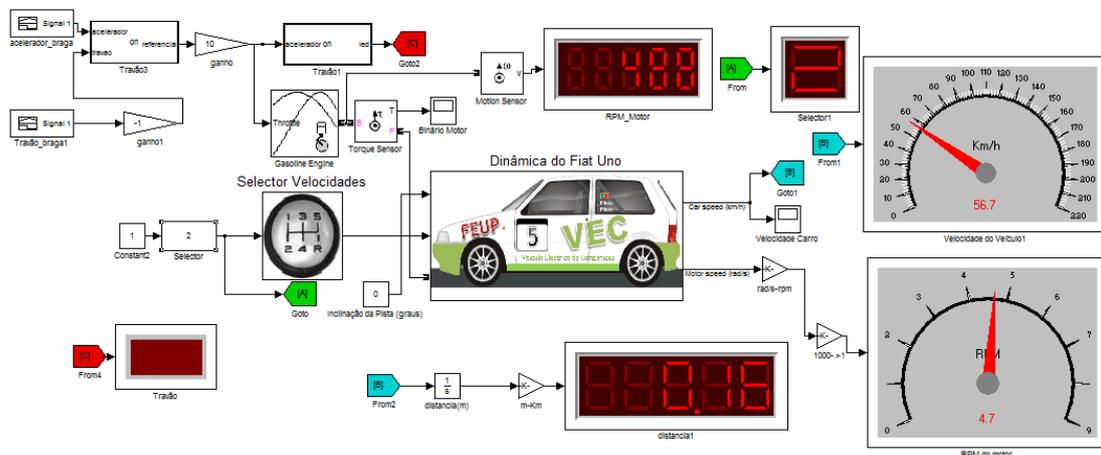


Figura 6.4 - Simulação em Simulink do Fiat Uno 45S a Combustão

De forma a validar este diagrama de blocos, realizou-se um estudo dos pontos de travagem e aceleração de um veículo de troféu durante uma prova do Desafio Único no [Circuito Vasco Sameiro](#). Através de uma câmara de filmar e de um led acoplado ao pedal do travão, tentou-se realizar uma tabela dos tempos de travagem e aceleração ao longo do Circuito (Figura 6.5).



Figura 6.5 - Pontos de travagem Circuito Vasco Sameiro

Desta forma tornou-se impossível realizar uma tabela idêntica à condução realizada pelo piloto, visto não se saber em que pontos o piloto está a acelerar ao máximo ou a desacelerar sem carregar no travão ou até mesmo a mudar de relação de caixa. Assim sendo conseguiu-se apenas marcar o local e o tempo das travagens (Figura 6.5).

De forma a implementar o controlo do acelerador e do travão realizou-se um gráfico exemplificativo dos momentos em que o piloto está a acelerar e a travar durante uma volta ao Circuito Vasco Sameiro. Na verdade o gráfico apresentado na Figura 6.6, apenas corresponde ao pedal do acelerador visto o travão ser o seu complementar. O valor 1 significa que o pedal está a ser premido ao máximo e o valor zero o pedal encontra-se na sua posição inicial.

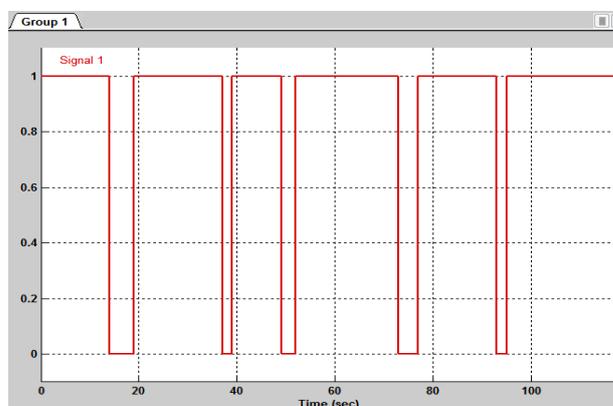


Figura 6.6 - Gráfico representativo do pedal do acelerador durante uma volta ao Circuito Vasco Sameiro

Através desta simulação conseguiu-se obter os gráficos do binário gerado pelo motor, e da velocidade do veículo ao longo da pista (Figura 6.7.) de forma a validar as curvas fornecidas pela Fiat relativamente ao motor a combustão, Figura 5.3.

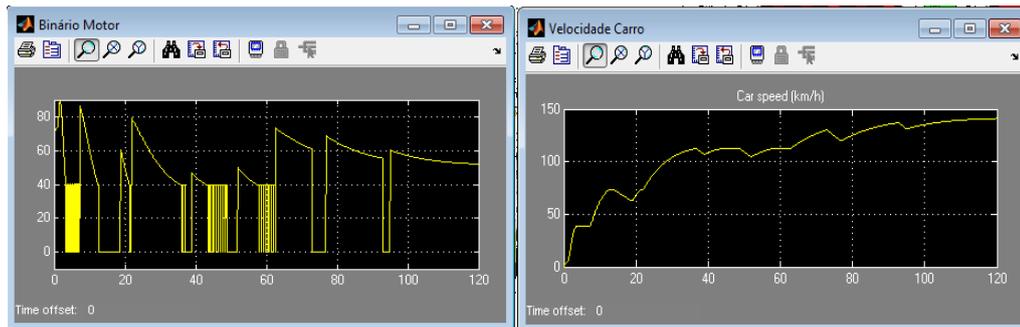


Figura 6.7 - Gráfico do binário do motor e velocidade do veículo

Analisando o gráfico referente ao binário é possível apercebermo-nos do comportamento do veículo durante uma volta à pista. No arranque é possível verificar o pico de binário inicial aquando do início da marcha do veículo, tendo este valor zero durante uma travagem e perturbação aquando da passagem de caixa.

Observando o gráfico do binário é visível o binário máximo produzido no arranque de forma a comparar este valor com o valor apresentado na curva característica do motor de combustão original, apresentando um valor aproximado de 80 Nm.

Assim sendo comparando os valores obtidos como os valores originais do motor é possível validar a simulação.

## 6.2 - Veículo Eléctrico

Após a simulação do Fiat Uno 45 S com motor a combustão bem como da dinâmica, passou-se à implementação da tracção totalmente eléctrica substituindo o motor a combustão por um motor eléctrico síncrono de ímanes permanentes e do respectivo controlador.

Um dos objectivos deste projecto consistia em perceber o funcionamento do motor síncrono de ímanes permanentes da Perm-Motor, PMS 150 W.

### 6.2.1 - Motor Eléctrico

O modelo do motor síncrono de ímanes permanentes (Figura 6.1) está disponível na biblioteca SimPowerSystems do Simulink.

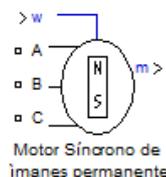


Figura 6.8 - Modelo do Motor Síncrono de Ímanes Permanentes do Simulink

Este bloco caracteriza a máquina síncrona de ímanes permanente sendo os parâmetros apresentados na Figura 6.9.

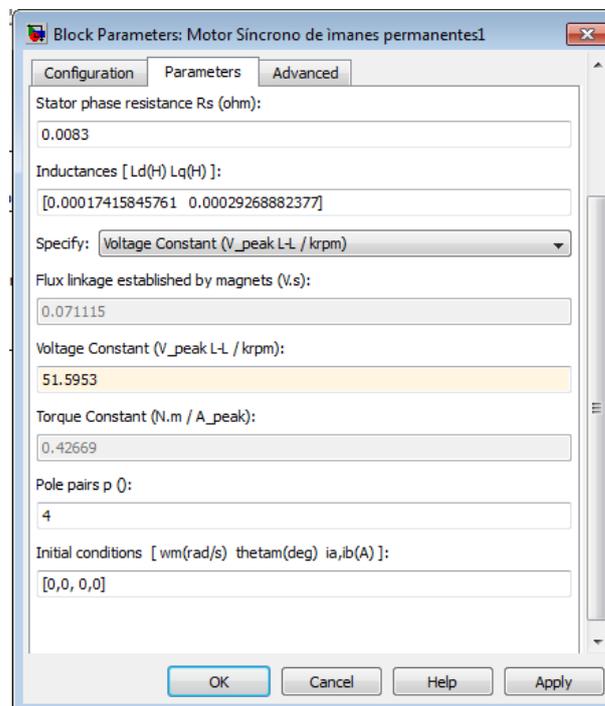


Figura 6.9 - Parâmetros característicos da Máquina Síncrona de Ímanes Permanentes.

De forma a ser possível simular o PMS 150W é necessário saber os parâmetros construtivos da máquina, como é o caso da resistência do estator ( $R_s$ ), das indutâncias ( $L_d$  e  $L_q$ ) do número de pólos e do valor da constante de tensão às 1000 rpm.

Na verdade a pouca informação disponibilizada pelo fabricante à data da realização da simulação inviabilizou a simulação deste motor em específico. Após várias tentativas de parametrização desta máquina chegou-se à conclusão que sem saber o valor da resistência do estator ( $R_s$ ) e das indutâncias ( $L_d$  e  $L_q$ ) não seria possível parametrizar a máquina.

Assim decidiu-se utilizar o demo do Matlab - Fuel Cell Vehicle(FCV) Power Train, donde se retirou o motor eléctrico PMSM de 100KW a 288V, visto estar devidamente parametrizado (Figura 6.9).

## 6.2.2 - Controlo do PMSM

Após simular o motor em malha aberta e perceber a validade dos resultados obtidos passou-se à implementação do controlo.

Como referido anteriormente, o controlo mais adequado à tracção eléctrica é o controlo vectorial. Assim, após várias tentativas de implementação deste tipo de controlo, sem êxito, decidiu-se recorrer novamente ao demo do Matlab - Fuel Cell Vehicle (FCV) Power Train,

donde de retirou o seguinte diagrama de bloco representativo do controlo vectorial e controlo de velocidade aplicado ao motor PMSM (Figura 6.10).

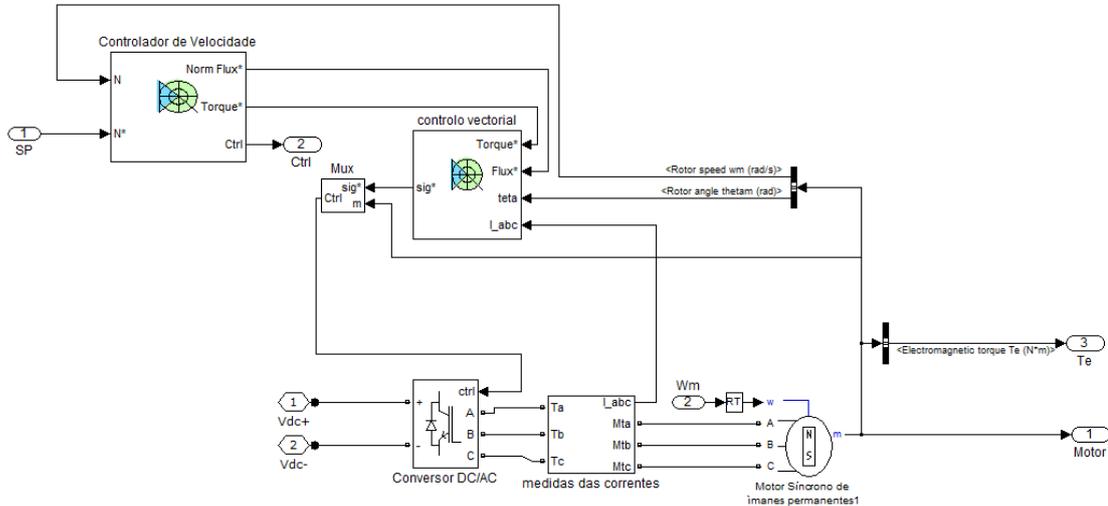


Figura 6.10 - Diagrama de Blocos do controlo vectorial e controlo de velocidade de um PMSM

O controlo da velocidade é realizado por um controlador Proporcional-Integral (PI) que gera a referência de binário. O controlador vectorial tem como entrada a referência de binário, a medida das correntes nas três fases e a posição angular do rotor, gerando na saída seis sinais de controlo modulados em PWM tendo estes a função de controlar os semicondutores do inversor regulando através destes as tensões a fornecer à máquina eléctrica.

O diagrama de blocos presente na Figura 6.11 representa o controlador de velocidade, este resume-se a um controlador PI com limitação da variação da entrada e limitação do sinal de saída em binário.

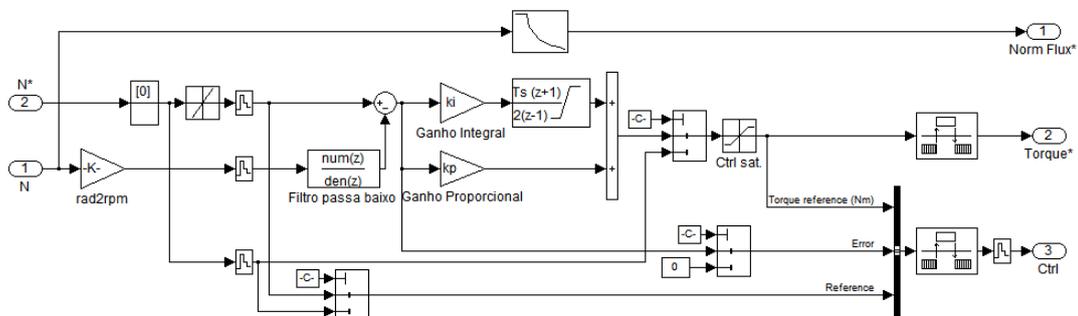


Figura 6.11 - Diagrama de bloco do controlador de velocidade

Já o bloco correspondente ao controlo vectorial, Figura 6.16 recebe o sinal do binário obtido no controlo de velocidade e juntamente com o valor da posição do rotor e das correntes nas linhas realiza operações de cálculo de forma a gerar na saída sinais PWM.

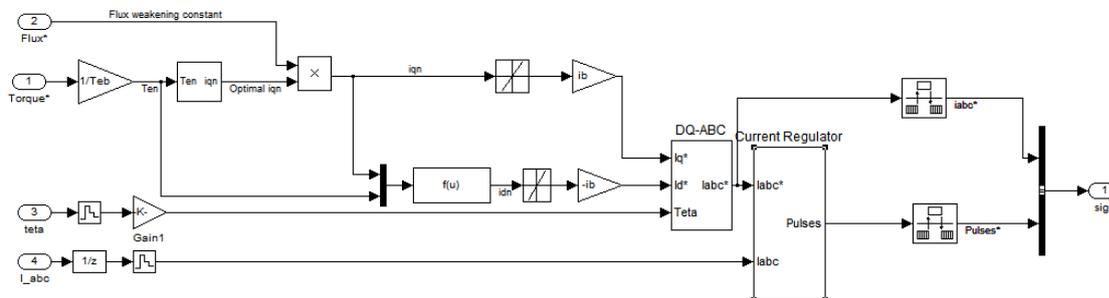


Figura 6.12 - Diagrama de bloco do controlador vectorial

### 6.2.3 - Veículo Completo com Motor Eléctrico

A simulação do veículo com sistema de propulsão eléctrica surge no seguimento da simulação com o motor a combustão, substituindo o bloco representativo do motor a combustão pelo bloco que constitui a máquina eléctrica e o respectivo controlador. Através do estudo apresentado no anexo C, onde se estudou a complexidade da utilização da caixa de velocidades acoplada a um motor eléctrico bem como da possível escolha de apenas uma relação de caixa, concluiu-se que não seria possível utilizar a caixa de velocidades manual, uma vez que quando se pretende alterar uma relação de caixa é necessário desacoplar o veio do motor do veio da caixa de velocidades alterando assim as rotações dos mesmo, podendo danificar o motor eléctrico aquando do acoplamento. Assim optou-se pela utilização apenas da terceira relação de caixa.

Desta forma, concebeu-se o seguinte diagrama de blocos através do qual se efectuou a simulação representativa do sistema de propulsão eléctrica.

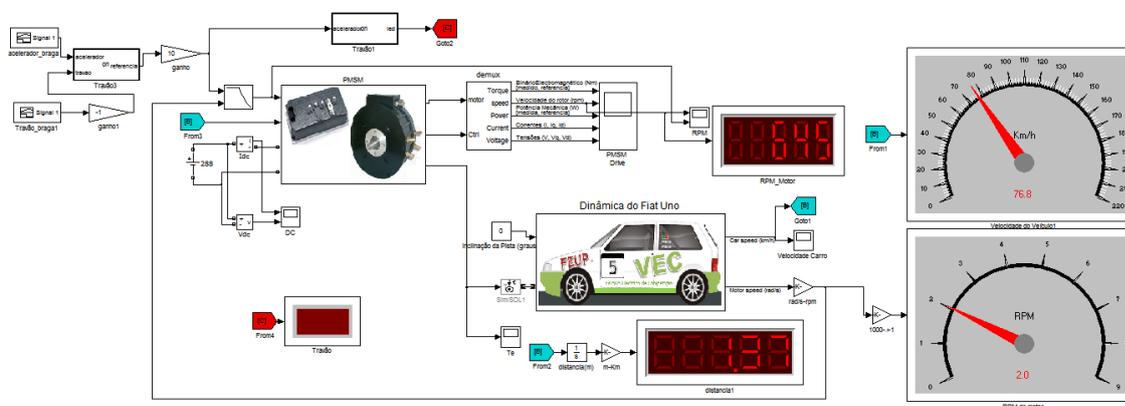


Figura 6.13 - Simulação em Simulink do Fiat Uno com sistema de propulsão eléctrica

A Figura 6.14 apresenta três formas de onda distintas. A primeira representa os valores do acelerador e do travão ao longo de uma volta ao Circuito Vasco Sameiro, ou seja, quando tem valores iguais a um isto significa que o piloto está a acelerar e quando tem valores negativos a travar. A segunda representa a velocidade do veículo ao longo do circuito e por fim a terceira representa o binário do veículo de referência medido ao longo do circuito.

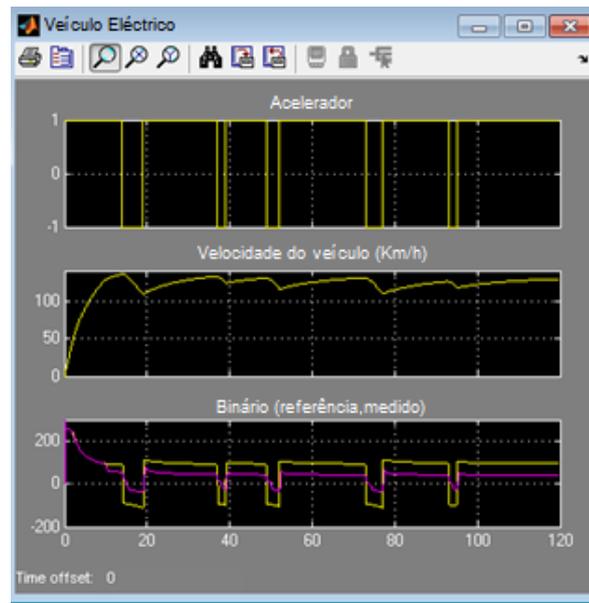


Figura 6.14 - Veículo eléctrico: Acelerador, Velocidade do veículo e binário no veículo

Na terceira forma de onda os valores do binário são positivos e negativos, o que significa que quando é realizada a operação de travagem o veículo realiza frenagem regenerativa como é possível comprovar através do binário negativo produzido, aproveitando a energia cinética para gerar energia para as baterias. Também é possível verificar o pico de binário produzido aquando do arranque do veículo, sendo este de aproximadamente 200Nm.

Através da Figura 6.15 é possível perceber o comportamento da corrente no barramento DC donde se destaca o seu valor máximo aquando do arranque, bem como os valores negativos da corrente durante as travagens.

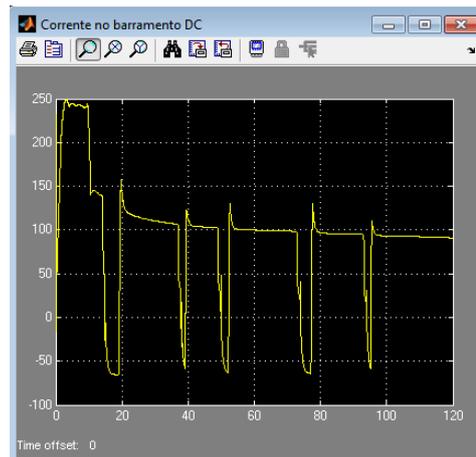


Figura 6.15 - Corrente no barramento DC

A Figura 6.16 comprova o comportamento da máquina eléctrica e do respectivo controlador, sendo possível verificar o binário, a rotação e a potência produzida pela máquina eléctrica ao longo do circuito, bem como os valores das corrente e tensões fornecidas pelo controlador.

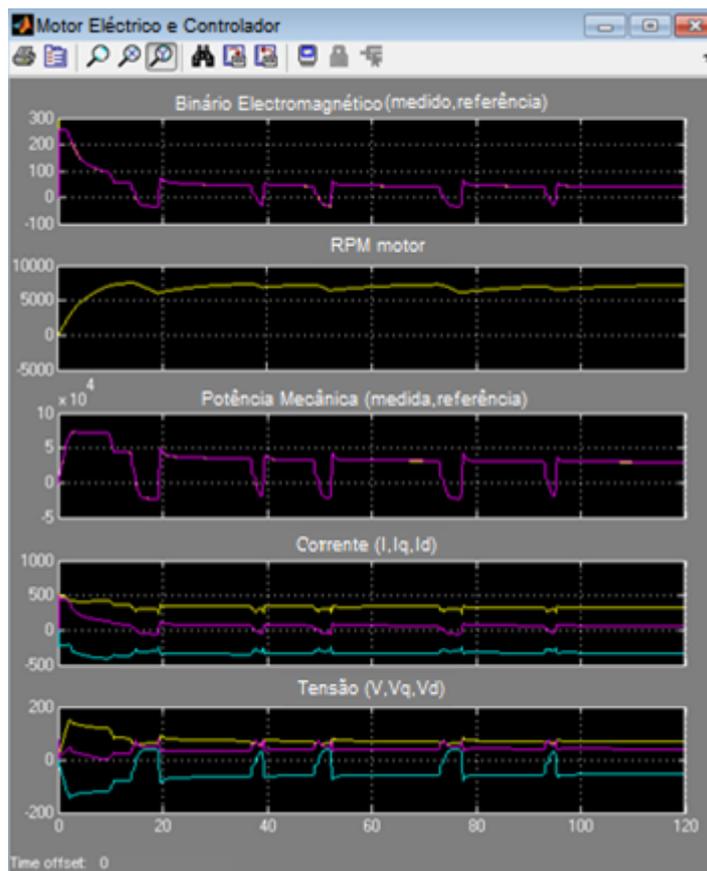


Figura 6.16 - Valores referentes ao motor e controlador durante a simulação

### 6.3 - Conclusões obtidas nas simulações

Após terminada a fase de simulações foi possível validar alguns dos conhecimentos teóricos estudados nos capítulos anteriores.

