

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**FEUP**

**Sistema de tracção de um VEC  
(Veículo Eléctrico de Competição)**

**Tiago Manuel Silva Ramos**

**DISSERTAÇÃO (ESTADO DE ARTE)**

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

**Orientador: Prof. Dr. Armando Luís Sousa Araújo**

**Porto, 15 Fevereiro de 2010**

© Tiago Manuel Silva Ramos, 2011

## Resumo

*Página em branco*

# Abstract

*Página em branco*

# Agradecimentos

*Página em branco*

# Índice

Resumo .....	iii
Abstract.....	iv
Agradecimentos .....	vi
Índice .....	viii
Lista de figuras .....	x
Lista de tabelas .....	xii
Abreviaturas e Símbolos .....	xiii
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
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
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>8</b>
Estado de Arte.....	8
2.1 O Veículo Automóvel Eléctrico - Perspectiva Histórica .....	8
2.2 Veículos Eléctricos a Baterias (BEV).....	13
2.2.1 Constituição.....	13
2.2.2 Topologias.....	15
2.3 Sistema de Propulsão de Veículos Eléctricos .....	16
2.3.1 Motores Eléctricos .....	19
2.3.1.1 Motor de Corrente Contínua CC .....	19
2.3.1.2 Motor de Indução CA.....	21
2.3.1.3 Motor de Síncronos de Ímanes Permanentes .....	23
2.3.1.4 Motor de Relutância Comutado.....	25
2.3.2 Conversores de Potência.....	26
2.3.3 Controladores Electrónicos.....	29
2.3.4 Comparação dos Sistemas de Propulsão .....	37
2.4 Sistemas de Armazenamento de Energia .....	39
2.4.1 Baterias .....	40
2.4.2 Supercondensadores .....	42
2.4.3 Pilhas de Combustível (Full-Cell).....	42

<b>Referências .....</b>	<b>43</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>45</b>

## 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[3] .....	8
Figura 2.2 - VE que em 1899, estabeleceu o recorde de velocidade [4].....	9
Figura 2.3 - Veículo de Competição Eléctrico de DRAG RACE (Arranques) [7].....	12
Figura 2.4 - Veículo de Competição Eléctrico da Formula Student [8].....	12
Figura 2.5 - Veículo de Competição Eléctrico da EVCUP- 3 categorias [9] .....	12
Figura 2.6 - Veículo de Competição Eléctrico preparado para Provas de Montanha [10].....	13
Figura 2.7 - Topologia básica do BEV [5] .....	13
Figura 2.8 - Esquema de constituição de um BEV [5] .....	14
Figura 2.9 - Topologias de BEV [5].....	15
Figura 2.10 - Diagrama de bloco de um sistema eléctrico de propulsão [5] .....	17
Figura 2.11 - Os dois grupos de tipos de motor a considerar para veículos eléctricos [5].....	17
Figura 2.12 - Constituição do motor de corrente contínua[15].....	20
Figura 2.13 - Curvas características do motor DC [16].....	21
Figura 2.14 - Diagrama vectorial do motor de indução [17] .....	21
Figura 2.15 - Características do Motor de Indução [16].....	22
Figura 2.16 - Característica binário-velocidade do motor PMSM [16] .....	24
Figura 2.17 - Característica binário-velocidade do motor síncrono de ímanes permanentes com controlo do ângulo de condução [16].....	24

Figura 2.18 - Motor de relutância comutado, com 8 pólos no estator e 6 pólos no rotor [20].....	25
Figura 2.19 - Característica binário-velocidade do motor de relutância comutado [21] .....	26
Figura 2.20 - Conversor de potência em Ponte completa .....	27
Figura 2.21 - Característica Binário-Velocidade do conversor de potência em ponte completa .....	27
Figura 2.22 - Conversor de potência em ponte trifásica - inversor .....	28
Figura 2.23 - Comando dos Transístor do inversor trifásico em ponte .....	28
Figura 2.24 - Diagrama de blocos do controlo directo por orientação de campo [22] .....	31
Figura 2.25 - Referencial do fluxo rotórico [22] .....	32
Figura 2.26 - Diagrama de blocos do controlo indirecto por orientação de campo [22] .....	32
Figura 2.27 - Diagrama fasorial com $\delta=90^\circ$ [24] .....	34
Figura 2.28 - Diagrama de blocos do controlo vectorial com encoder [24] .....	35
Figura 2.29 - Representação vectorial de um inversor de três braços[24] .....	36
Figura 2.30 - Diagrama de blocos do Controlo por orientação de campo com base em sensores de Hall .....	37
Figura 2.31 - Característica Binário-Velocidade comparativa dos vários tipos de motores .....	39
Figura 