Alguns dos cenários previamente pensados, não foram possíveis de implementar correctamente, uma vez que a falta de informação disponibilizada pelo fabricante tanto do motor eléctrico com do controlador à data da simulação, inviabilizaram a comparação através de resultados simulados dos dois sistemas de tracção distintos. No entanto as alternativas utilizadas permitiram obter conclusões genéricas do comportamento do veículo com os dois sistemas de propulsão simulados, validando o princípio de funcionamentos dos mesmos com os dados originais do Fiat Uno.



# Capítulo 7

## Hardware e Software utilizado

Como referido no capítulo anterior, a necessidade de angariar uma máquina eléctrica impôs a realização de um estudo de mercado de forma a comparar os preços, potências, binários, tensões, rendimento e pesos entre as várias máquinas eléctricas mencionados no capítulo 2. Sendo necessário satisfazer os requisitos mencionados no capítulo 5. Esta análise é apresentada no anexo C.

Através desta análise concluiu-se que a máquina PMS 156W supera as restantes máquinas, mas na verdade devido à inexistência de um controlador específico para esta máquina foi necessário excluí-la. Assim sendo realizou-se um novo estudo comparativo entre o motor a combustão e a máquina PMS150W, pois esta máquina apenas tem 22KW o que pode condicionar o objectivo de ter um veículo eléctrico com um desempenho semelhante ao de combustão. Este estudo é apresentado no anexo C1, onde se conclui que esta máquina poderia então ser uma alternativa ao motor PMS156W tendo um comportamento em tudo idêntico ao motor a combustão.

Após este enquadramento, será apresentado neste capítulo o hardware e software característico do sistema de propulsão utilizado na vertente mais prática deste projecto.

Relativamente ao hardware constituinte do sistema de tracção faz parte a máquina eléctrica e o respectivo controlador, sendo necessário empregar alguns sistemas auxiliares devido à característica funcional da máquina eléctrica necessitar de refrigeração a água, bem como da necessidade de saber a posição e a temperatura no rotor necessária ao seu controlo.

De forma a ser possível interligar o controlador ao computador foi necessário recorrer a um sistema de interface CAN (*Controller Area Network*).

O software utilizado faz parte do conjunto do controlador, visto permitir alterar parâmetros e reprogramar o seu funcionamento. Na verdade também permite obter uma análise em tempo real do funcionamento do sistema de tracção ou pode-se optar pela gravação de log's, que posteriormente podem ser tratados no Microsoft Excel permitindo avaliar o comportamento do binómio motor/controlador.

Este capítulo realiza a introdução necessária para a fase de implementação do projecto.

## 7.1 - Máquina Eléctrica PMS 150W

O motor seleccionado pertence a família dos motores que não necessitam de manutenção, foi desenvolvido sob os aspectos de maior densidade de potência e economia de produção, especialmente para a aplicação em veículos eléctricos.

A máquina eléctrica escolhida, o PMS-150W, é um motor síncrono de ímanes permanentes de fabrico alemão concebido pela empresa PERM-MOTOR.

O PMS-150W, Figura 7.1, é um motor em forma de disco de fluxo axial (secção 3.1) com dois estatores trifásicos e um rotor com ímanes permanentes, com a particularidade de ser sem núcleo. O fluxo magnético criado nos ímanes permanentes corre axial ao longo das duas condutas de água e através dos dentes do estator. O resultado do uso de ímanes de NdFeB permite ter um fluxo magnético muito superior originando um elevado binário nominal.

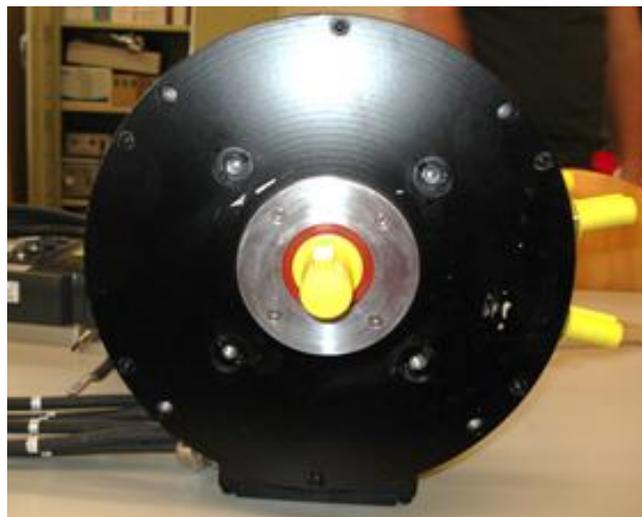


Figura 7.1 - Máquina Síncrona de Ímanes Permanentes - PMS 150W

A tecnologia de disco único no rotor garante confiança relativamente á eficiência energética. A tecnologia patenteada pela PERM- MOTOR do rotor, otimiza a eficiência da máquina até 95%, Figura 7.2.

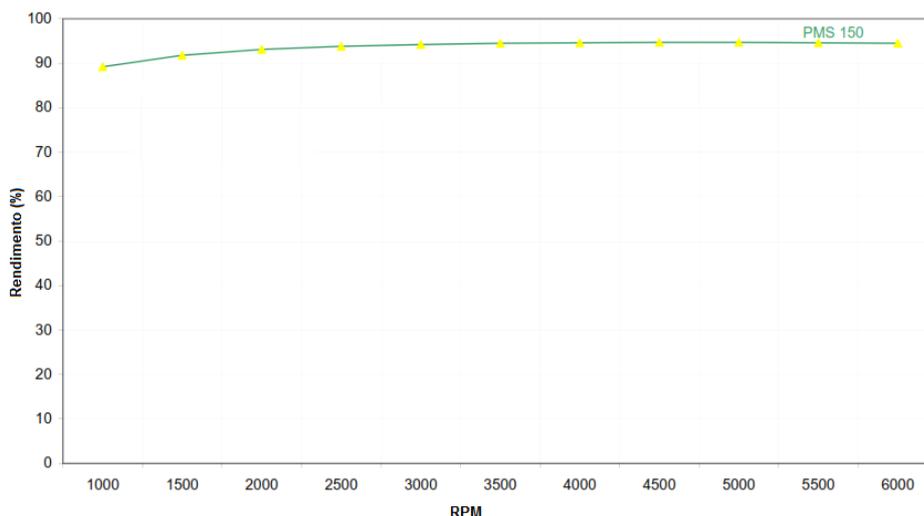


Figura 7.2 - Curva característica do rendimento versus rpm do motor PMS 150W

Esta máquina tem as mesmas características de funcionamento aquando do seu funcionamento como motor e como gerador, sendo uma característica muito importante na implementação em veículos eléctricos pois desta forma consegue-se otimizar o veículo. Produzindo energia aquando das descidas e das travagens efectuando frenagem regenerativa.

A Tabela 7-1 apresenta a folha de características da máquina PMS 150W.

Tabela 7-1 - Folha de características do motor eléctrico PMS 150 W

<b>Motor</b>	PMS 150 W - WB 407
<b>Tipo</b>	Motor Síncrono de Ímanes Permanentes (Disc Motor)
<b>Refrigeração</b>	Refrigerado a água com 60°C de temperatura máxima; 6 L/minuto de caudal mínimo
<b>Protecção</b>	IP 54
<b>Classe Térmica</b>	F (155°C)
<b>Material dos ímanes</b>	Neodymium-Iron-Bor
<b>Potência</b>	22 KW (29,5 CV)
<b>Tensão [V AC]</b>	65,60 V AC
<b>Corrente [A rms]</b>	255 A rms
<b>Velocidade [rpm]</b>	6000 rpm
<b>Binário [Nm]</b>	35 Nm
<b>Ke - constante de tensão (fase-fase) [V/1000 rpm]</b>	8,87 V/1000 rpm
<b>Kt - constante de binário [Nm/A]</b>	0,14 Nm/A
<b>Número de pólos</b>	8

Frequência [Hz]	400 Hz
Resistência (20 °C)	0,005 Ohm
Indutância [mH]	0,047333 mH
Inércia [kgcm <sup>2</sup> ]	58,6 kgcm <sup>2</sup>
Peso [kg]	29,6 Kg

Uma das vantagens importantes desta máquina consta na capacidade de produzir 300% do binário nominal por períodos até 10 segundos, o que permite gerar 80Nm de binário máximo, Figura 7.3.

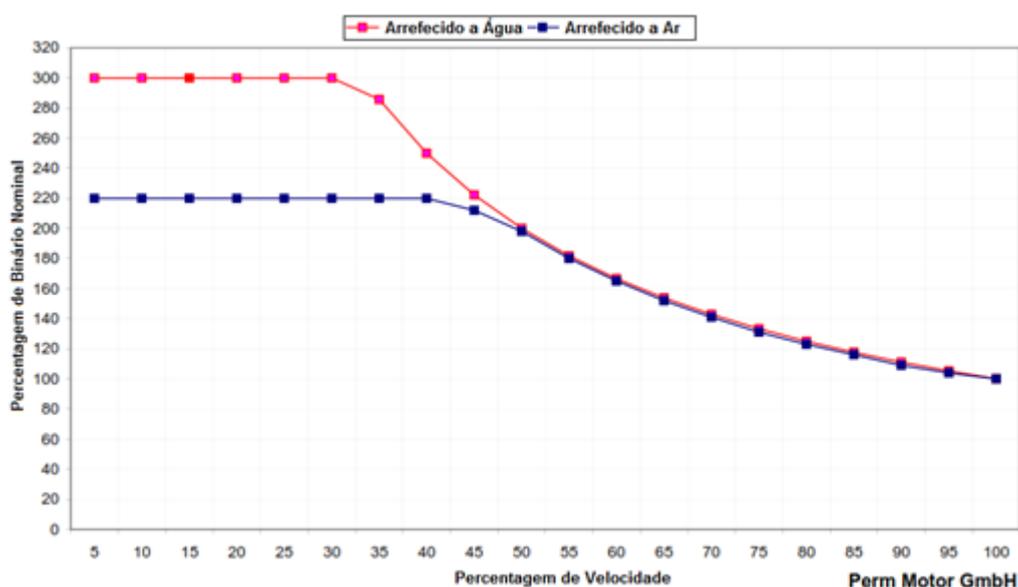


Figura 7.3 - Curva característica da percentagem de binário nominal por percentagem de -velocidade do motor PMS 150W

O PMS 150W contém um *encoder* analógico acoplado de forma a se determinar a posição angular do rotor. Um sensor de temperatura está integrado na máquina para monitorizar a temperatura dos ímanes permanentes do rotor de forma a garantir que a mesma esteja dentro dos limites especificados.

A máquina seleccionada necessita de um sistema de refrigeração a água que tenha no mínimo um caudal de 6l por minuto de modo a manter a temperatura da água sempre abaixo do limite máximo dos 60°C.

### 7.1.1 - Encoder

O encoder acoplado à máquina é constituído por um circuito integrado AM256 e um íman, utilizando a tecnologia do sensor efeito de hall, Figura 7.4, de forma a detectar a distribuição de densidade de fluxo magnético na superfície do silício.

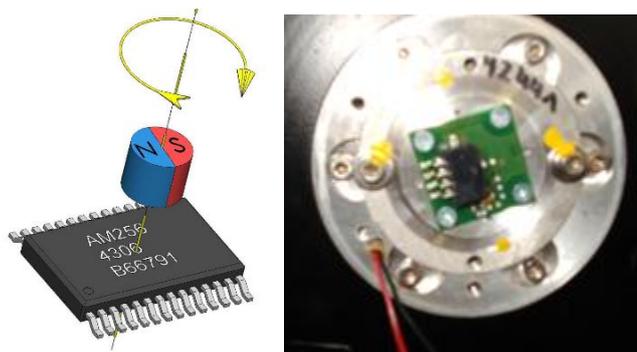


Figura 7.4 - Encoder - AM256 com íman

O íman encontra-se colocado no veio/rotor da máquina, assim a medida que este roda a posição do íman também varia o que origina uma alteração dos valores de tensão do seno e do cosseno produzidos pelo circuito integrado, Figura 7.5. Os valores do seno e do cosseno são assim enviados para o controlador efectuando este uma análise das duas sinusóides de modo a determinar a posição angular do rotor.

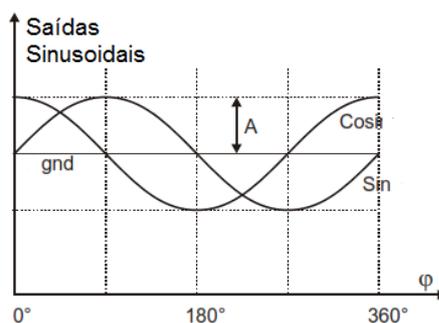


Figura 7.5 - Sinais de saída apresentados pelo encoder

### 7.1.2 - Sensor de Temperatura

A máquina eléctrica acima apresentada também contém acoplada um sensor de temperatura de silicó de série KTY84/130, Figura 7.6.

O KTY84/130 é um sensor resistivo que varia o valor da resistência com a variação da temperatura, sendo a sua faixa de medição dos  $-40$  a  $300^{\circ}\text{C}$ .

Este sensor tem a função de captar a temperatura no interior da máquina eléctrica, visto esta variável ter uma elevada importância no controlo do motor.



Figura 7.6 - Sensor de temperatura, KTY84/130

### 7.1.3 - Sistema de Refrigeração

Como foi apresentado no ponto 7.1 o motor necessita de ser refrigerado a água, o que torna necessário a utilização de um permutador de calor bem como de uma bomba de recirculação de água.

O permutador de calor e o ventilador, Figura 7.7, utilizados são os mesmos do veículo a combustão visto cumprirem os requisitos apresentados na Tabela 7-1.



Figura 7.7 - Radiador/Permutador de calor, e respectivo ventilador

A bomba eléctrica de recirculação de água escolhida é uma bomba eléctrica da Bosch utilizada em veículos convencionais. Comparando a folha de características da bomba eléctrica de recirculação água, Tabela 7-2, com a folha de características da máquina eléctrica, Tabela 7-1, é possível verificar que o caudal que a bomba debita é muito superior às especificações da máquina eléctrica o que valida a sua utilização.



Figura 7.8 - Bomba eléctrica de recirculação de água

Tabela 7-2 - Características da Bomba de água eléctrica

<b>Tensão nominal (<math>U_n</math>)</b>	12 V
<b>Volume (V)</b>	850...1050 dm <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
<b>Pressão (p)</b>	0,1 bar
<b>Direcção de rotação</b>	Direita
<b>Grau de protecção</b>	IP 54
<b>Peso</b>	0,25 Kg

## 7.2 - Controlador

O controlador utilizado foi projectado para controlar motores de indução e motores síncronos de ímanes permanentes utilizados na tracção e alimentados por baterias.

O controlador, Figura 7.9, utilizado na parte prática deste trabalho é fabricado pela SEVCON e contém as seguintes características, ver Tabela 7-3.



Figura 7.9 - Controlador GEN4-80 - SEVCON

O controlador contém conectores de potência onde se efectuam as ligações do motor (M1,M2,M3) bem como do sistema de alimentação (B-, B+) e um único conector de sinal com 35 pinos, como é possível observar na figura acima apresentada. No anexo D é possível verificar a designação bem como a funcionalidade de cada um dos pinos correspondentes ao conector de sinal.

Tabela 7-3 - Folha de características do controlador SEVCON GEN4-80

Modelo	GEN4 - G8055
Tensão nominal das baterias	72 a 80VDC
Máxima tensão de operação	116VDC
Mínima tensão de operação	39.1VDC
Corrente de Pico (2 min)	550 A
Corrente Impulsional - Boost (10 sec)	660 A
Corrente contínua (60 min)	220 A
Entradas digitais	8
Entradas analógicas	2
Entrada do Sensor temperatura do motor	Termistor
Contactora/Saída solenóide (2A)	3 (1-16kHz)
Entrada do motor UVW	Contém

Entrada do encoder do motor (AB)	Contém
Entrada SEN/COS	Contém
Saída alimentação Encoder	5 V ou 10 V (máx. 100mA)
Suporta CANopen	DS201, DS401, DS402
Temperatura de operação ambiente	-40°C a +85°C
Classe de protecção	IP66
Peso	4.6 Kg

O controlador tem a capacidade de se adaptar às condições de carga bem como ao ambiente onde é operado. A sua principal funcionalidade consiste no controlo nos quatro quadrantes do binário e da velocidade do motor (condução e frenagem regenerativa no sentido directo/frente ou inverso/trás) sem a necessidade de contactores direccionais.

A aplicação de comandos de controlo de tracção é realizada pelo driver usando uma relação de controlos digitais (direcção, interruptor de pé, interruptor de assento, etc) e controlos analógicos (acelerador e travão de pé).

As entradas do acelerador podem ser configuradas de acordo com o controlo que deseja efectuar, ou com referência de velocidade ou de binário: em ambos os casos, uma referência de binário é calculada continuamente tendo em conta os limites pré estabelecidos sobre o nível e a taxa de mudança do binário. A referência de binário é usada para calcular as referências actuais, ou seja, o controlador calcula as correntes a aplicar ao motor de forma a gerar o binário necessário.

O modo de controlo em binário implementado no controlador Gen4 mantém a produção de binário do motor num valor constante para uma determinada posição do acelerador. Sendo muito semelhante a motores de corrente contínua e proporciona uma experiência de condução muito idêntica à de um carro. Para evitar o excesso de velocidade quando o binário de carga é baixo, por exemplo em descidas, pode ser definida uma velocidade máxima para o veículo.

Por outro lado, o modo de controlo em velocidade difere do modo binário, pois o valor de binário aplicado ao motor é calculado pelo controlador com base no valor de referência de velocidade solicitada pelo operador (determinado pelo sensor do pedal do acelerador) e da velocidade real do veículo. Na verdade o controlador pode não conseguir manter o motor a uma velocidade constante para uma determinada posição do acelerador, devido ao binário produzido pelo motor. Este modo de controlo não é recomendado para veículos que circulem em auto-estrada, pois pode causar um bloqueio do motor/rodas em situações de derrapagem ou perda de tracção do veículo.

A corrente é dividida em duas componentes a corrente  $i_q$  e a corrente  $i_d$ . A corrente no eixo d actual é responsável pela produção de fluxo magnético, mas não de binário. A corrente no eixo q representa o binário actual produzido.

Assim sendo, as correntes de fase medidas e as referências atuais  $i_d$  e  $i_q$  das correntes do eixo dq, são usadas num sistema de controlo em malha fechada para calcular a referência da tensão necessária para cada fase do motor. As referências de tensão são então transformadas em referências PWM para cada fase usando o método Space Vector Modulation (SVM). O SVM garante o melhor aproveitamento dos semicondutores de potência.

O conversor de potência utilizado no GEN4, utiliza uma topologia em ponte trifásica com 6 MOSFETS que comutam com uma frequência de 16kHz ou 24kHz ou (através do registo 5830h).

O rendimento do conversor de potência é obtido através da minimização das resistências térmicas, do uso da tecnologia mais recente de MOSFET, da protecção térmica interna (se as temperaturas forem excessivas, o binário de saída é reduzido, Figura 7.10), da protecção contra sobre correntes, da medição interna da corrente de saída, da sobretensão em caso de travagem regenerativa eleva a tensão das baterias para níveis inseguros.

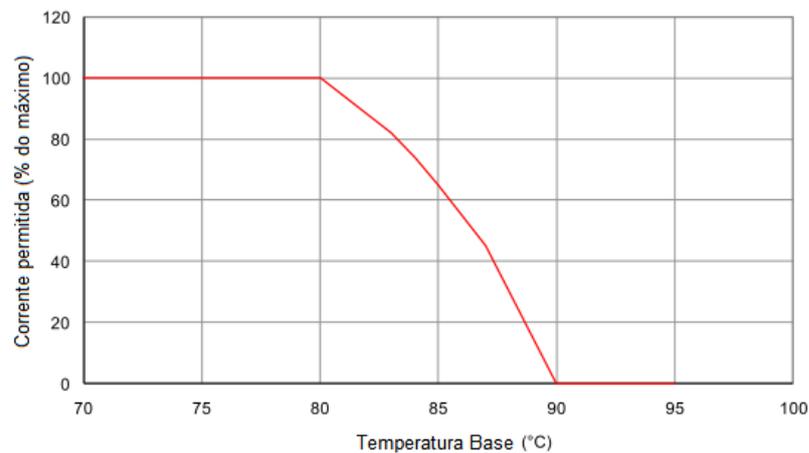


Figura 7.10 - Corrente permitida versus Base de temperatura do controlador

O controlador GEN4 para além de ter a função de controlo do motor oferece outras funções projectadas de forma a realizar a interface com veículos eléctricos. A conectividade e interligação com outros dispositivos são possíveis através de um barramento CAN e recorrendo ao protocolo CANopen.

Para o diagnóstico visual simples de falhas do sistema e monitorizar o seu funcionamento, um LED verde está contido no corpo do controlador. É continuamente aceso quando se encontra pronto para operar (sem problemas/falhas), mas pisca um número diferente de vezes, num padrão repetido, quando há uma falha. O número de vezes que o LED pisca indica o tipo de falha, anexo D.

### 7.2.1 - Interface CAN (USB-para-CAN)

O módulo USB-para-CAN, Figura 7.11, realiza a interface entre barramentos CAN e os barramentos USB (Versão 2.0).



Figura 7.11 - Módulo Interface CAN (USB-para-CAN)

O sistema contém um microcontroladores de 16 bits integrado que tem várias funcionalidades pois garante uma transmissão fiável e sem perdas, permite receber mensagens em redes CAN com uma taxa de transmissão alta bem como quando o barramento está subcarregado.

Além disso, as mensagens são fornecidas com um sinal de tempo e podem ser filtradas e armazenadas directamente em *bufferes* de forma a compactar as mensagens CAN em mensagens USB.

### 7.2.2 - Dissipador de Calor

De modo a garantir o máximo desempenho do controlador GEN4-80 é necessário garantir que a temperatura de funcionamento do mesmo seja relativamente baixa, a rondar os 25°C.

Tabela 7-4 - Temperatura de operação do controlador GEN4-80

Temperatura de operação	-30°C a +25°C (corrente não limitada e sem limite de tempo de actuação)
	+25°C a +80°C (corrente não limitada, mas tempo de operação reduzido)
	+80°C a +90°C e -40°C a -30°C (com limitações)

Na verdade a temperatura no interior do veículo é quase sempre superior aos 25°C, o que nos obriga a ter de utilizar um dissipador de calor. Os dissipadores de alhetas são considerados melhores do que placas planas. Por exemplo, um dissipador de calor de alhetas usado pela Sevcon tem um dimensão de 330mm x 220mm e tem uma resistência térmica de 0,3°C/W, enquanto que uma placa plana de 420mm x 270mm x 9,5mm dará aproximadamente o mesmo desempenho térmico (0,3°C/W). O *rating* da resistência térmica de um dissipador de alhetas com 330mm x 280mm de dimensão é de 0,2°C/W, enquanto que a resistência térmica sem dissipadores adicionais é de 0,5°C/W. O desempenho de refrigeração é afectado pelo nivelamento da superfície de montagem e da transferência térmica entre o dissipador e o GEN4-80. Uma forma de garantir uma transferência térmica eficaz consiste na aplicação de

massa térmica de modo a que esta fique colocada de forma uniforme entre ambas as superfícies.

### 7.2.3 - Software e plataforma de interface do controlador

O software utilizado tanto na configuração do controlador bem como aquisição de dados (log's) é fornecido pela SEVCON empresa fabricante do controlador, sendo intitulado C6944 Shiroko Design Verification Test System - Customer Version 12.422.

Inicialmente foi necessário realizar um procedimento de instalação do software. Após a instalação executa-se o programa DVT do qual surge a página apresentada abaixo, na Figura 7.12.

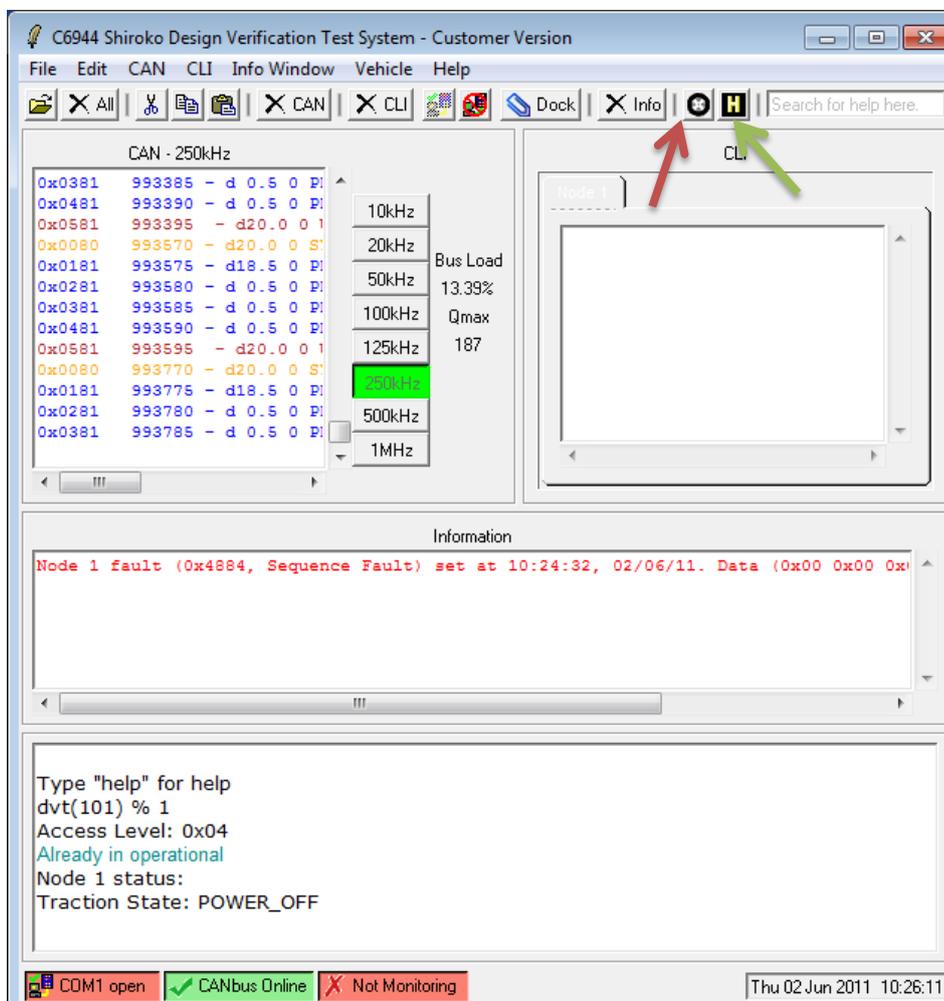


Figura 7.12 - Página Inicial do Software - comunicação do computador com o controlador

Já com o sistema de interface ligado entre o computador e controlador, é necessário garantir as comunicações CAN entre ambos os dispositivos necessitando escolher a frequência de comunicação (250KHz).

De seguida selecciona-se o ícone do DVT-HELPER (H - seta Verde), donde surge uma nova janela (Figura 7.13). Nesta janela é possível configurar todo o tipo de parâmetros e portas inerentes ao controlador, ao *encoder*, ao motor e também definir aos ganhos necessários para o controlo.

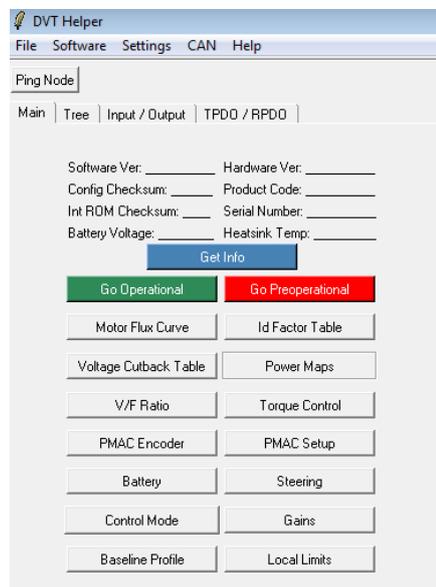


Figura 7.13 - Configurações do controlador

O software também permite monitorizar o funcionamento do controlador, em tempo real através de uma janela auxiliar ou através da criação de ficheiros (log's) que são interpretados posteriormente pelo Microsoft Excel. A janela auxiliar é intitulada interface do veículo, sendo o seu ícone característico indicado pela seta vermelha na Figura 7.12. Se quisermos efectuar um teste apenas é preciso utilizar o botão de *play* de forma a se poder ver em tempo real os valores ou guarda-los no ficheiro log.csv, Figura 7.14.

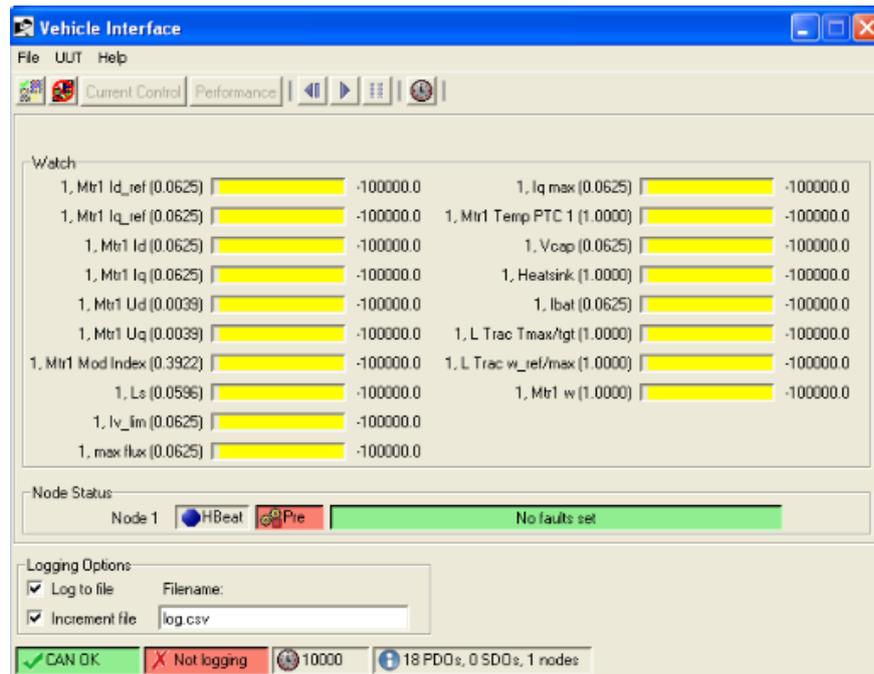


Figura 7.14 - Janela interface do veículo

Na verdade para monitorizar é necessário efectuar um pedido, ou seja, é necessário solicitar o registo específico do que se tenciona verificar efectuando a sua invocação durante a fase de configuração.

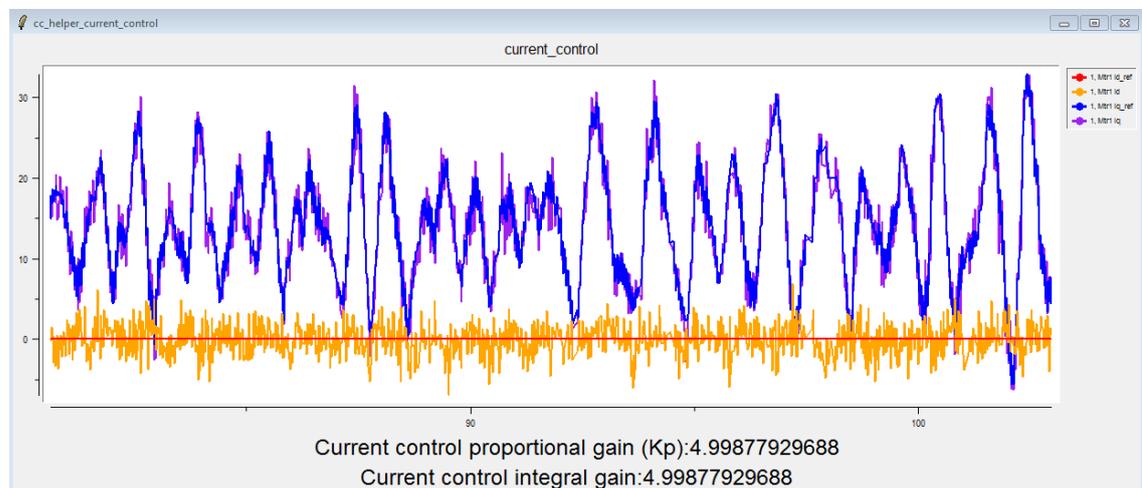


Figura 7.15 - Janela de monitorização em tempo real

### 7.3 - Conclusões

Na verdade tanto o motor PMS 150W como o controlador GEN 4 são produtos com tecnologia bastante recente e de elevada eficiência, com rendimento superior a 90%.

A grande dificuldade neste capítulo consistiu em resumir as funcionalidades do controlador visto este permitir um vasto leque de configurações e por conseguinte um vasto leque de

funcionalidades. Em anexo D apresento a totalidade da informação respeitante ao controlador e motor.

Foi possível concluir que a documentação de todos os sistemas permite a correcta configuração e manuseamento dos mesmos, facilitando a implementação e análise dos resultados.

# Capítulo 8

## Implementação e Resultados Experimentais

Neste capítulo é apresentada a componente prática do trabalho.

Inicialmente começa-se por realizar ensaios aos sistemas referidos no capítulo anterior, apenas em bancadas de ensaios.

Findos estes ensaios, preparar-se-á o veículo a nível mecânico bem como a nível chapa. Paralelamente começou-se a projectar os sistemas de acoplamento e suporte do motor e controlador.

Com os vários sistemas devidamente acomodados no veículo, passa-se à fase de testes. Sendo necessário validar todos os sistemas de forma a minimizar os riscos, respeitando sempre as normas de segurança.

Após os vários ensaios serão obtidas as diversas conclusões inerentes ao projecto.

### 8.1 - Ensaio ao PMS 150W

Inicialmente definiu-se o tipo de ensaios necessários realizar à máquina. Visto esta ser uma máquina síncrona de ímanes permanentes e permitir funcionar de igual forma como gerador e como motor. Os primeiros ensaios serão realizados com a máquina a operar como gerador e posteriormente a operar como motor de forma a ser possível validar as características apresentadas na folha de características da máquina.

#### 8.1.1 - Banca de Ensaio

Para ser possível realizar os ensaios à máquina foi necessário conceber uma estrutura de suporte de forma a ser possível acoplá-la nas bancas de ensaios, Figura 8.1.

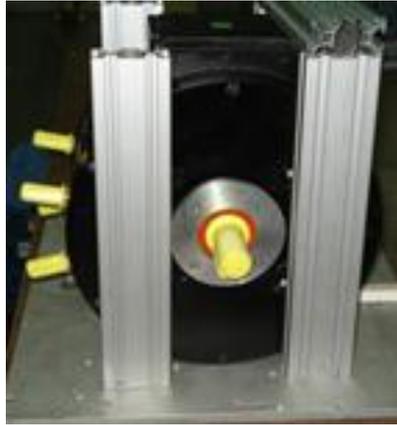


Figura 8.1 - Suporte do motor para a banca de testes

A banca utilizada nos ensaios como gerador integra uma máquina de indução da Siemens comandada por um controlador da Emerson, Figura 8.3. A máquina da Siemens está acoplado a um dos lados do transdutor de binário Figura 8.4 e do outro lado está acoplada a máquina a ensaiar como gerador, Figura 8.2.

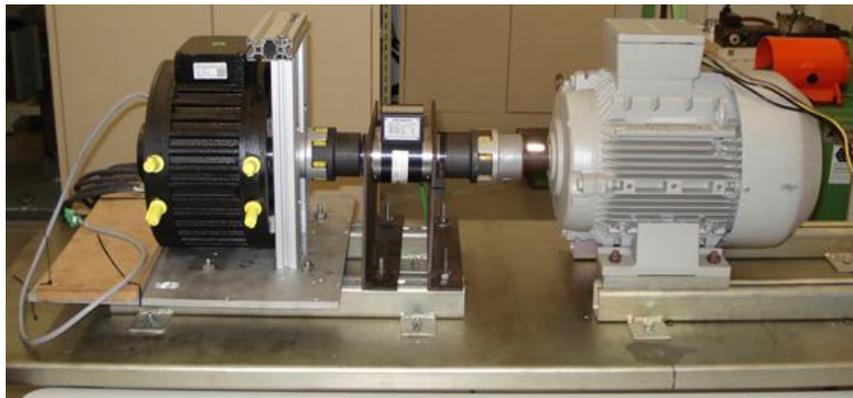


Figura 8.2 - Banca de ensaio da máquina síncrona de ímãs permanentes PMS 150 W nos ensaios como gerador

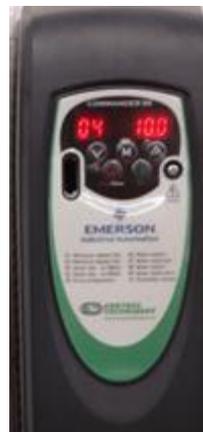


Figura 8.3 - Controlador Emerson, responsável pelo controlo da máquina de indução da Siemens

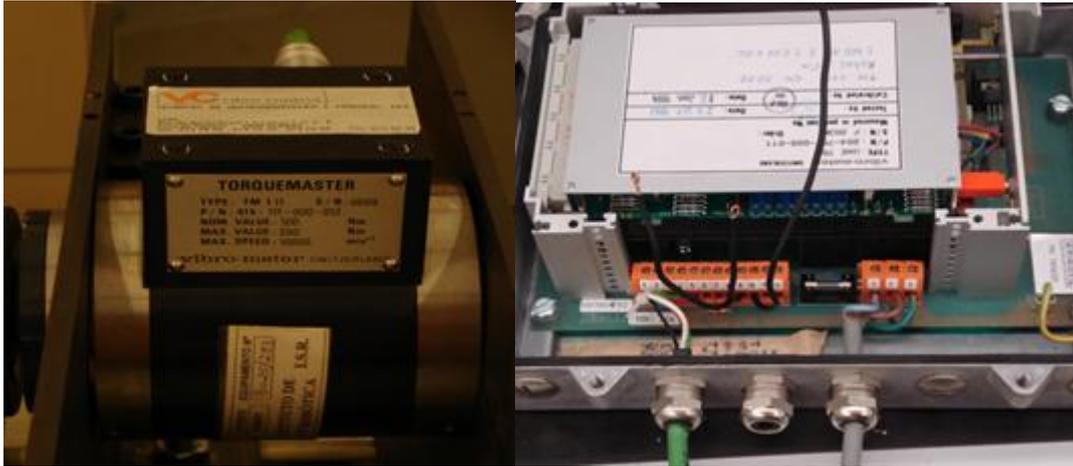


Figura 8.4 - Transdutor de binário e respectiva interface

Para realizar os ensaios à máquina eléctrica como motor, foi necessário acoplá-la a uma segunda bancada de ensaios específica para ensaios de máquinas rotativas, Figura 8.5.



Figura 8.5 - Banca de ensaio da máquina síncrona de ímanes permanentes PMS 150 W nos ensaios como motor

Esta segunda banca contém um dinamómetro associado a uma balança e um conjunto de máquinas eléctricas DC e AC responsáveis por criar um ciclo de energia que permita a recuperação de energia durante os ensaios.

Quando o induzido de uma máquina DC é percorrido por corrente eléctrica desenvolve-se um binário mecânico. De acordo com a terceira lei de Newton esse binário é equilibrado por um outro binário de reacção igual e oposto que se desenvolve na carcaça da máquina. Nas máquinas normais este binário é transmitido à base de sustentação. Mas se a carcaça for sustentada por rolamento então deslocar-se-á. Este movimento poderá ser transmitido a uma balança através de um braço podendo-se assim medir a força necessária para que a carcaça

fique imóvel. Como se conhece o comprimento do braço pode-se determinar o binário de reacção.

O binário de reacção é igual ao binário desenvolvido no induzido do dinamómetro que por sua vez é igual ao binário que se desenvolve na máquina que está a ser testada, desde que a velocidade esteja estabilizada. Há assim possibilidade de conhecer o binário desenvolvido por uma máquina de ensaio desde que se conheça a velocidade pode-se calcular a potência posta em jogo.

Nesta bancada a potência eléctrica desenvolvida no dinamómetro é devolvida à rede, despendendo-se apenas a energia que serve para alimentar as perdas.

Assim sendo, verifica-se que se o motor DC do dinamómetro estiver a funcionar como gerador, portanto ensaio a um motor, desenvolve energia eléctrica para a rede DC com a qual está em paralelo. Se a tensão do dinamómetro mais a da rede DC for superior à força electromotriz da máquina do grupo conversor, esta funcionará como motor e o motor de indução a que está acoplada funcionará como gerador, desenvolvendo energia para a rede de AC (~230V).

### 8.1.2 - Ensaio do PMS 150W como Gerador

De forma a validar os parâmetros característicos da máquina eléctrica PMS 150W apresentados na Tabela 7-1, achou-se por bem realizar alguns testes da máquina como gerador sabendo da sua reversibilidade de funcionamento como motor e gerador.

Assim sendo, começa-se por realizar testes em vazio e seguidamente acoplando cargas à saída do gerador de modo a perceber o seu comportamento.

Os ensaios da máquina PMS 150W como gerador têm por base o seguinte procedimento:

1. Ligar o controlador Emerson;
2. Colocar o controlador em modo manual;
3. Variar a frequência aplicada ao motor Siemens;
4. Medir as RPM's do conjunto;
5. Medir a tensão composta (fase/fase) á saída do gerador;
6. Medir a frequência gerada;

Os ensaios serão condicionados pela máquina eléctrica da Siemens pois apenas nos permite realizar testes até às 3000 rpm. Na verdade isto acontece pois esta máquina de indução tem apenas 5kW de potência e uma velocidade nominal de 1450rpm aos 50Hz. Desta forma aplicando-lhe 100Hz conseguimos obter as 3000rpm.

Desta forma passa-se aos ensaios, sendo apresentados nos subitens seguintes.

### 8.1.2.1 - Ensaio em vazio

O ensaio em vazio do PMS 150W como gerador segue o procedimento apresentado anteriormente. Os valores obtidos ao longo dos ensaios com diferentes referências de velocidade, permite-nos validar o valor da constante da tensão ( $k_e=8,87$  V/1000rpm) e da tensão composta ( $V_{(AC)}=56,60$  V AC) fornecida pelo fabricante. Recorrendo às equações 8.1 e 8.2 bem como dos valores obtidos dos ensaios, foi possível construir a seguinte tabela.

$$V(AC) = \frac{\text{Tensão F/F} * 6000}{RPM} \quad (8.1)$$

$$K_e = \frac{\text{Tensão F/F} * 1000}{RPM} \quad (8.2)$$

Tabela 8-1 - Resultados da máquina como gerador em vazio

RPM	Tensão Fase/Fase (V)	Confirmação $V(AC)=56,60$ V AC	Confirmação $K_e = 8,87$ V/1000rpm	Frequência PMS150 W (Hz)
287	2,5	52,3	8,71	19,2
588	5,2	53,1	8,84	39,2
888	7,9	53,4	8,90	59,2
1188	10,5	53,0	8,84	79,2
1484	13,2	53,4	8,89	98,9
1783	15,8	53,2	8,86	118,9
2080	18,4	53,1	8,85	138,6
2371	21	53,1	8,86	158,1
2660	23,6	53,2	8,87	177,6
2948	26	52,9	8,82	196,3

Através destes ensaios foi possível validar a constante  $K_e$ , bem como a tensão composta gerada pela máquina estando os valores obtidos muito idênticos aos parâmetros característicos da máquina síncrona de ímãs permanentes apresentados na Tabela 7-1.

### 8.1.2.2 - Ensaio em carga

Perante o ensaio anterior verificou-se que os valores da tensão gerados pelo PMS 150W são bastante baixos, o que condiciona os testes em carga pois as únicas cargas disponíveis no laboratório são trifásicas de 4kW a 230V, Figura 8.6.

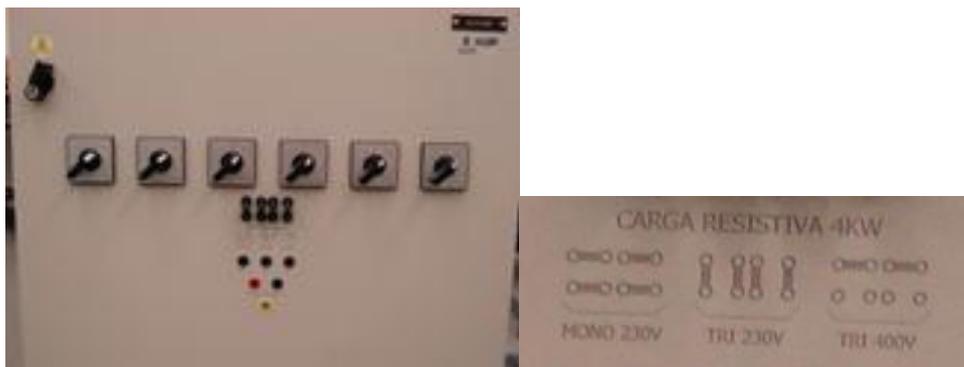


Figura 8.6 - Cargas Resistivas de 4kW a 230V

Assim sendo, se lhe aplicarmos uma tensão a rondar os 26V teríamos apenas uma potência dissipada de 9,2W, o que não seria significativa para realizar o ensaio de uma máquina de 20kW.

Desta forma aplicou-se um autotransformador trifásico, Figura 8.7, de forma a elevar a tensão gerada, sendo ajustado de modo a obtermos na saída uma tensão 6 vezes superior à tensão gerada. Desta forma integrando o gerador, o autotransformador e as cargas é possível realizar ensaios aplicando carga ao gerador.

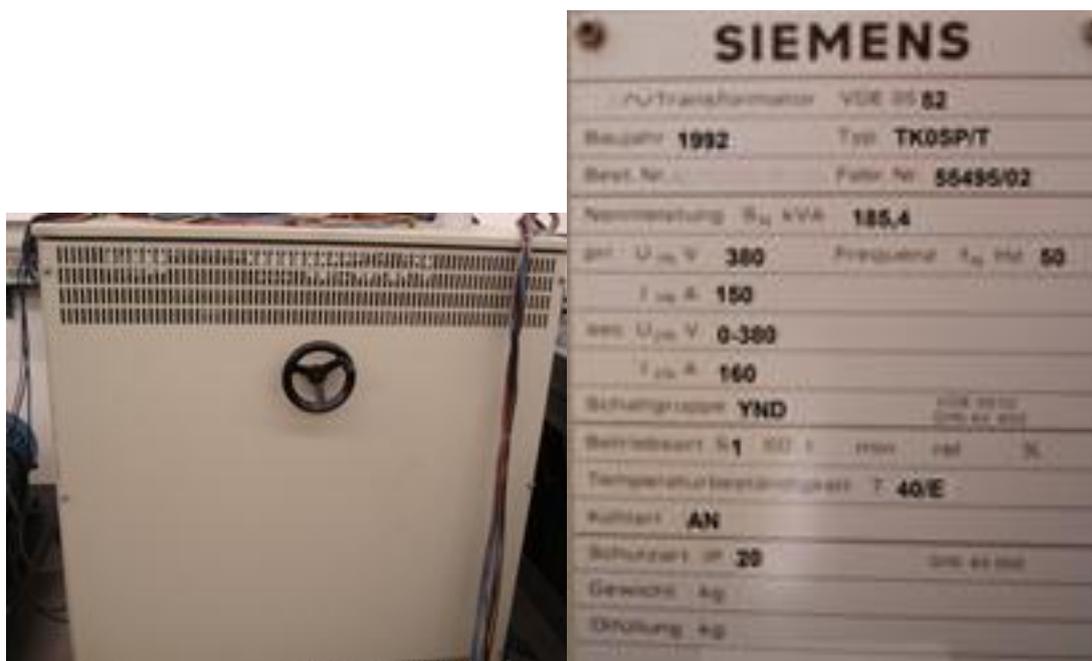


Figura 8.7 - Autotransformador trifásico da Siemens

Os ensaios do gerador em carga permitem obter os valores das constantes  $k_e$  e  $K_t$ , bem como dos níveis de tensão e corrente tanto à saída do gerador como na carga.

Inicialmente começou-se por colocar uma carga de  $24,4 \Omega$ , donde se obtiveram vários valores apresentados na tabela seguinte.

Tabela 8-2 - Resultados dos ensaios da máquina como gerador com uma carga de 24,4Ω.

		$K_t=0,14$ T/A	$K_e = 8,87$ V/1000rpm		$V_{(AC)}=56,60$ V AC		
RPM	Binário (Nm)	T/A	Tensão <sub>F/F</sub> (V)	V/1000rpm	V AC	$I_{linha}$ (A)	Esfasamento
280	0,99	0,14	2,43	8,67	52,0	7,09	12
575	1,98	0,14	5,05	8,78	52,7	13,88	11
870	2,79	0,14	7,57	8,70	52,2	20,31	13
1162	3,49	0,13	10,06	8,66	51,9	26,3	8
1467	4,11	0,13	12,47	8,50	51,0	31,73	7
1737	4,60	0,13	14,74	8,49	50,9	36,53	4
2015	5,04	0,12	16,93	8,40	50,4	40,78	3
2280	5,41	0,12	19,03	8,35	50,1	44,77	1
2544	5,80	0,12	21,04	8,27	49,6	48,09	2
2801	6,23	0,12	22,92	8,18	49,1	50,95	5

Na Carga			Potência Gerador (W)
Resistência (Ω)	Tensão (V)	Corrente (A)	
24,4	15,35	0,72	29
24,4	31,59	1,5	119
24,4	47,3	2,22	254
24,4	62,1	2,89	424
24,4	75,7	3,52	632
24,4	88,0	4,06	836
24,4	99,2	4,53	1063
24,4	108,8	4,99	1292
24,4	117,7	5,38	1545
24,4	125,6	5,74	1829

Através deste ensaio comprovou-se novamente os parâmetros característicos da máquina fornecidos pelo fabricante.

Após os ensaios apenas com uma carga, acoplou-se em paralelo com a primeira uma segunda com o mesmo valor, ficando assim com uma carga de 12,2Ω.

Realizando novamente os ensaios mas com um valor de carga diferente obteve-se novamente resultados que comprovam o correcto funcionamento da máquina PMS 150W, Tabela 8-3.

Tabela 8-3 - Resultados dos ensaios da máquina como gerador com duas cargas em paralelo de 12,2  $\Omega$ 

RPM	Binário (Nm)	$K_t=0,14$ T/A	$K_e = 8,87$ V/1000rpm		$V_{(AC)}=56,60$ V AC	$I_{linha}$ (A)	Esfasamento
		T/A	Tensão $F/F$ (V)	V/1000rpm	V AC		
277	1,48	0,14	2,37	8,53	51,2	10,81	15
569	2,97	0,14	4,88	8,58	51,5	21,25	10
862	4,25	0,14	7,31	8,48	50,9	30,58	7
1154	5,33	0,14	9,66	8,37	50,2	38,53	3
1447	6,20	0,14	11,94	8,25	49,5	45,42	2
1729	6,85	0,13	14,07	8,14	48,8	51,09	5
2003	7,34	0,13	16,11	8,04	48,3	55,8	9
2270	7,68	0,13	18,05	7,95	47,7	59,48	11
2534	7,93	0,13	19,94	7,87	47,2	62,68	14
2794	8,11	0,12	21,79	7,80	46,8	65,35	16

Na Carga			Potência Gerador (W)
Resistência ( $\Omega$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	
12,2	12,5	0,65	43
12,2	25,11	2,38	177
12,2	36,55	3,39	384
12,2	47,1	4,31	644
12,2	55,8	5,16	939
12,2	63	5,8	1240
12,2	69,01	6,28	1539
12,2	74,01	6,7	1826
12,2	78,1	7,09	2105
12,2	81,5	7,38	2374

### 8.1.3 - Ensaio do PMS 150W como Motor

De forma a ser possível efectuar os ensaios da máquina síncrona de ímanes permanentes como motor, foi necessário realizar a montagem representada pelo diagrama de blocos, Figura 8.8, bem como efectuar a ligação do sistema de refrigeração de água do motor, da colocação do controlador sob o dissipador e ligar as baterias

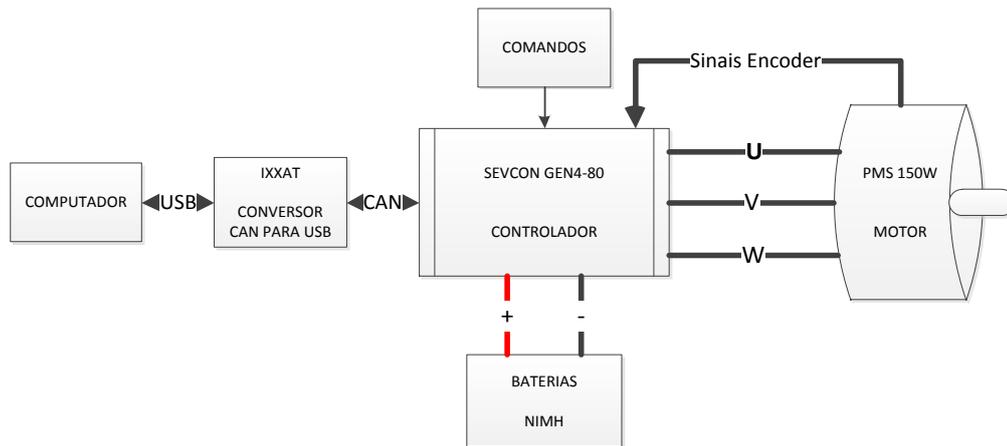


Figura 8.8 - Diagrama de blocos exemplificativo da montagem dos sistemas a utilizar nos ensaios da máquina síncrona de ímãs permanentes como motor

A Figura 8.9 representa o esquema de ligações correspondentes ao diagrama apresentado na Figura 8.8.

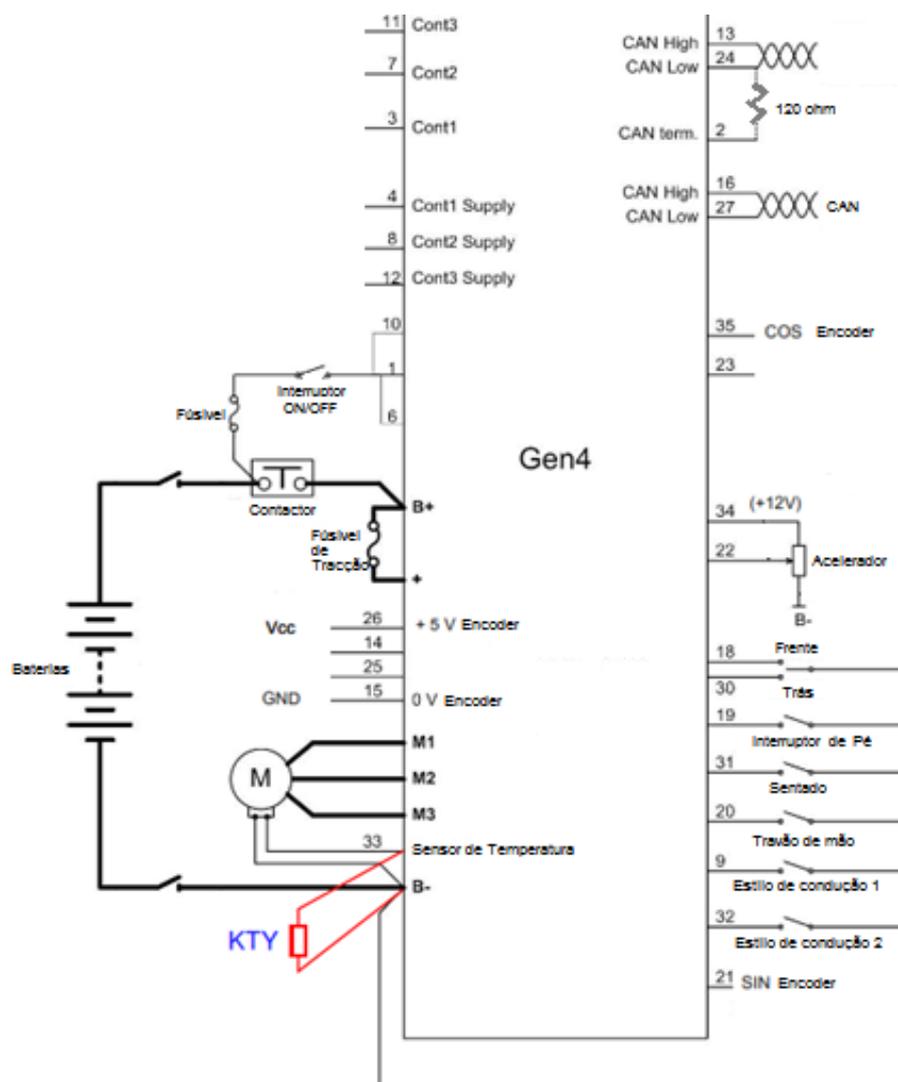


Figura 8.9 - Esquema de ligações do controlador SEVCON GEN4-80

A placa de comandos apresentada na Figura 8.10 constitui a interface de operação com o controlador contendo os interruptores representados no esquema da Figura 8.9, sendo estes responsáveis por colocar em operação o controlador (interruptor on/off), por seleccionar o sentido de rotação (frente, trás), entre outros.

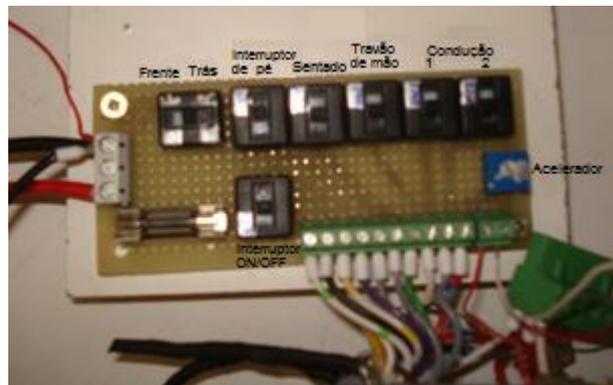


Figura 8.10 - Placa de comando do controlador

### 8.1.3.1 - Ensaio em vazio

Após a concepção e montagem de todos os sistemas eléctricos apresentados no ponto anterior passou-se à fase de ensaios do PMS 150W como motor em vazio, utilizando a segunda banca de ensaios, Figura 8.11.

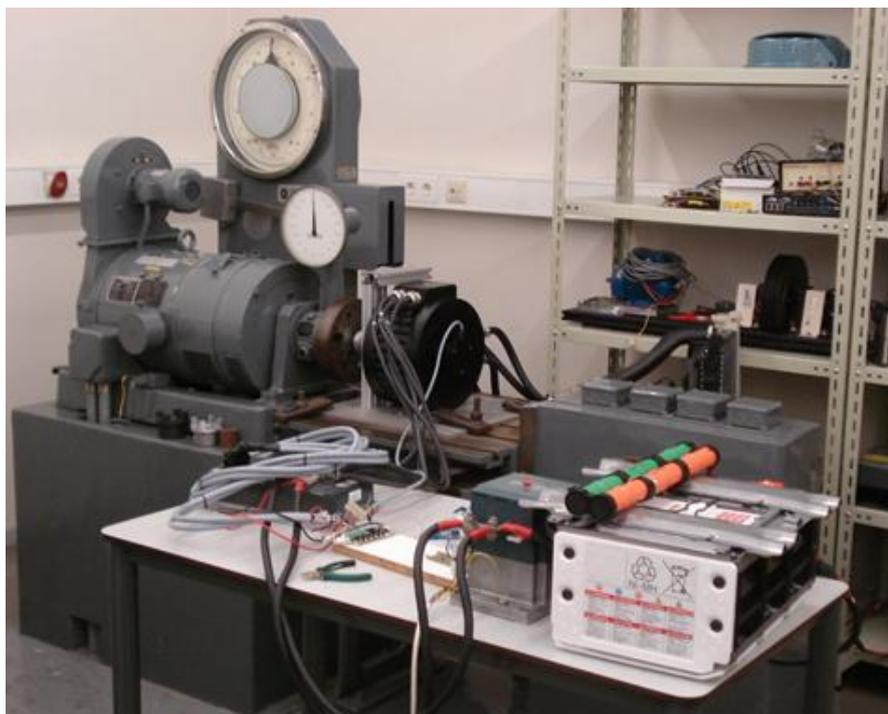


Figura 8.11 - Banca de ensaios da máquina eléctrica como motor

Este ensaio tinha como principal objectivo validar o funcionamento da máquina bem como dos sistemas necessários ao funcionamento da mesma. Sendo necessário inicialmente programar/parametrizar o controlador de acordo com as características do *encoder*, da máquina eléctrica, do termistor e dos comandos utilizados na interface com o utilizador.

Através dos ensaios foi possível validar novamente a performance da máquina eléctrica, segundo o princípio apresentado no ensaio realizado no ponto 8.1.2.1.

Tabela 8-4 - Resultados dos ensaios da máquina como motor em vazio

RPM	Tensão F/F (V)	Confirmação V(AC)=56,60 V AC	Confirmação Ke = 8,87 V/1000rpm	Tensão Baterias (V)	Corrente Baterias (A)
268	2,34	52,4	8,73	94,1	5,2
553	4,8	52,1	8,68	94,0	5,2
870	7,6	52,4	8,74	94,1	5,3
1223	10,7	52,5	8,75	94,0	5,4
1560	13,6	52,3	8,72	93,8	5,5
1811	15,8	52,3	8,72	93,8	5,6
2116	18,5	52,5	8,74	93,8	5,7
2424	21,2	52,5	8,75	93,8	5,7
2720	23,7	52,3	8,71	93,4	5,8
3000	26,2	52,4	8,73	93,3	5,8

### 8.1.3.2 - Ensaio com carga

Validado o funcionamento do motor em vazio, passou-se a fase dos testes em carga, utilizando novamente a segunda banca de ensaios, Figura 8.11.

Foi necessário para este ensaio, colocar em funcionamento o dinamómetro atrás apresentado para além de outros sistemas auxiliares imprescindíveis ao funcionamento do mesmo, sendo observar na Figura 8.12 o esquema característico.

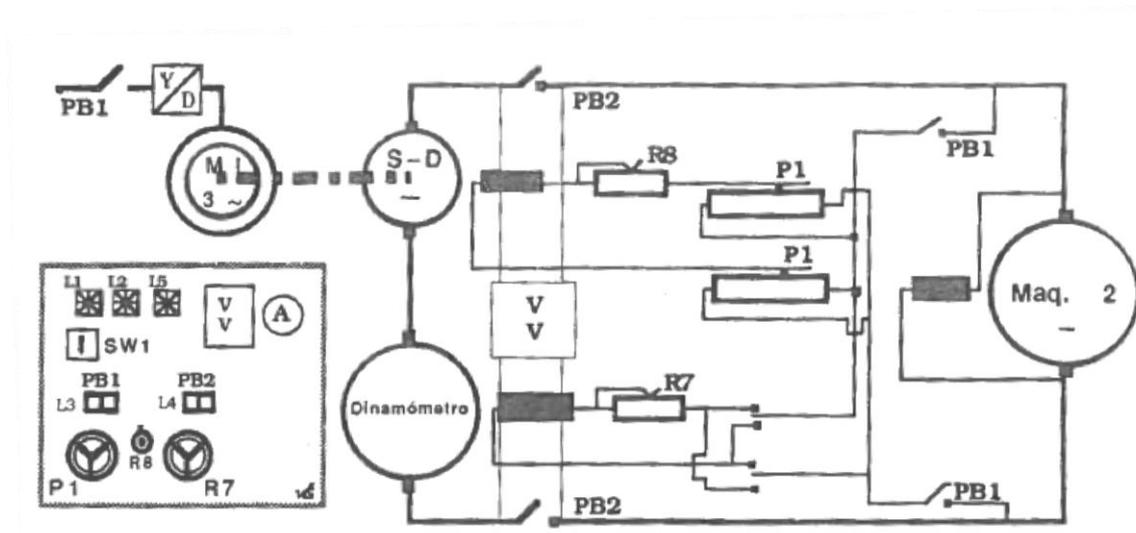


Figura 8.12 - Esquema da banca de ensaios de motores

De seguida será apresentado o procedimento necessário efectuar de modo a operar a bancada de ensaios de motores, com o dinamómetro a funcionar como gerador:

- Ligar a tensão AC e tensão DC;
- Verificar que o indicador da balança está travado;
- Arrancar a máquina eléctrica a ensaiar;
- Verificar o sentido de rotação da banca, e se se deve conservar o contrapeso ou não;
- Actuar no interruptor SW1. Deverão acender as lâmpadas L1 e L5;
- Colocar o potenciómetro P1 na posição 0, R8 na posição média e R7 na posição  $R_{máxima}$ ;
- Pressionar o botão luminoso PB1 (EIN) e esperar que acenda a lâmpada L3, sinal de que se deu a comutação estrela-triângulo;
- Ajustar, através de P1 e R8, a tensão do conjunto dinamómetro-grupo conversor, até que seja igual à tensão da rede DC - Ler os valores no voltímetro duplo;
- Quando as duas tensões forem iguais estabelece-se o paralelo, actuando no botão luminoso PB2;
- Destruvar o indicador da balança
- Actuar em R7, R8 e P1, para o dinamómetro entrar em carga. O amperímetro deverá desviar para a direita (gerador)

A potência frenada é calculada através da seguinte equação:

$$P = \left( \frac{1}{0,974} \right) \times T \times n \left[ W; kgm, \frac{rot}{min} \right] \quad (8.3)$$

Antes de começar a realização dos ensaios foi efectuada a medição da tensão das baterias estando estas com 93,4V. De seguida foi efectuada o procedimento acima mencionado que

consistia em por em funcionamento o PMS 150 W a uma velocidade constante de forma a ser possível colocar em funcionamento o dinamómetro.

Com o dinamómetro em funcionamento começou-se a elevar a carga de forma controlada, mantendo as rpm do PMS 150W, donde se obteve os dados apresentados na primeira linha da Tabela 8-5.

Na verdade caso se aumente muito a carga, o PMS 150W começa a reduzir a velocidade (aninhar) visto não ter binário suficiente para combater a carga, devido à referência de binário aplicada ao controlador estar fixa. Por outro lado se se aumentar a referência dada ao controlador pelo acelerador este faz variar o valor da velocidade aplicada ao veio do dinamómetro o que faz com que este sai-se de funcionamento.

Assim sendo tornou-se difícil sincronizar a máquina a testar com o dinamómetro condicionando-nos a fase de ensaios, donde apenas se conseguiu obter dois resultados, Tabela 8-5.

Tabela 8-5 - Resultados dos ensaios da máquina como motor com carga variada

RPM	Balança (kgm)	Potência		Binário (Nm)	I <sub>linha</sub> (A)	Tensão F/F (V)	Tensão Baterias (V)	Corrente Baterias (A)
		CV	kW					
892	1	1,25	0,93	9,8	67,4	9,64	92,4	8,4
2000	6,1	17,03	12,71	59,78	416	17,84	90,2	110

Analisando os resultados obtidos conseguiu-se perceber que a máquina eléctrica correspondia em tudo aos valores indicados pelo fabricante, dando-nos garantias do bom funcionamento do conjunto máquina eléctrica e controlador.

## 8.2 - Veículo Eléctrico de Competição

Esta secção aprofundado a preparação do veículo tanto a nível mecânico como eléctrico. A nível mecânico bem como de aparência foi necessário realizar uma profunda reparação.

Paralelamente à preparação do veículo eléctrico foi necessário escolher a topologia a adoptar no veículo eléctrica. A topologia escolhida é topologia B (Figura 2.9), onde o motor eléctrico é acoplado directamente à caixa de velocidades estando esta bloqueada numa relação de caixa.

Desta forma foi necessário desenvolver tanto o suporte de fixação como o acoplamento necessário de forma a interligar o motor eléctrico à caixa de velocidades.

Após a concepção e colocação dos sistemas de acoplamento e sustentação no veículo foi necessário realizar uma análise relativamente à distribuição de peso de forma a uniformizar o peso do veículo.

Finda a fixação e acoplamento de todos os sistemas inerentes ao projecto no veículo passar-se-á aos ensaios do veículo. O primeiro ensaio será realizado com as rodas responsáveis pela tracção elevadas do chão de forma a testar o veículo em vazio.

Após a validação de todos os sistemas realizar-se-á testes em estrada.

### 8.2.1 - Preparação do Veículo

A preparação do veículo começou com a desmontagem tanto do interior como do exterior do veículo, de forma a se poder reparar a chapa eliminando alguns pontos de ferrugem.

Após o tratamento de chapa e fixação do arco de segurança (Rollbar), passou-se à parte da pintura.

A nível mecânico foi necessário realizar uma revisão geral pois muitos dos materiais já se encontravam muito degradados sendo necessário substituí-los por novos.

Através das Figura 8.13 e Figura 8.14 é possível visualizar o veículo antes de ser reparado e depois da reparação, já pronto.



Figura 8.13 - Preparação do veículo - Antes



Figura 8.14 - Preparação do veículo - Depois

#### 8.2.1.1 - Suporte de fixação do PMS 150W ao veículo

O suporte de fixação do PMS 150W foi pensado de forma a se utilizar o apoio original do veículo bem como as furações existentes na cloche da caixa de velocidades, aproveitando também os apoios desta ao veículo. Desta forma foi necessário desenhar e conceber o suporte como é ilustrado na Figura 8.15.



Figura 8.15 - Suporte de fixação e acoplamento do PMS 150 W à caixa de velocidade e ao veículo

### 8.2.1.2 - Suporte de fixação do controlador no veículo

O controlador com referido no capítulo 7, necessita de ser protegido contra elevadas vibrações. Desta forma desenvolveu-se um suporte que contém apoios de borracha, com a função de reduzir as vibrações aplicadas ao controlador, Figura 8.16.

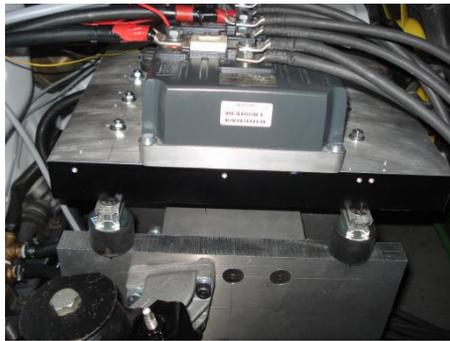


Figura 8.16 - Suporte de fixação do controlador no veículo

### 8.2.1.3 - Acoplamento do PMS 150W

De forma a poder transmitir a potência do motor eléctrico à caixa de velocidades e por conseguinte às rodas, foi necessário desenvolver um sistema de acoplamento.

Este sistema foi pensado de forma a garantir alguma folga bem como a absorver alguns binários transitórios iniciais.

Assim sendo, optou-se por utilizar uma embraiagem original do Fiat Uno 45 S, donde se aproveitou as furações dos cravos de sustentação do ferodo, visto esta permitir tanto as folgas como através das molas absorver os binários transitórios.

Acoplando as duas peças ilustradas na Figura 8.17 é possível transmitir a potências do motor para a caixa de velocidades, visto ambas estarem preparadas para serem acopladas aos veios tanto do motor como da caixa de velocidades.



Figura 8.17 - Acoplamento do PMS 150W à caixa de velocidades

#### 8.2.1.4 - Distribuição de peso do Veículo

Após a concepção de todos os sistemas de fixação e acoplamento foi necessário realizar um estudo relativamente à distribuição de peso pelo veículo.

Este estudo começou com a colocação dos sistemas que apenas têm um posicionamento possível, como é o caso da caixa de velocidades, motor eléctrico e radiador.

De seguida com o veículo sobre as balanças foi alterado o posicionamento dos restantes sistemas de forma a se obter um “cross” (peso cruzado) muito próximo dos 50%.

Sabendo que o veículo necessita de quatro packs de baterias, tendo estas um peso médio de aproximadamente 75Kg, tentou-se compensar o peso do piloto colocando-as no lugar do pendura.

Desta forma a distribuição dos vários sistemas no veículo seguem o diagrama apresentado no anexo E. Através da Figura 8.18, é possível verificar o peso máximo do veículo bem como a distribuição relativamente à parte dianteira, traseira, esquerda e direita do veículo. Desta forma garantiu-se um peso cruzado de 50.8% muito próximo do valor desejado



Figura 8.18 - Distribuição de peso do VEC

#### 8.2.2 - Ensaio ao Veículo Eléctrico

Os ensaios ao veículo foram delimitados visto ser necessário validar tanto a vertente mecânica como eléctrica. Desta forma o primeiro teste foi realizado com as rodas levantadas de modo a ser possível detectar alguma anomalia. O segundo ensaio consistia em perceber se

a máquina eléctrica produzia binário suficiente para movimentar o veículo, sendo realizado um percurso no interior do Campus da Faculdade de Engenharia - Parque A.

Findos os ensaios intermédios realizaram-se teste de modo a saber a velocidade máxima atingida bem como o número de quilómetros que o veículo conseguia percorrer com os 4 packs de baterias em paralelo.

#### 8.2.2.1 - Com as rodas levantadas

Com todos os sistemas acoplados ao veículo e tendo presente a temática da segurança achou-se por bem realizar os primeiros testes ao veículo com as rodas levantadas. Desta forma validou-se o bom funcionamento tanto da parte mecânica como da parte eléctrica.

#### 8.2.2.2 - Em estrada

Este ensaio consistiu em perceber se o sistema de tracção conseguia produzir binário suficiente para movimentar o veículo em percursos com diferentes inclinações, nomeadamente em zonas planas e zonas inclinadas (subidas e descidas). O percurso realizado está apresentado na Figura 8.19.



Figura 8.19 - Percurso realizado durante os ensaios ao veículo

O comportamento obtido pelo veículo foi bastante satisfatório, pois consegue superar todo o trajecto sem aparentar qualquer dificuldade.

#### 8.2.3 - Testes finais conduzindo o VEC

Os testes finais realizados consistiam em perceber a autonomia do veículo, a velocidade máxima atingível e o método de condução. Tendo a possibilidade de escolher qual a relação

de caixa a fixar, optou-se por engrenar a segunda relação de caixa devido ao percurso ser um pouco sinuoso, podendo desta forma atingir uma maior velocidade de ponta.

Na verdade a condução necessária realizar aos comandos do VEC é rigorosamente igual à praticada num veículo convencional sem embraiagem. Sendo apenas necessário realizar um processo que consistem em ligar o veículo, escolher o sentido de marcha e depois é só premir o acelerado e o travão fazendo um condução convencional. Desta forma este veículo pode ser conduzido por qualquer pessoa visto não ser preciso qualquer tipo de adaptação.

A autonomia estimada para um veículo eléctrico depende muito do número de baterias colocadas no interior do veículo, bem como do percurso e da condução. Desta forma com os 4 packs de baterias em paralelo contendo uma energia de 1900Wh consegue-se percorrer aproximadamente 10 Km.

A velocidade máxima atingida rondou os 60km/h, demorando cerca de 17,7 segundos a percorrer os 145metros apresentados na Figura 8.19 a laranja, o que equivale a dizer que o veículo demora 30seg dos 0 aos 100Km/h.

### 8.3 - Conclusões

Neste capítulo realizaram-se vários ensaios práticos em laboratório ao sistema de tracção, salientando a obtenção de resultados muito próximos dos fornecidos pelos fabricantes.

Os cenários implementados tiveram uma complexidade elevada tanto a nível eléctrico/electrónico, como mecânico. Sendo a programação/parametrização do controlador uma tarefa bastante complexa e demorada.

A estratégia adoptada no que concerne à totalidade dos ensaios foi a correcta pois permitiu fragmentar os vários sistemas a utilizar no sistema global de tracção.

Desta forma, terminados os ensaios achou-se por bem começar a preparar o veículo de modo a se poder implementar o sistema testado no mesmo. Para isso foi necessário conceber diversos sistemas de acoplamento e sustentação permitindo acoplar o sistema no veículo.

Os testes realizados ao veículo eléctrico, demonstraram o seu correcto funcionamento ficando um pouco aquém do esperado, pois a velocidade máxima atingida pelo veículo ronda os 60 Km/h, valor abaixo do esperado (72Km/h).

Na verdade estes valores obtidos poderão estar condicionados pela programação/configuração do controlador ou mesmo pela performance das baterias utilizadas aquando dos ensaios.

# Capítulo 9

## Conclusões e Futuros Desenvolvimentos

### 9.1 - Conclusões Finais

Nesta dissertação, o estudo e a implementação dos sistemas inerentes à concepção de um veículo eléctrico foram discutidas em detalhe.

Inicialmente começou-se por estudar todas as temáticas necessárias à compreensão do princípio de funcionamento dos veículos eléctricos, aprofundando mais a temática dos sistemas de tracção. Durante este estudo concluiu-se que os veículos eléctricos conseguem ter um binário máximo disponível numa pequena gama de velocidades, o controlo vectorial juntamente com os motores síncronos de ímanes permanentes, permite aos veículos eléctricos disporem do binário máximo desde o arranque até uma gama de velocidades relativamente elevada, inclusive, para além da velocidade nominal de funcionamento do motor.

Após o estudo comparativo entre as várias máquinas eléctricas e métodos de controlo, escolheu-se a máquina síncrona de ímanes permanentes em detrimento das restantes máquinas eléctricas mencionadas, pela sua maior densidade de potência, pela sua menor dimensão e peso e pela sua superioridade em termos de eficiência.

Por outro lado, o método de controlo escolhido o Space Vector Modulation supera os restantes métodos pois permitir na saída tensões 15% maiores do que nos métodos de modulação usuais consentindo um uso mais eficiente da fonte de tensão de alimentação DC, com uma maior eficiência, reduzindo as comutações dos semicondutores 30% menos do que os utilizados nos métodos convencionais.

Sabendo que a potência debitada pelo motor de combustão interna do Fiat Uno de Troféu varia entre os 45CV (aproximadamente 30kW) e os 50CV, podendo ir no máximo até às 6000 rpm, tornou estes valores requisitos do projecto.

A escolha da máquina não foi fácil devido à falta de controladores existentes no mercado que cumprissem os requisitos das máquinas eléctricas. Desta forma optou-se por adquirir o

PMS 150W e o respectivo controlador GEN4-80, apesar deste conjunto apenas conseguir debitar 20kW.

Na verdade a familiarização com o controlador não foi muito fácil, pois foi necessário parametrizar e programar o controlador de forma a este conseguir reconhecer os vários sistemas que necessita de comunicar, como é o caso do *encoder*, do motor, dos comandos, etc.

Posteriormente realizaram-se vários ensaios em laboratório à máquina eléctrica e ao controlador, sendo possível validar o seu funcionamento comparando os resultados obtidos com os dados fornecidos pelos fabricantes.

Sendo o objectivo principal do projecto conceber um veículo totalmente eléctrico foi necessário realizar tarefas nunca antes realizadas por nenhum elemento da equipa, como foi o caso da reparação mecânica e de pintura, bem como a concepção dos sistemas de suporte e acoplamento.

Através dos vários ensaios realizados ao veículo eléctrico pode-se concluir que o principal objectivo foi concluído com sucesso, pois o veículo movimenta-se tendo uma autonomia de aproximadamente 10Km com uma velocidade máxima de 60Km/h.

Comparativamente podemos dizer que o Fiat Uno 45S do troféu da Challenger Desafio Único contém mais 20 CV do que veículo eléctrico, e permite a utilização de 5 relações de caixa enquanto o veículo eléctrico está condicionado a apenas uma única relação de caixa. Desta forma estamos bastantes satisfeitos com os resultados obtidos, podendo estes serem ainda melhores após a realização de alguns ajustes pretendidos ao nível da programação do controlador, bem como da utilização de outro tipo de baterias.

Para finalizar é necessário garantir que este projecto foi realizado num tempo muito reduzido pois apenas obtivemos a maior parte dos materiais a utilizar apenas a oito semanas da entrega desta dissertação.

De facto, este projecto para além de ter permitido uma evolução a nível tecnológico e científico, permitiu-nos criar sinergias e fortalecer a comunicação com o mundo empresarial tanto nacional como internacional, através dos pedidos de informação sobre produtos bem como através de pedidos de patrocínios. Estas tarefas realçaram ainda mais a pro actividade necessária num projecto deste índole obrigando-nos a resolver problemas de engenharia, a seleccionar produtos, a realizar análises de mercado, entre muitas outras posições.

## 9.2 - Futuros Desenvolvimentos

Nesta secção apresenta-se algumas das sugestões para trabalhos futuro, que poderão continuar a ser desenvolvidos no âmbito do Projecto Veículo Eléctrico de Competição.

Estando este projecto ainda numa fase embrionária pode-se garantir que a plataforma de trabalho é de grande qualidade, permitindo evoluir e melhorar a componente eléctrica e mecânica.

Inicialmente deve-se reformular a simulação desenvolvida durante esta dissertação, utilizando as características tanto do motor como do controlador utilizados na vertente prática desta dissertação de forma a parametrizar os respectivos modelos utilizados na simulação. Validada a simulação deve-se interligar o sistema de tracção com o sistema de alimentação e gestão de energia, a desenvolver pelos elementos responsáveis por esta parte do projecto, Desta forma torna-se possível simular o veículo completo, testando-o em todas as pistas correspondente a uma época da Challenger Desafio Único de modo a ser possível tirar várias ilações ao nível do comportamento veículo eléctrico.

Relativamente ao controlador é necessário aprofundar o estudo de modo a conseguir retirar o máximo rendimento do mesmo, visto este permitir realizar enumeras tarefas ainda não implementadas.

A nível mecânico é necessário realizar um estudo relativamente à possibilidade de se utilizar uma caixa de velocidades variável, manual ou automática, que permita a alterar das relações de caixa sem por em risco a máquina eléctrica melhorando assim a performance do carro.

Sendo um dos objectivos a longo prazo realizar um troféu de veículos totalmente eléctrico ou até mesmo com os dois tipos de motorização eléctrica e a combustão, torna-se necessário garantir a máxima igualdade entre os dois tipos de veículo.

Desta forma torna-se necessário perceber se a máquina eléctrica utilizada na vertente prática desta dissertação permite obter um veículo com a mesma performance do de combustão. Podendo ser necessário implementar uma máquina eléctrica com potência superior.



# Referências

- [1] S. L. a. B. Brant, *Build your own ELECTRIC VEHICLE*, Second ed.
- [2] Y. G. Mehrdad Ehsani, Ali Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles* Second Edition ed.
- [3] S. A. M. Granadeiro, "Controlo de Motor Assíncrono Aplicado a Veículos Eléctricos," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [4] FIA. Available: <http://www.fiainstitute.com/news>
- [5] X. Ji and Y. Lv, "Field weakening control of PMSM used in an electric power steering system," in *Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 2194-2199.
- [6] HistóriaEV. Available: <http://inventors.about.com/library/weekly/aacarselectrica.htm>
- [7] H. EAAEV. Available: <http://www.eaaev.org/eaevsforsale.html>
- [8] C. Duryea. Available: [http://www.f1-info.cz/?gallery=f1foto/foto0000/1894\\_1899](http://www.f1-info.cz/?gallery=f1foto/foto0000/1894_1899)
- [9] G. B. T. Rodrigues, "Modelação e Simulação de um Formula Student Eléctrico," Instituto Superior Técnico, 2009.
- [10] D. B. Karner, "State of the art in electric race car power electronics," *Power Electronics in Transportation*, pp. 215-217 232, 1996.
- [11] DRAGRACE. Available: [http://www.wired.com/images\\_blogs/photos/uncategorized/2008/01/02/ce\\_123007\\_800.jpg](http://www.wired.com/images_blogs/photos/uncategorized/2008/01/02/ce_123007_800.jpg)
- [12] FormulaStudent. Available: <http://www.automotto.org/entry/university-racing-eindhoven-striping-all-electric-racer-does-100kmh/>
- [13] EVCUP. Available: <http://evcup.com/>
- [14] MontanhaYokohama. Available: [http://www.rockcrawler.com/2010/07/yokohama%E2%80%99s-electric-vehicle-wins-with-record-time-at-pikes-peak/2010-07\\_yokohama/#axzz1CL7oXSCF](http://www.rockcrawler.com/2010/07/yokohama%E2%80%99s-electric-vehicle-wins-with-record-time-at-pikes-peak/2010-07_yokohama/#axzz1CL7oXSCF)

- [15] C. C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 247-275, Feb 2002.
- [16] C. C. Chan, "The state of the art of electric vehicles," *Proceedings of the World Engineers' Convention 2004, Vol F-B, Power and Energy*, pp. 511-518 626, 2004.
- [17] C. C. Chan and Y. S. Wong, "The state of the art of electric vehicles technology," *IPEMC 2004: The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, Vols 1-3, Conference Proceedings*, pp. 46-57 1818, 2004.
- [18] C. C. Chan, "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, pp. 704-718, Apr 2007.
- [19] M. H. Westbrook, *The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars* vol. 38, 2001.
- [20] M. Zeraouila, *et al.*, "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study," in *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference*, 2005, p. 8 pp.
- [21] MotorInducao. Available: <http://paginas.fe.up.pt/~ee02060/MIT.html>
- [22] F. Zidani, *et al.*, "Fuzzy efficient-optimization controller for induction motor drives," *Power Engineering Review, IEEE*, vol. 20, pp. 43-44, 2000.
- [23] F. Zidani, *et al.*, "Fuzzy optimal Volts/Hertz control method for an induction motor," *IEMDC 2001: IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 377-381 1004, 2001.
- [24] MotorRelutanciaComutado. Available: <http://www.deetc.isel.ipl.pt/jetc05/CCTE02/papers/finais/fortes/22.pdf>
- [25] M. Zeraoulia, *et al.*, "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study," *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 280-287 837, 2005.
- [26] R. Krishnan, *Electric motor drives : modeling, analysis, and control*, 2001.
- [27] F. A. P. Lopes, "Estudo e Comparação de Diferentes Métodos de Controlo de Motores Síncronos com Ímanes Permanentes," FEUP, 2008.
- [28] J. G. W. West, "DC, induction, reluctance and PM motors for electric vehicles," in *Motors and Drives for Battery Powered Propulsion, IEE Colloquium on*, 1993, pp. 1/1-111.
- [29] J. Moreno, *et al.*, "Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, pp. 614-623, Apr 2006.
- [30] N. Reis, "O automóvel híbrido como elemento fornecedor-consumidor de electricidade," Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [31] A. Parviainen, "Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines and Performance Comparison Between Radial-Flux and Axial-Flux Machines," Lappeenranta University of Technology 2005.

- [32] PermMotor. Available: <http://www.perm-motor.de/>
- [33] M. B. U. R. Ms. R. Radhika, "Vector Control Drive of Permanentmagnet Synchronous Motor Using MALTAB/SIMULIN," Department of Electrical and Electronics Engineering, Krishna Murthy Institute of Technologies and Engineering, 2010/2011.
- [34] M. S. G. Dias, "Contribuição ao estudo do accionamento avançado do motor síncrono de ímanes permanentes: abordagem baseada nos modos deslizantes de ordem superior," Universidade Federal de Santa Maria, Brasil, 2009.
- [35] J. B. D. d. O. Junior, "Avaliação comparativa de observadores em modo deslizante para acionamentos de máquinas síncronas de ímanes permanentes," RIO DE JANEIRO, 2007.
- [36] TI, "TMS320F2803x ( Piccolo™) MCUs."
- [37] Michoship, "Sensorless Field Oriented Control of PMSM Motors."
- [38] TI. *Space Vector Generator With Quadrature Control.* Available: [http://read.pudn.com/downloads169/sourcecode/app/776802/svgen\\_dq.pdf](http://read.pudn.com/downloads169/sourcecode/app/776802/svgen_dq.pdf)



# Anexos

## Anexo A - Transformações de Coordenadas

Nas subsecções seguintes aborda-se a transformação de coordenadas de Clark e Park, baseado no exposto na referência [34].

### A.1 Transformações de Clark

A transformada de Clark ou  $\alpha\beta$  permite efectuar a conversão do sistema de coordenadas trifásicas num equivalente bifásico. Através da figura seguinte é possível efectuar esta transformação.

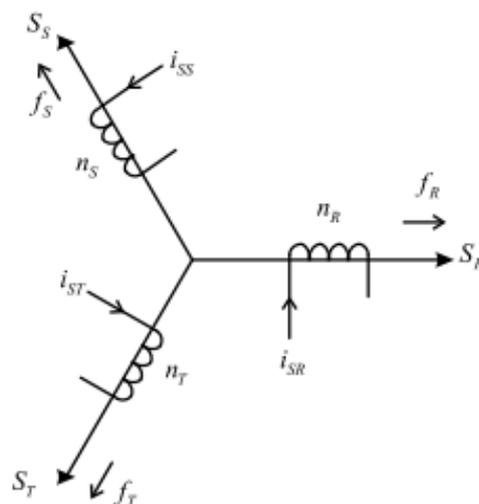


Figura I - Sistema Trifásico [34]

Como pode ser visto nas Figura e Figura, a transformação  $\alpha\beta$  reduz a máquina simétrica trifásica numa máquina bifásica, com as mesmas características de potência mecânica,

torque, velocidade e número de pólos. Na figura acima vemos uma representação das fases referentes ao estator  $f_R$ ,  $f_S$  e  $f_T$ , com os enrolamentos  $n_R$ ,  $n_S$  e  $n_T$ , respectivamente.

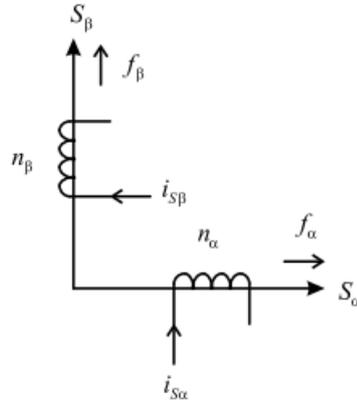


Figura II - Equivalente Bifásico [34]

Nestes enrolamentos circulam as correntes referentes ao estator de fase  $i_{SR}$ ,  $i_{SS}$  e  $i_{ST}$ . Com a transformação de Clark é possível decompor as variáveis do sistema original, num novo sistema composto basicamente por dois eixos, directo e de quadratura, isto é

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_R \\ f_S \\ f_T \end{bmatrix} \quad (9.1)$$

onde  $f_\alpha$  e  $f_\beta$  são as fases do sistema bifásico  $\alpha\beta$ .

Na sequência, as seguintes definições são usadas:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = n_2 \begin{bmatrix} i_{S\alpha} \\ i_{S\beta} \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

$$\begin{bmatrix} f_R \\ f_S \\ f_T \end{bmatrix} = n_3 \begin{bmatrix} i_{SR} \\ i_{SS} \\ i_{ST} \end{bmatrix} \quad (9.3)$$

onde  $n_2$  e  $n_3$  são ganhos que serão calculados a seguir.

Substituindo-se as equações 9.2 e 9.3 na equação 9.1, resulta em:

$$\begin{bmatrix} i_{S\alpha} \\ i_{S\beta} \end{bmatrix} = \frac{n_3}{n_2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{SR} \\ i_{SS} \\ i_{ST} \end{bmatrix} \quad (9.4)$$

Para tornar a matriz da equação 9.4 invertível, será acrescida a linha  $i_{S0}$ , que fisicamente não possui significado.

$$\begin{bmatrix} i_S \\ i_{S\alpha} \\ i_{S\beta} \end{bmatrix} = \frac{n_3}{n_2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \alpha & \alpha & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{SR} \\ i_{SS} \\ i_{ST} \end{bmatrix} \quad (9.5)$$

onde  $\alpha$  é uma constante a ser definida.

Pela equação 9.4 pode-se afirmar que a potência da máquina transformada, Pot<sub>T</sub>, é igual à potência total da máquina original (Pot), ou seja:

$$\text{Pot}_T = \text{Pot} \quad (9.6)$$

Considerando que as variáveis transformadas  $f_T$  relacionam-se com as variáveis originais  $f$  através de uma matriz de transformação na forma:

$$f_T = A^{-1}f \quad (9.7)$$

tem-se para o vector de tensões qualquer  $v$  e de correntes qualquer  $i$  a seguinte transformação:

$$v_T = A^{-1}v \rightarrow v = Av_T \quad (9.8)$$

onde  $v_T$  é o vector transformado de tensões em  $0\alpha\beta$ . Portanto:

$$i_T = A^{-1}i \rightarrow i = Ai_T \quad (9.9)$$

onde  $i_T$  é o vector transformado de correntes em  $0\alpha\beta$ . Portanto:

$$\text{Pot} = v^T i = v^T A^T A i_T \quad (9.10)$$

logo:

$$A^T A = I \rightarrow A^T = A^{-1} \quad (9.11)$$

onde:

$$A^{-1} \triangleq \frac{n_3}{n_2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \alpha & \alpha & \alpha \end{bmatrix} \quad (9.12)$$

e  $I$  é uma matriz identidade com dimensão 3x3.

Sabendo que a equação 9.11 é caracterizada como uma transformação ortogonal, pode-se daí calcular os termos da última linha da matriz de transformação  $A$ .

$$\left(\frac{n_3}{n_2}\right)^2 \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \alpha & \alpha & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \alpha \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \alpha \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9.13)$$

Assim:

$$3a^2 \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^2 = 1 \quad (9.14)$$

e

$$\left(1 + \frac{1}{2}\right) \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^2 = 1 \quad (9.15)$$

de onde se obtém:

$$\frac{n_3}{n_2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (9.16)$$

e

$$a = \sqrt{\frac{1}{2}} \quad (9.17)$$

Então, substituindo as equações 9.16 e 9.17 na equação 9.5 tem-se  $A^{-1}$ , que é denominada matriz de transformação  $0\alpha\beta$

$$A^{-1} \triangleq \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (9.18)$$

Definida a matriz  $A^{-1}$ , as correntes e tensões trifásicas podem ser convertidas para o equivalente bifásico, aplicando-se uma matriz de transformação ao sistema, sendo possível afirmar que:

$$[i_s]_{0\alpha\beta} = A^{-1}[i_s] \quad (9.19)$$

ou

$$[i_s] = A[i_s]_{0\alpha\beta} \quad (9.20)$$

onde

$$[i_s]_{0\alpha\beta} = [i_{s0} \ i_{s\alpha} \ i_{s\beta}]^T \quad (9.21)$$

$$[i_s] = [i_{sR} \ i_{sS} \ i_{sT}]^T \quad (9.22)$$

Desse modo, qualquer sistema trifásico equilibrado pode ser convertido para o equivalente bifásico aplicando-se a matriz de transformação ao sistema.

### A.2 Transformada de Park

A transformação de Park é de grande importância no estudo de máquinas eléctricas. Com ela é possível simplificar as equações das máquinas, introduzindo um conjunto de variáveis hipotéticas. O par de enrolamentos girantes resultantes da transformação  $0\alpha\beta$  é convertido noutro par de enrolamentos, em fase e estacionários em relação aos outros dois, como pode se verificar na Figura. Estes enrolamentos são também chamados pseudogirantes. Da mesma forma que a transformação  $0\alpha\beta$ , a transformação de Park pode ser obtida simplesmente multiplicando-se as variáveis  $0$  por uma matriz de transformação, para quaisquer variáveis do sistema. O resultado é a obtenção de novas variáveis  $d$  e  $q$ , estacionárias e em fase com os outros enrolamentos, no lugar das variáveis  $0\alpha\beta$  e girantes no tempo.

Considere os eixos  $dq$  alinhados ao eixo do estator. Esse referencial é conhecido como referencial do estator. Assim as correntes no rotor, em  $\alpha\beta$  podem ser representadas em  $dq$  na forma mostrada de seguida.

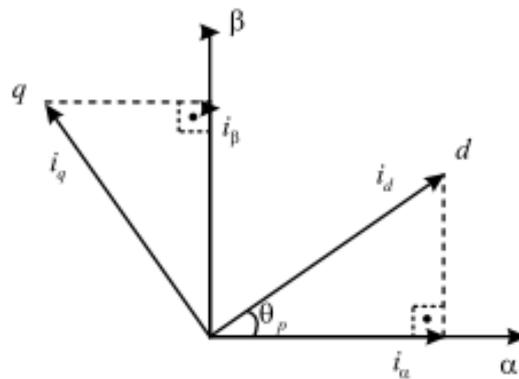


Figura III - Sistema de eixos da transformada de Park [34]

Pela Figura é possível concluir que:

$$\begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_p & \sin \theta_p \\ -\sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{R\alpha} \\ i_{R\beta} \end{bmatrix} \quad (9.23)$$

Onde é definido:

$$B^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_p & -\sin \theta_p \\ \sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \quad (9.24)$$

## x Futuros Desenvolvimentos

Desse modo, representando a equação 9.21 numa forma mais compacta, tem-se:

$$[i_R]_{dq} = B^{-1}[i_R]_{\alpha\beta} \quad (9.25)$$

Onde:

$$[i_R]_{\alpha\beta} = [i_{R\alpha} \quad i_{R\beta}]^T \quad (9.26)$$

e

$$[i_R]_{dq} = [i_{dr} \quad i_{qr}]^T \quad (9.27)$$

## Anexo B - Análise de mercado das máquinas eléctricas bem como do respectivo controlador

Estas análises de mercado foram realizadas apenas ao nível da Europa e dos Estados Unidos da América.

### B.1 Máquinas Eléctricas

A máquina eléctrica segundo os requisitos apresentados no capítulo 5, tem de ter aproximadamente 30kW de potência, 6000rpm de velocidade, baixo peso e permitir binários máximos próximos dos 80Nm. Assim sendo durante a análise referenciou-se as máquinas apresentadas na tabela seguinte.

Tabela I - Análise de Mercado - Máquinas Eléctricas

Fabricante	Perm Motor	Perm Motor	Siemens	Brusa	Brusa	Sew	Mesdea	Mesdea
Referência	PMS 156W	PMS 150W	1PV5133 - 4WS20 W11	ASM6.1 7.12	HSM1- 6.17.12 - C01	CMPZ80L	200-250	200-330
Tipo	Síncrono		Síncrono	Indução	Síncrono	Servo motor síncrono	Indução	
Potência (KW)	9,5 a 30	6,0 a 20	30 a 78.4	27 a 54	57 a 97		30	40
RPM	1500 a 6000	1500 a 6000	3500 a 9700	4000 a 11000	4200 a 11000	6000	2850 a 9000	2850 a 9000
Tensão DC (V)	320	96	380	320	360	400		
Binário (Nm)	80	80	85	65	130	27,5	100	130
Impulso de Binário (Nm)	95	95	175	192	200	107	ND	ND
Peso (Kg)	31	23,6	68	49	51	24,4	61	79,5
Refrigeração	Água	Água	Água	Ar	Água	Ar	Água	Água

<b>Controlador Ref.</b>	PMS9 50tI0 1	GEN4- G8035	ND	DMC5 24	DMC524	ND	ND	ND
<b>Preço (euros)</b>	2192	2050	ND	9300	22900	ND	3152	3958

Comparando os resultados obtidos, apenas o PMS-150W não cumpre os requisitos apresentados anteriormente. Na verdade as máquinas da Perm-Motor conseguem ter características que as distinguem das restantes, como é o caso do peso e do preço.

Na verdade uma questão que é também muito importante é a questão dos controladores, visto estes poderem condicionar os funcionamentos das máquinas alterando assim as suas especificações. Desta forma optou-se por realizar seguidamente a análise de mercado relativa aos controladores, de modo a perceber se permitem ou não tirar a máxima performance da máquina eléctrica.

## B.2 Controladores/Inversores

Esta análise consistiu em perguntar aos fabricantes das máquinas eléctricas qual seria o conversor que satisfazia as características da máquina, Tabela II.

A Perm-Motor respondeu que o único controlador que tinham para o PMS156W não permitia que este roda-se acima das 6000rpm, e informou que disponham de uma máquina PMS-150W e de um o controlador GEN4-G8035 permitia utilizar todas as características da máquina, o que nos levou a incluir estes sistemas na análise.

A BRUSA garantiu que o controlador DMC524 permitia utilizar a totalidade das máquinas por si fabricadas. Por outro lado, após várias tentativas encetadas de forma a saber mais informação sobre os produtos mencionados da MESDEA, não se obteve qualquer resposta por parte deste fabricante.

Tabela II - Análise de Mercado - Controlador

<b>Fabricante</b>	Perm Motor	SEVCON	BRUSA	MESDEA
<b>Referência</b>	PMS950tI01	GEN4- G8035	DMC524	TIM400W
<b>Potência nominal (KW)</b>	15kW	15kW	80	ND
<b>Potência pico (KW)</b>	30kW	21kW	106	ND

<b>Mínima Tensão DC (V)</b>	48	39.1	120	ND
<b>Máxima Tensão DC (V)</b>	124V	116	520	ND
<b>Tensão saída</b>	Trifásica	Trifásica	Trifásica	Trifásica
<b>Peso (Kg)</b>	6,1	23,6	9,5	6,8
<b>Refrigeração</b>	Ar	Ar	Água	Água
<b>Preço (euros)</b>	1700	1600	19200	ND

Desta forma foi possível concluir através destas análises de mercado que apenas as máquinas da BRUSA e o PMS150W tinham um controlador específico para a máquina, o que quer dizer que a escolha teria de recair sobre estas máquinas. Devido ao exagerado preço dos produtos da BRUSA, estes foram também excluídos restando apenas o conjunto PMS150W e o GEN4-G8035 sendo esta a escolha para a vertente prática deste projecto.



## Anexo C - Estudo sobre a caixa de velocidades

Escolhida a topologia para o sistema de tracção, esta tinha por base o bloqueio da caixa de velocidades numa única relação de caixa. Desta forma foi necessário comparar os sistemas de tracção a combustão e o eléctrico de forma a perceber qual seria a relação e caixa a adoptar de forma a ser possível realizar a maioria das provas do troféu Challenge Desafio Único.

Através dos resultados obtidos de uma viatura de troféu durante a época de 2010, concluiu-se que a velocidade média máxima atingida num circuito ronda os 110Km/h e em rampa os 95Km/h. Desta forma necessitamos de escolher uma relação de caixa que acoplada ao motor eléctrico permita ter binário elevados no arranque e velocidades máximas muito próximas dos valores referidos anteriormente.

Assim sendo retirando dos gráficos característicos os valores da potência e do binário em relação a velocidade de rotação, tanto do motor a combustão como do motor eléctrico donde se obtiveram os valores presentes nas colunas mais à esquerda das tabelas III e IV.

Utilizando os valores apresentados nessas colunas bem como das relações de caixa, foi possível obter os valores aplicados à roda. Desta forma é possível saber a velocidade de rotação e o binário na roda e a velocidade real do veículo.

Na verdade com a terceira relação de caixa consegue-se ter binários bastante elevados a baixas rotações atingindo também velocidades muito próximas das desejadas, cumprindo o requisito acima mencionado.

Tabela III - Performance do veículo com motor a combustão e com a terceira de relação de caixa

Motor de Combustão			Relação 3			
RPM	Potência (kW)	Binário (Nm)	RPM	Potência (kW)	Binário (Nm)	Velocidade (Km/H)
142,58	0,67	45	26,1	0,7	246,2	2,7
444,35	2,33	50	81,2	2,3	273,6	8,3
755,00	4,35	55	138,0	4,3	300,9	14,1
1047,90	6,58	60	191,5	6,6	328,3	19,6
1340,78	9,13	65	245,1	9,1	355,6	25,1
1641,71	12,07	70	300,1	12,1	384,0	30,7
1989,3	15,70	75	363,6	15,7	412,2	37,3
2243,32	18,08	77	410,0	18,1	421,0	42,0
2497,33	20,44	78	456,4	20,4	427,6	46,8
2898,4	23,85	79	529,7	23,8	429,9	54,3
3165,78	25,92	78	578,6	25,9	427,9	59,3
3433,16	27,70	77	627,5	27,7	421,5	64,3
3794,12	29,99	75	693,4	30,0	413,0	71,0
4034,76	30,90	73	737,4	30,9	400,1	75,6

4395,72	32,59	71	803,4	32,6	387,3	82,3
4649,73	33,33	68	849,8	33,3	374,5	87,1
4903,74	33,74	66	896,2	33,7	359,5	91,8
5278,07	33,71	61	964,7	33,7	333,7	98,8
5491,98	33,27	58	1003,8	33,3	316,5	102,8
5852,94	32,09	52	1069,7	32,1	286,5	109,6

Tabela IV- Performance do veículo com motor eléctrico e com a terceira de relação de caixa

PMS 150W			Relação 3			
RPM	Potência (KW)	Binário (Nm)	RPM	Potência (KW)	Binário (Nm)	Velocidade (Km/H)
142,58	3,58	239,72	26,1	3,6	1311,6	2,7
444,35	11,16	239,72	81,2	11,2	1311,6	8,3
755,00	18,95	239,72	138,0	19,0	1311,6	14,1
1047,90	26,31	239,72	191,5	26,3	1311,6	19,6
1340,78	33,76	240,46	245,1	33,8	1315,7	25,1
1633,67	41,14	240,46	298,6	41,1	1315,7	30,6
1944,76	46,41	227,88	355,4	46,4	1246,8	36,4
2238,64	46,83	199,77	409,2	46,8	1093,0	41,9
2550,05	47,42	177,57	466,1	47,4	971,6	47,8
2843,60	47,37	159,08	519,7	47,4	870,4	53,2
3145,88	47,53	144,28	575,0	47,5	789,4	58,9
3456,89	48,48	133,92	631,8	48,5	732,7	64,7
3750,18	48,24	122,82	685,4	48,2	672,0	70,2
4043,41	47,93	113,20	739,0	47,9	619,4	75,7
4345,45	48,15	105,80	794,2	48,1	578,9	81,4
4629,70	48,07	99,14	846,2	48,1	542,5	86,7
4949,43	48,32	93,23	904,6	48,3	510,1	92,7
5251,39	48,42	88,05	959,8	48,4	481,7	98,3
5544,46	48,12	82,87	1013,3	48,1	453,4	103,8
5846,37	48,47	79,17	1068,5	48,5	433,2	109,5

Através da comparação das tabelas pode-se verificar que a velocidade na roda apresentada aquando da utilização do motor eléctrico é rigorosamente igual à utilização do motor a combustão, Figura IV.

Na verdade como esperado o binário produzido pelo motor eléctrico é muito superior ao produzido pelo motor a combustão, Figura V, o que valida a utilização da terceira relação de caixa.

Isto não implica a utilização constante desta relação de caixa pois poderá interessar recorrer a outras relações de caixa, dependendo o percurso que se tenciona realizar.

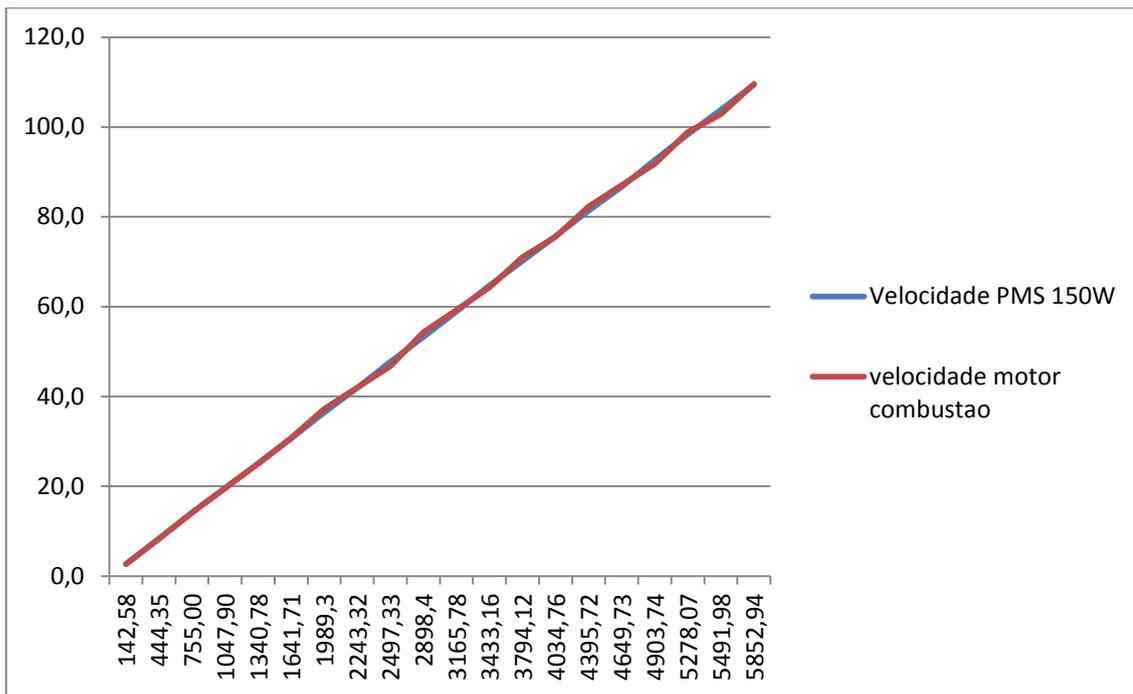


Figura IV - Gráfico comparativo das velocidades na roda, tanto com o motor a combustão como com o motor eléctrico

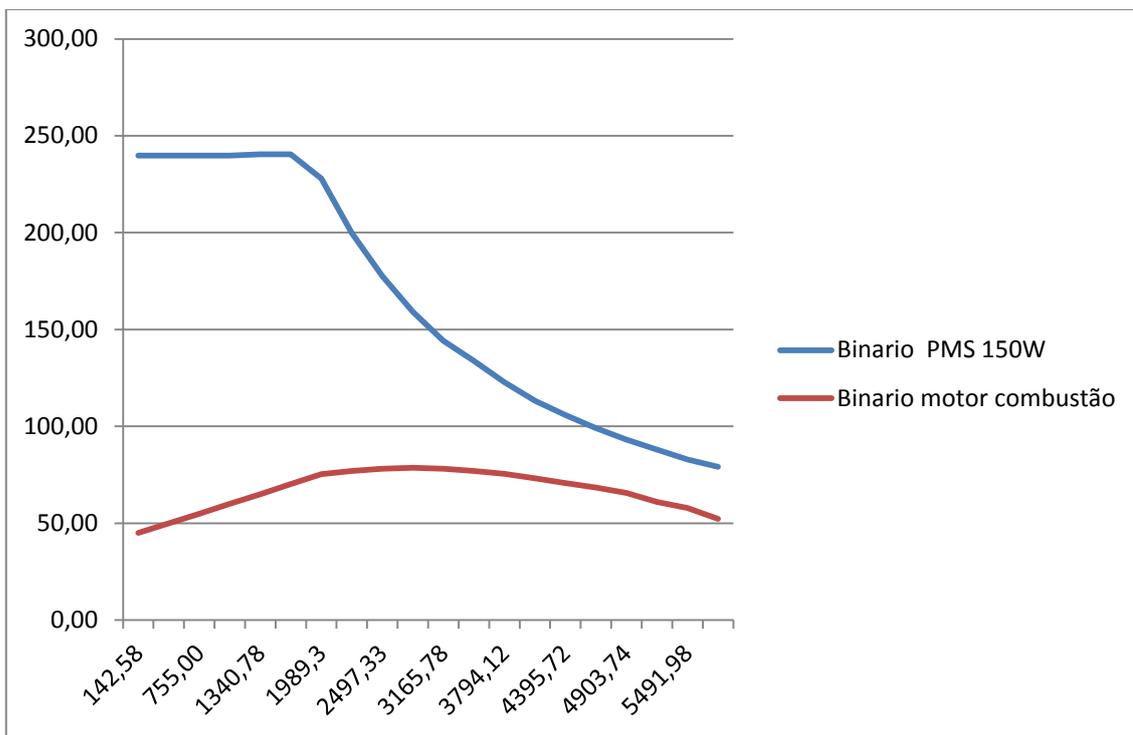


Figura V - Gráfico comparativo dos binários na roda, tanto com o motor a combustão como com o motor eléctrico



## Anexo D - Manual do controlador GEN4-80



## **Chapter 3: Installation**

# Mounting Gen4

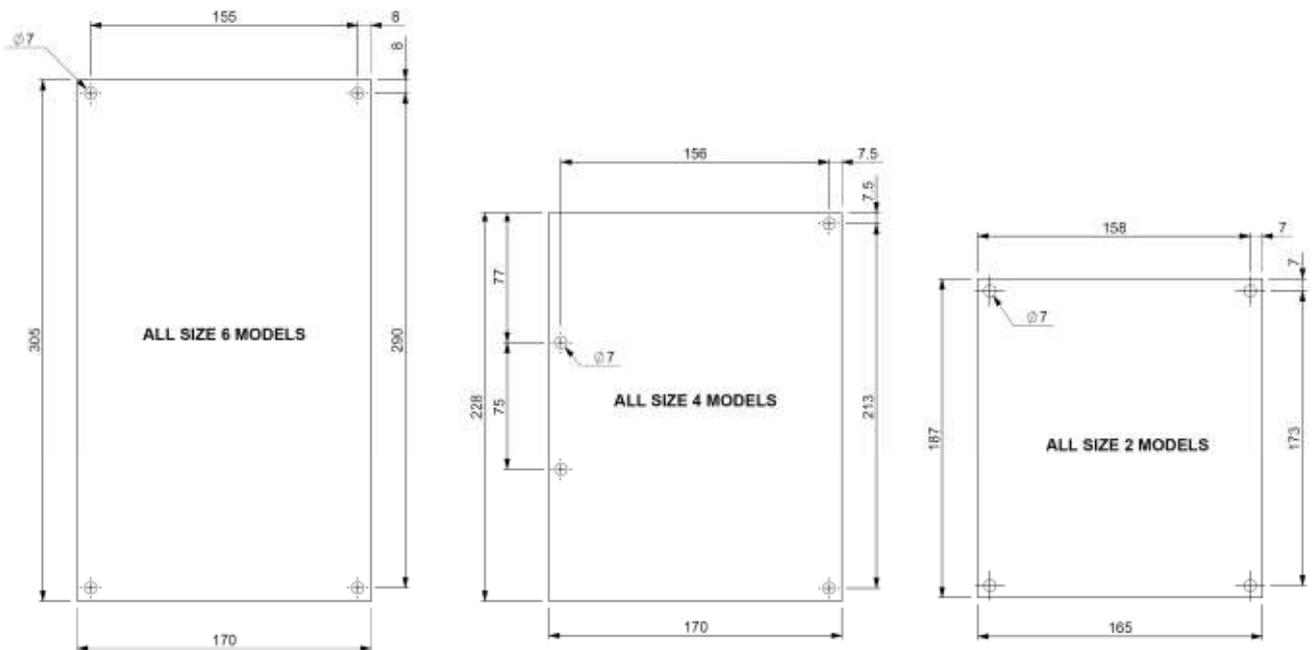
## ORIENTATION

The controller can be mounted in any orientation.

## CLEARANCE FOR LED ACCESS

If you want an operator of your vehicle to be able to view the onboard LED, it is advisable to consider the line of sight to the LED at this time.

## MOUNTING HOLE PATTERN



Flatness of mounting surfaces: 0.2mm



Failure to comply with this flatness specification can cause deformation of the frame and damage to the product.

## EQUIPMENT REQUIRED:

- 4 x M6 socket cap head bolts, nuts and spring washers. Bolts need to be long enough to pass through 12 or 20 mm of Gen4 baseplate (depending on controller type) and your mounting surface thickness.
- T hand-socket wrench or Allen key
- Thermal grease

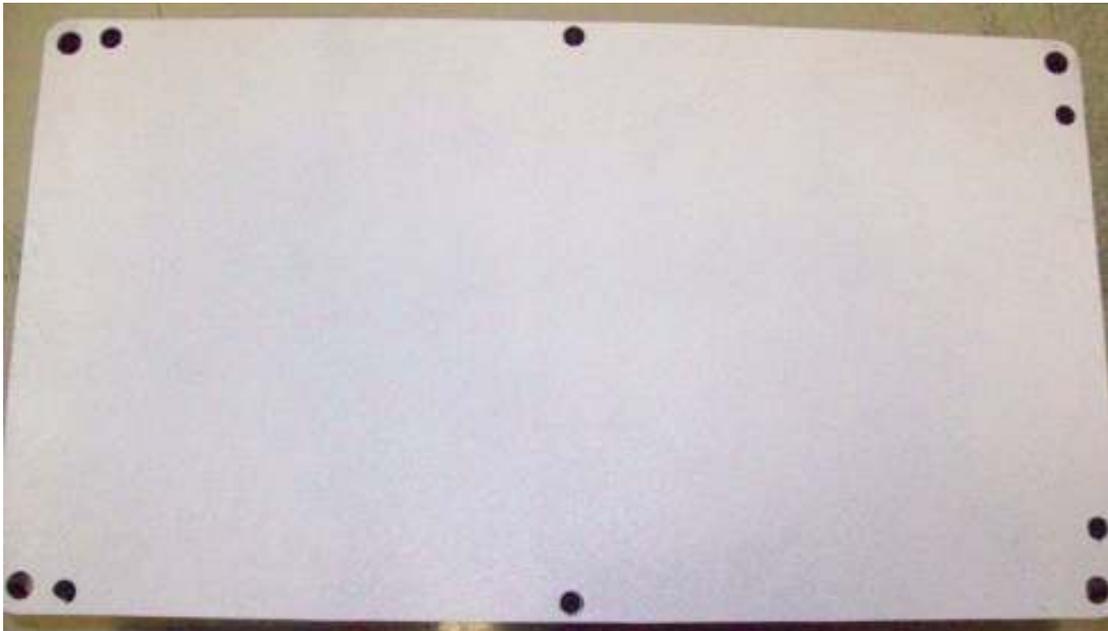
Recommended torque setting: 10 Nm  $\pm$  2 Nm

## THERMAL GREASE APPLICATION

Spread a layer of thermal grease (such as Dow Corning 340) as described below, before bolting to your mounting surface.

- Thermal compound should be applied with a small soft paint roller to ensure an even spread of thermal compound.
- The most appropriate thickness will look white but with a greyish colour still showing through from the controller base or vehicle mounting face material. *It should be noted that too little thermal compound will not fill all gaps left the flatness mismatch of the contact surfaces, but too much thermal compound may prevent the gap from closing up when tightening.*
- It is recommended that thermal compound is applied to both the Controller base and the vehicle/panel/boost plate surfaces.
- The controller should then be placed onto the vehicle/panel/heatsink.
- It is important that the two surfaces are then rubbed together in order to help transfer the thermal compound between the two surface.
- The entire assembly is then bolted together at all mounting holes.

An example of a good thermal compound spreading can be seen in the photo below:-



How effective the spreading technique is can be checked by removing the controller and inspecting the paste residue left on the mounting faces. On a well applied paste application, the controller will be difficult to remove and a rippled surface will be left on the paste surface as shown (magnified) below:-



## Cooling requirements

To ensure you get the maximum performance from your Gen4 controller:

- Keep it away from other heat generating devices on the vehicle
- Maintain its ambient operating temperature below the specified maximum (see 'Operating environment' on page 4-6)

To obtain maximum performance it is important to keep Gen4's base plate within the operating temperature range. To do this, mount Gen4 to a surface capable of conducting away the waste heat. Finned heatsinks are considerably better at doing this than flat plates. For example, a finned heatsink used at Sevcon has a footprint of 330mm x 200mm and thermal resistance of 0.3°C/W, whereas a plate approximately 420 mm x 270 mm x 9.5 mm will give approximately the same thermal performance (0.3°C/W). Ratings achievable with conductive heatsinking are shown in Figure 11 on page 4-3.

In Sevcon's experience the thermal resistance of the stand-alone Gen4 packages and achievable thermal resistances to ambient using conductive heatsinking are as shown in the table below. These are given as a guide: actual performance in an application must be verified.

Gen4 Size	Thermal resistance without additional heatsinking (°C/W)	Thermal resistance achievable with finned heatsink (°C/W)	Dimension of finned heatsink (W x L)
Size 2	0.7	0.5	250mm x 180mm
Size 4	0.6	0.3	330mm x 200mm
Size 6	0.5	0.2	330mm x 280mm

Cooling performance is affected by mounting surface flatness and the thermal transfer between mounting surface and Gen4. Ensure your application of thermal grease is effective and your mounting surface meets the flatness figures as described in the 'Mounting' section above.

## EMC guidelines

The following guidelines are intended to help vehicle manufacturers to meet the requirements of the EC directive 89/336/EEC for Electromagnetic Compatibility. Any high speed switch is capable of generating harmonics at frequencies that are many multiples of its basic operating frequency. It is the objective of a good installation to contain or absorb the resultant emissions. All wiring is capable of acting as a receiving or transmitting antenna. Arrange wiring to take maximum advantage of the structural metal work inherent in most vehicles. Link vehicle metalwork with conductive braids.

### POWER CABLES

Route all cable within the vehicle framework and keep as low in the structure as is practical - a cable run within a main chassis member is better screened from the environment than one routed through or adjacent to an overhead guard. Keep cables short to minimize emitting and receiving surfaces. Shielding by the structure may not always be sufficient - cables run through metal shrouds may be required to contain emissions.

Parallel runs of cables in common circuits can serve to cancel emissions - the battery positive and negative cables following similar paths is an example. Tie all cables into a fixed layout and do not deviate from the approved layout in production vehicles. A re-routed battery cable could negate any approvals obtained.

### SIGNAL CABLES

Keep all wiring harnesses short and route wiring close to vehicle metalwork. Keep all signal wires clear of power cables and consider the use of screened cable. Keep control wiring clear of power cables when it carries analogue information - for example, accelerator wiring. Tie all wiring securely and ensure it always follows the same layout.

### CONTROLLER

Thermal and EMC requirements tend to be in opposition. Additional insulation between the controller assembly and the vehicle frame work reduces capacitive coupling and hence emissions but tends to reduce thermal ratings. Establish a working balance by experiment. Document the complete installation, in detail, and faithfully reproduce on it all production vehicles. Before making changes, consider the effect on EMC compliance. A simple cost reduction change could have a significant negative effect on the EMC compliance of a vehicle.

# Safety and protective functions

## GENERAL



---

Electric vehicles can be dangerous. All testing, fault-finding and adjustment should be carried out by competent personnel. The drive wheels should be off the floor and free to rotate during the following procedures. The vehicle manufacturer's manual should be consulted before any operation is attempted.

---



---

The battery must be disconnected before replacing the controller. After the battery has been disconnected wait 30 seconds for the internal capacitors to discharge before handling the controller.

---



---

Never connect the controller to a battery with vent caps removed as an arc may occur due to the controller's internal capacitance when it is first connected.

---



---

As blow-out magnets are fitted to contactors (except 24V) ensure that no magnetic particles can accumulate in the contact gaps and cause malfunction. Ensure that contactors are wired with the correct polarity to their power terminals as indicated by the + sign on the top molding.

---



---

Do not attempt to open the controller as there are no serviceable components. Opening the controller will invalidate the warranty.

---



---

Use cables of the appropriate rating and fuse them according to the applicable national vehicle and electrical codes.

---



---

Where appropriate use of a suitable line contactor should be considered.

---



---

Electric vehicles are subject to national and international standards of construction and operation which must be observed. It is the responsibility of the vehicle manufacturer to identify the correct standards and ensure that their vehicle meets these standards. As a major electrical control component the role of the Gen4 motor controller should be carefully considered and relevant safety precautions taken. The Gen4 has several features which can be configured to help the system integrator to meet vehicle safety standards. Sevcon accepts no responsibility for incorrect application of their products.

---

# Installation

The following table gives guidance on the cable size needed for various currents in welding cable, not grouped with other cables, in 25°C ambient with 60°C temperature rise on the cable surface.

Gen4 average (rms) current	Cable sizes	
	metric	US (approx equivalent)
180 A	25 mm <sup>2</sup>	4 AWG
225 A	35 mm <sup>2</sup>	2 AWG
280 A	50 mm <sup>2</sup>	1 AWG
350 A	70 mm <sup>2</sup>	2/0 AWG

## On-board fuse mounting

You can mount your main input protection fuse directly onto the controller body as shown below. Select the appropriate fuse from the table below. Connect the battery positive cable to the B+ terminal. Connecting to the end marked '+' (or un-named in the case of size 2) will leave your installation without a fuse unless located elsewhere in the system. The B+ terminal is a dummy terminal to allow fuse connection only and has no internal connection.

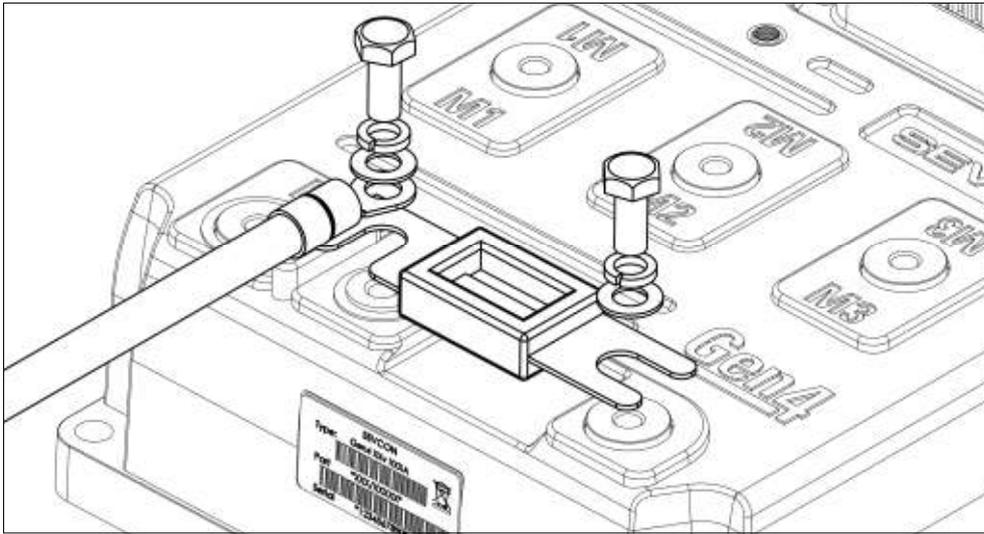


Figure 5 On-board fuse mounting – size 2 models

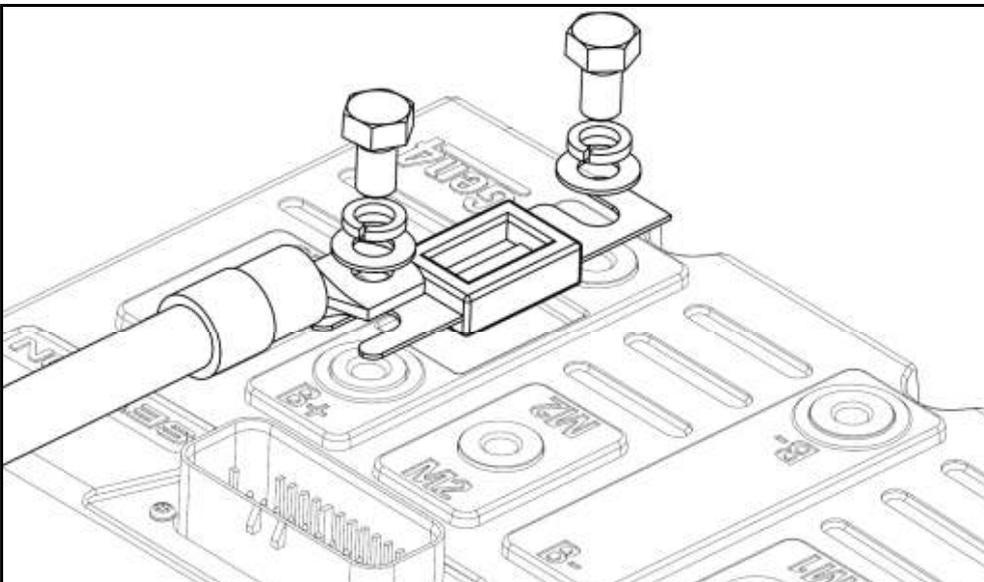


Figure 6 On-board fuse mounting – size 4 models

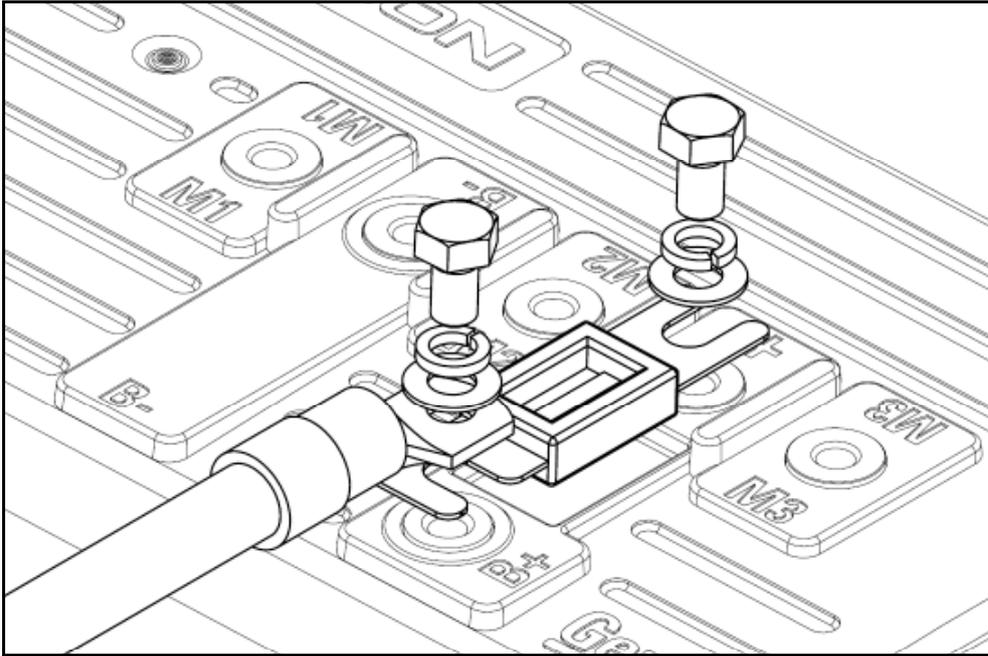


Figure 7 On-board fuse mounting – size 6 models

## FUSE RATING AND SELECTION

On-board fuse dimensions are in accordance with DIN43560/1

Gen4 input voltage	Gen4 peak output current	Fuse rating	Sevcon part number
24V/36 V	300 A	325 A	858/32044
	450 A	425 A	858/81990
	650 A	750 A	858/33021
36V/48 V	275 A	250 A	858/29043
	450 A	425 A	858/81990
	650 A	750 A	858/33021
72V/80 V	180 A	200 A	858/83339
	350 A	355 A	858/32045
	550 A	500 A	858/32043

## Signal wiring

Assemble your wiring harness using wire of the sizes recommended below and the Sevcon loose connector kit (P/N 661/27091). The use of twisted pair and in some cases twisted-screened cables is recommended for the speed sensor and CANbus wiring.

To make a connection, gently push the connector housing onto the appropriate mating half on the Gen4. Never force a connector. Connectors are keyed to prevent incorrect insertion.

Twisted, shielded wire is recommended. Keep signals away from power cables to avoid interference. See also 'EMC guidelines' on page 3-5.

### SIGNAL WIRE SIZES

Use wire between 0.5 mm<sup>2</sup> (20 AWG) and 1.5 mm<sup>2</sup> (16 AWG) for all signal wiring. Single twisted pair cable is readily available in 0.5 mm<sup>2</sup> (20 AWG).

### CANBUS TERMINATION

See also 'EMC guidelines' on page 3-5.

If your system has more than one CAN node, connect the nodes in a 'daisy chain' arrangement (Figure 8) and terminate the connections of the two end nodes with a 120 Ω resistor. If the end node is a Gen4, link pins 2 and 24 on the customer connector, a 120 Ω resistor is built into the controller. If you have a single node system the termination resistor should be connected so that the bus operates correctly when configuration tools are used.

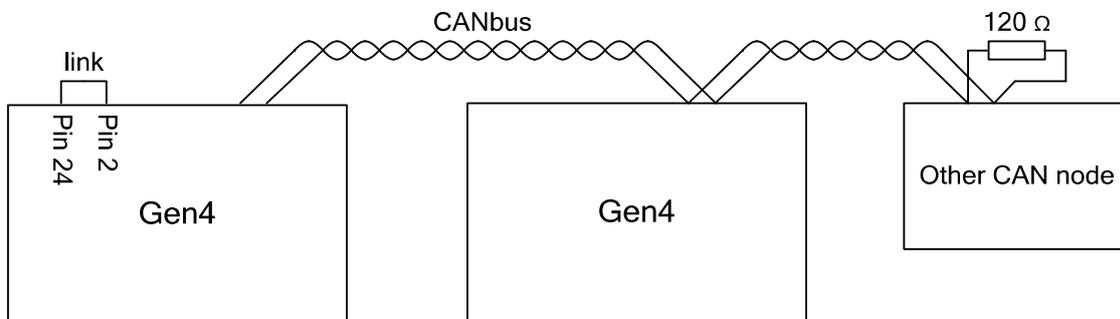


Figure 8 CAN node termination

## Signal connections

Signal connections are made to Gen4 via a 35 way AMPSeal connector.

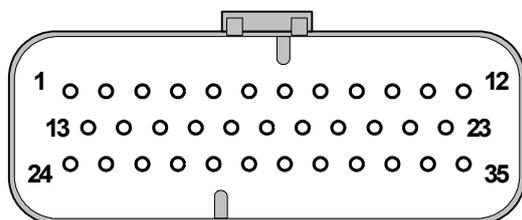


Figure 9 Customer Connector

Pins are protected against short-circuits to the battery positive or negative terminals.

Inserting contacts into connector housing pierces the sealing diaphragm to make the seal to the wire. To maintain IP rating, unused positions must be sealed with appropriate hardware (available from Tyco) if a contact is inserted and then subsequently removed.

Pin	Name	Type	What to connect	Maximum rating	Comment
1	Key switch in	Power	From 'dead' side of key switch via suitable fuse	7A (Total of all contactor output currents plus 1.0A)	This input supplies power from the battery for all the logic circuits. The unit cannot operate without "Key switch in" supply. Pins 1 and 6 (and 10 on Size 4 & 6 models) are connected together internally and can be used individually or in parallel.
2	CAN termination	Comms	To terminate a Gen4 CAN node link pin 2 to pin 24. This connects a 120Ω termination resistor, mounted inside the controller, across the CANbus.		Make the connection only if the Gen4 is physically at the end of the CANbus network (see 'CANbus termination' on page 3-10).
3	Contactor out 1	Out	To the switched low side of contactor or valve coil. Contactor out 1 usually drives the line contactor. (DO NOT USE WITH CAPACITIVE LOADS).	2.0A per output, subject to a limit of 6A for the total of all the outputs. V = Vb	This output provides low side voltage or current control to the load depending on configuration. The output goes low or is chopped to activate the load. It goes high (to Vb) to deactivate the load.
4	Output 1 Supply +	Power	To one end (high side) of a contactor to be controlled by Contactor out 1	2A	This output feeds power to the contactors. The output is at battery voltage.
5	Encoder "U"	Digital pulse	Position encoder	10V	Use in conjunction with "V" and "W" for PMAC motors.

Pin	Name	Type	What to connect	Maximum rating	Comment
6	Key-switch in	Power	From 'dead' side of key switch via suitable fuse	7A (Total of all contactor output currents plus 1.0A)	This input supplies power from the battery for all the logic circuits. The unit cannot operate without "Key switch in" supply. Pins 1 and 6 (and 10 on Size 4 & 6 models) are connected together internally and can be used individually or in parallel.
7	Contactor out 2	Out	To the switched low side of contactor or valve coil. (DO NOT USE WITH CAPACITIVE LOADS).	2.0A per output, subject to a limit of 6A for the total of all the outputs. $V = V_b$	This output provides low side voltage or current control to the load depending on configuration. The output goes low or is chopped to activate the load. It goes high (to $V_b$ ) to deactivate the load.
8	Output 2 Supply +	Power	To one end (high side) of a contactor to be controlled by Contactor out 2	2A	This output feeds power to the contactors. The output is at battery voltage.
9	Digital Input 6	Digital	From digital switch input 6.	Type B $V = V_b$ See Table 3	See note to Table 3
10	Size 2 models: 5V supply output	Power	5V supply output	$I = 100\text{mA}$ . $V = 5\text{V}$	This output can be used to power transducers or similar devices at 5V and up to 100mA.
	Size 4 & 6 models: Key switch input	Power	From 'dead' side of key switch via suitable fuse	7A (Total of all contactor output currents plus 1.0A)	This input supplies power from the battery for all the logic circuits. The unit cannot operate without "Key switch in" supply. Pins 1, 6 and 10 are connected together internally and can be used individually or in parallel.
11	Contactor out 3	Out	To the switched low side of contactor or valve coil. (DO NOT USE WITH CAPACITIVE LOADS).	2.0A per output, subject to a limit of 6A for the total of all the outputs. $V = V_b$	This output provides low side voltage or current control to the load depending on configuration. The output goes low or is chopped to activate the load. It goes high (to $V_b$ ) to deactivate the load.

# Installation

Pin	Name	Type	What to connect	Maximum rating	Comment
12	Output 3 Supply +	Power	To one end (high side) of a contactor to be controlled by Contactor out 3	2A	This output feeds power to the contactors. The output is at battery voltage.
13	CAN High	Comms	CANbus High signal	V = 5 V	Maximum bus speed 1 Mb/s/sec Alternative connection to pin 16
14	Encoder A Input	Digital pulse	From the speed encoder A channel	I = 25 mA (internally limited) V = 8 V (for current-source encoders) V = 2.5V or 5V (for open-collector encoders)	Check the speed encoder signals have the correct number of pulses per revolution. Check Gen4 is configured for the type of encoder you are using (open-collector or current-source)
15	Encoder power supply -	Power	To the negative supply input (0 V) of the speed encoder	I = 100 mA V = 0.5 V	We recommend the use of screened cable for the encoder wiring. Connect the screen to this pin only along with the negative supply.
16	CAN High	Comms	CANbus High signal	V = 5 V	Maximum bus speed 1 Mb/s/s. Alternative connection to pin 13
17	Encoder "V"	Digital pulse	Position encoder	10V	Use in conjunction with "U" and "W" for PMAC motors.
18	Digital Input 1	Digital	From digital switch input 1. In a basic configuration this is usually the forward switch.	Type A V = V <sub>b</sub> See Table 3	See note to Table 3
19	Digital Input 3	Digital	From digital switch input 3. In a basic configuration this is usually the foot switch (FS1).	Type A V = V <sub>b</sub> See Table 3	See note to Table 3
20	Digital Input 5	Digital	From digital switch input 5.	Type B V = V <sub>b</sub> See Table 3	See note to Table 3

Pin	Name	Type	What to connect	Maximum rating	Comment
21	Digital Input 8	Digital	From digital switch input 8.	Type B V = V <sub>b</sub> See Table 3	See note to Table 3. Alternative: Sin input from Sin-Cos analogue encoder, only if specified in h/w build
22	Pot. 1 wiper in	Analog	From potentiometer 1 wiper.	V = 9.5 V Z <sub>in</sub> = 82 kΩ (24V/36V and 36V/48V models) Z <sub>in</sub> = 100 kΩ (24V/36V and 36V/48V models)	Suitable for potentiometers in the range 500 Ω to 10 kΩ, or voltage-output device (e.g. Sevcon linear accelerator) 0 to 5 V or 0 to 10 V. Ensure that at least 0.5V margin exists between the maximum valid throttle and the wire-off threshold
23	Pot. 2 wiper in	Analog	From potentiometer 2 wiper.	V = 9.5 V Z <sub>in</sub> = 82 kΩ (24V/36V and 36V/48V models) Z <sub>in</sub> = 100 kΩ (24V/36V and 36V/48V models)	Suitable for potentiometers in the range 500 Ω to 10 kΩ, or voltage-output device (e.g. Sevcon linear accelerator) 0 to 5 V or 0 to 10 V. Ensure that at least 0.5V margin exists between the maximum valid throttle and the wire-off threshold
24	CAN Low	Comms	CANbus Low signal	V = 5 V	Maximum bus speed 1 Mbits/s. Alternative connection to pin 27
25	Encoder B Input	Digital pulse	From the speed encoder B channel	I = 25 mA (internally limited) V = 8 V (for current-source encoders) V = 2.5V or 5V (for open-collector encoders)	
26	Encoder power supply +	Power	To the positive supply input of the speed encoder	I = 100 mA V = 5V or 10V software selectable	Check the speed encoder you use is compatible with Gen4. See page 6-12 for configuration details.

# Installation

Pin	Name	Type	What to connect	Maximum rating	Comment
27	CAN Low	Comms	CANbus Low signal	V = 5 V	Maximum bus speed 1 Mbits/s. Alternative connection to pin 24
28	CAN power supply +	Power	To CAN device requiring external supply	V = 24 V I = 100 mA	Check that the CAN device power supply requirement is suitable for Gen4.
29	Encoder "W"	Digital pulse	Position encoder	10V	Use in conjunction with "U" and "V" for PMAC motors.
30	Digital Input 2	Digital	From digital switch input 2. In a basic configuration this is usually the reverse switch.	Type A V = V <sub>b</sub> See Table 3	See note to Table 3
31	Digital Input 4	Digital	From digital switch input 4. In a basic configuration this is usually the seat switch.	Type A V = V <sub>b</sub> See Table 3	See note to Table 3
32	Digital Input 7	Digital	From digital switch input 7.	Type B V = V <sub>b</sub> See Table 3	See note to Table 3
33	Motor thermistor in	Analog	From a thermistor device mounted inside the motor	V = 5 V (via 2.2 k $\Omega$ internal pull-up resistor)	A NTC thermistor having a resistance of approximately 2.2 k $\Omega$ at 100°C will give best sensitivity. Connect the other lead of the thermistor to the B- terminal of the Gen4 controller. Can also be used as an additional analog input
34	Pot. 1 power supply +	Power	Supply feed to potentiometer 1. In a basic configuration this is the throttle.	V = 10 V I = 15 mA	Suitable for potentiometers in the range 500 $\Omega$ to 10 k $\Omega$
35	Pot. 2 power supply +	Power	Supply feed to potentiometer 2.	V = 10 V I = 15 mA	Suitable for potentiometers in the range 500 $\Omega$ to 10 k $\Omega$ . Alternative: Cos input from Sin-Cos analogue encoder, only if specified in h/w build

Table 2 Connector A pin out and wiring information



## **Chapter 7: Monitoring Gen4**

## Reading status variables

All status variables are in Gen4's object dictionary. They can be accessed using SDOs. Some can be mapped to PDOs for continuous transmission to remote nodes such as displays and logging devices.

### MOTOR MEASUREMENTS

The following status objects can be read:

- Motor slip frequency, currents, voltages and temperature at object 4600<sub>h</sub>.
- Additional motor debug information is available at 4602<sub>h</sub>.
- Motor torque, speed, etc. at objects 6000<sub>h</sub> to 67FF<sub>h</sub>.

### HEATSINK TEMPERATURE

Read the heatsink temperature at object 5100<sub>h</sub>, sub-index 3.

### IDENTIFICATION AND VERSION

Read identification and version information at:

- 1008<sub>h</sub> – Controller name.
- 1009<sub>h</sub> – Hardware version.
- 100A<sub>h</sub> – Software version.
- 1018<sub>h</sub> – Identity object. Contains CANopen vendor ID, product code, CANopen protocol revision, and controller serial number.
- 5500<sub>h</sub> – NVM (EEPROM) format.
- 5501<sub>h</sub> – Internal ROM checksum.

### BATTERY MONITORING

The controller measures actual battery voltage at two points:

- Battery voltage; measured at keyswitch input and read at 5100<sub>h</sub> sub-index 1.
- Capacitor voltage; measured at the B+ terminal and read at 5100<sub>h</sub> sub-index 2.

The controller also has a battery discharge indicator (BDI), which can be read at 2790<sub>h</sub>.

## HOURS COUNTERS

The controller supports many different hours counters for various functions. Some counters run on all units and some only run on the Gen4 configured as the vehicle master.



---

*Hours counters are preserved with a minimum resolution of 15 seconds when the system is powered down.*

---

### LOCAL HOURS COUNTERS

Local hours counters which run on all units are:

- Controller key hours: increments while the keyswitch is in the ON position (5200<sub>h</sub>).
- Controller pulsing hours: increments when the controller is powering its connected motor (4601<sub>h</sub>).

### VEHICLE HOURS COUNTERS

Vehicle hours counters which run only on the Gen4 configured as the vehicle master are:

- Vehicle key hours: increments as controller key hours (2781<sub>h</sub>).
- Vehicle traction hours: increments when the vehicle is driving or braking (2782<sub>h</sub>).
- Vehicle pump hours: increments when the pump motor is running (2783<sub>h</sub>).
- Vehicle power steer hours: increments when the power steer motor is running (2784<sub>h</sub>).
- Vehicle work hours: increments when the traction, pump or power steer motors are running (2785<sub>h</sub>).

Since these hours are specific to the vehicle, they are writeable so that they can be reset to known good values if the master controller is replaced.

## Logging

The controller can log events in the system (along with additional event-related information) and minimum and maximum levels of important parameters. You need different levels of access to clear the contents of the logs.

Logs are normally reset individually. However, to reset all logs at once write to 4000<sub>h</sub>.

### FIFO EVENT LOGS

Events are recorded by these two separate FIFOs (first in, first out logs), which operate identically:

- System: this FIFO is 20 elements deep and is used for events such as software upgrades, user logins and some hardware upgrades (4100<sub>h</sub> to 4102<sub>h</sub>).
- Faults: this FIFO is 40 elements deep and is used for fault logging (4110<sub>h</sub> to 4112<sub>h</sub>).

At object 41X0<sub>h</sub>:

- Reset the FIFO
- Read its length

You can access the FIFO using objects 41X1<sub>h</sub> and 41X2<sub>h</sub>. The FIFO index is entered at 41X1<sub>h</sub> and the data is read from 41X2<sub>h</sub>.

## EVENT COUNTERS

The controller provides 10 event counters at 4200<sub>h</sub> to 420A<sub>h</sub>. Each event counter can record information about occurrences of one event. The allocation of event counters to events is user-configurable however Gen4 will automatically count important events in unused counters. The information recorded in each event counter is:

- The time of the first occurrence
- The time of the most recent occurrence
- The number of occurrences

## OPERATIONAL MONITORING

At objects 4300<sub>h</sub> and 4301<sub>h</sub>, Gen4 monitors and records the minimum and maximum values of these quantities:

- Battery voltage
- Capacitor voltage
- Motor current
- Motor speed
- Controller temperature

Two instances of the operational monitoring log are maintained. Service engineers can access and clear the first log; the second is accessible and clearable only by Sevcon engineers. The Customer copy is normally recorded and reset each time the vehicle is serviced. The Sevcon copy records data over the controller's entire working life.

## CANopen abort code

The controller will sometimes respond with a CANopen General Abort Error (08000000<sub>h</sub>) when the object dictionary is accessed. This can occur for many reasons. Object 5310<sub>h</sub> gives the exact abort reason. These are:

0	None	12	Invalid value	24	Cannot read from DSP
1	General	13	EEPROM write failed	25	Peek time out
2	Nothing to transmit	14	Unable to reset service time	26	Reserved for future use
3	Invalid service	15	Cannot reset log	27	Reserved for future use
4	Not in pre-operational	16	Cannot read log	28	Reserved for future use
5	Not in operational	17	Invalid store command	29	Reserved for future use
6	Cannot go to pre-operational	18	Bootloader failure	30	Reserved for future use
7	Cannot go to operational	19	DSP update failed	31	Reserved for future use
8	Access level too low	20	GIO module error failed	32	Checksum calculation failed
9	Login failed	21	Backdoor write failed	33	PDO not copied
10	Range underflow	22	Reserved for future use		
11	Range overflow	23	Cannot write to DSP		

## Faults and warnings

### INTRODUCTION

In the event of a fault Gen4 takes the following action:

1. Protects the operator and vehicle where possible (e.g. inhibits drive).
2. Sends out an EMCY message on the CANbus.
3. Flashes the LED in a pattern determined by the fault type and severity.
4. Logs the fault for later retrieval.

### FAULT IDENTIFICATION

You can identify a fault as follows:

- Check the number of LED flashes and use below to determine what action can be taken. A complete and comprehensive fault identification table will be available from Sevcon in due course.
- Pick up the EMCY on the CANbus and read the fault condition using configuration software
- Interrogate the fault on the node directly using DriveWizard or other configuration software.

### LED FLASHES

Use below to determine the type of fault from the number of LED flashes. The LED flashes a preset number of times in repetitive sequence (e.g. 3 flashes – off – 3 flashes – off – and so on). Only the faulty node in a multi-node system flashes its LED. Possible operator action is listed in the right hand column of the table.

LED flashes	Fault	Level	Set conditions	Operator action
0 (off)	Internal hardware failure	RTB	Hardware circuitry not operating.	
1	Configuration item out of range	VS	At least one configuration items is outside its allowable range.	Set configuration item to be in range. Use 5621 <sub>h</sub> to identify out of range object.
1	Corrupt configuration data	VS	Configuration data has been corrupted.	
1	Hardware incompatible with software or invalid calibration data	VS	Software version is incompatible with hardware. Calibration data for sensors invalid.	
2	Handbrake fault	I	Direction selected with handbrake switch active.	Release handbrake
2	Sequence fault	DI	Any drive switch active at power up.	Reset drive switches
2	SRO fault	DI	FS1 active for user configurable delay without a direction selected.	Deselect FS1 and select drive
2	FS1 recycle	DI	FS1 active after a direction change	Reset FS1

LED flashes	Fault	Level	Set conditions	Operator action
2	Seat fault	DI	Valid direction selected with operator not seated or operator is not seated for a user configurable time in drive.	Must be seated with switches inactive
2	Belly fault	DI	Set after belly function has activated.	
2	Inch sequence fault	DI	Inch switch active along with any drive switch active (excluding inch switches), seat switch indicating operator present or handbrake switch active.	
2	Invalid inch switches	DI	Inch forward and inch reverse switches active simultaneously.	Both inch switches inactive.
2	Two direction fault	DI	Both the forward and reverse switches have been active simultaneously for greater than 200 ms.	Reset switches
2	Invalid steer switch states	VS	Steering switches are in an invalid state, for example, both outer switches are active.	Check steer switches.
3	Fault in electronic power switching circuit	VS	Fault in electronic power switching circuit (e.g. MOSFET s/c).	
3	Hardware over voltage activated	VS	Hardware over voltage circuit activated	Investigate and reduce battery voltage below user defined maximum level. Ensure suitable over voltage is configured in 2C01 <sub>h</sub> and 4612 <sub>h</sub> .
3	Hardware over current trip activated	VS	Hardware over current circuit activated	Check motor load and wiring. Check motor parameters are correct.
4	Line contactor welded	S	Line contactor closed at power up or after coil is de-energized.	Check line contactor condition/wiring.
4	Line contactor did not close	S	Line contactor did not close when coil is energized.	Check line contactor condition/wiring.
5	PST fault	DI	Fault detected on PST power steer module.	Check PST condition.
5	Motor open circuit	S	Unable to establish current in motor.	Check motor condition/wiring.
6	Throttle pressed at power up	DI	Throttle demand is greater than 20% at power up.	Reduce demand
6	Analog input wire-off	VS	Analog input voltage is outside allowable range.	Check analog input wiring

## Monitoring

LED flashes	Fault	Level	Set conditions	Operator action
6	Analog output fault (over/under current, failsafe, short circuit driver)	VS	Analog output fault caused by over current (>4A), under current if actual current < 50% target (current mode only), failsafe circuit fault, short circuit driver MOSFET.	Check analog output wiring.
7	BDI warning or cutout	I	BDI remaining charge is less than warning or cutout levels.	Charge battery.
7	Battery low voltage protection	I	Battery voltage or capacitor voltage is below a user definable minimum battery level for a user definable time.	Increase battery voltage above user defined level
7	Controller low voltage protection	I	Battery voltage or capacitor voltage is below the minimum level allowed for the controller.	Increase battery voltage above minimum level
7	Controller high voltage protection with line contactor closed.	I	Battery voltage or capacitor voltage is above the maximum level allowed for the controller with line contactor closed.	Investigate and reduce battery voltage below maximum level.
7	Battery high voltage protection	I	Battery voltage or capacitor voltage is above a user definable maximum battery level for a user definable time.	Investigate and reduce battery voltage below user defined maximum level.
7	Motor low voltage protection	I	Capacitor voltage has entered the motor low voltage cutback region defined in 4612 <sub>h</sub> .	Increase battery voltage above start of motor low voltage cutback region.
7	Motor high voltage protection	I	Capacitor voltage has entered the motor high voltage cutback region defined in 4612 <sub>h</sub> .	Reduce battery voltage below start of motor high voltage cutback region.
7	Controller high voltage protection with line contactor open.	S	Battery voltage or capacitor voltage is above the maximum level allowed for the controller with line contactor open.	Isolate controller and investigate high battery voltage
7	Battery voltage below critical level for controller.	S	Battery voltage is below the absolute minimum voltage at which the controller hardware is guaranteed to operate.	Increase battery voltage.
7	Precharge failure	VS	Capacitor voltage is less than 5V after pre-charge operation is complete.	Check controller wiring to ensure there are no short circuits between B+ and B-.

LED flashes	Fault	Level	Set conditions	Operator action
8	Controller too hot	I	Controller has reduced power to motor(s) below maximum specified by user settings due to controller over temperature.	Remove loading to allow controller to cool down.
8	Controller too cold	I	Controller has reduced power to motor(s) below maximum specified by user settings due to controller under temperature.	Allow controller to warm up to normal operating temperature.
8	Motor over temperature	I	Controller has reduced power to motor(s) below maximum specified by user settings due to motor over temperature.	Reduce load to motor to allow it to cool down.
8	Motor too cold	I	Motor thermistor reports less than -30°C.	Allow motor to warm up. Check motor thermistor.
8	Heatsink over temperature	VS	Heatsink temperature measurement has exceed absolute maximum for controller and system has powered down.	Remove loading to allow controller to cool down.
10	Pre-Operational	I	Controller is in pre-operational state.	Use DriveWizard to put controller into operational state.
10	I/O initializing	I	Controller has not received all configured RPDOs within 5s of power up.	Check CANbus wiring and PDO configuration.
10	RPDO Timeout	I / DI / S	One or more RPDOs have not been received within 3s at power up or within 500ms during operation.	Check CANbus wiring and PDO configuration.
11	Encoder fault	VS	Speed measurement input wire-off is detected.	Check encoder wiring
11	Over current	VS	Software has detected an over current condition	Check motor load and wiring. Check motor parameters are correct.
11	Current Control fault	VS	Software is unable to control currents on PMAC motor.	Check motor load and wiring. Check motor parameters are correct.
12	Communication error	S	Unrecoverable network communication error has been detected.	Check CANbus wiring and CANopen configuration.
13	Internal software fault	RTB	Software run time error captured	
13	Current sensor auto-zero fault	RTB	Current sensor voltage out of range with no current.	

LED flashes	Fault	Level	Set conditions	Operator action
13	DSP parameter error	RTB	Motor parameter written to while motor control is operational.	Recycle keyswitch to allow parameters to be reloaded correctly.
14	3 <sup>rd</sup> Party Anonymous Node EMCY received	I / DS / RTB	3 <sup>rd</sup> party node has transmitted an EMCY message.	Check CANbus wiring and 3 <sup>rd</sup> party node status.
15	Vehicle service required	I	Vehicle service interval has expired.	Service vehicle and reset service hours.

Table 8 Fault identification

## FAULT LIST

Use DriveWizard to access the Fault list. If you don't have DriveWizard you can use any configuration tool as follows:

1. Object 5300<sub>h</sub> gives information about all active faults. Read sub-index 1 to get the number of active faults. Write to sub-index 2 to select one of the active faults (0 = highest priority) and read back sub-index 3 to read the fault ID at that index.
3. Object 5610<sub>h</sub> can be used to read a text description of the fault. Write the fault ID to sub-index 1 and read back the fault description from sub-index 2.

## Upgrading the controller software

It is possible to field update the firmware of the Gen4 controller , typically using Sevcon's DriveWizard configuration tool.

Please contact Sevcon for assistance with this process.



## Anexo E - Distribuição dos vários sistemas no veículo

Através do estudo realizado recorrendo a balanças colocadas nas quatro rodas, foi possível distribuir os vários sistemas, até se obter um *cross* muito próximo dos 50%. Assim sendo chegou-se à seguinte distribuição, Figura VI.

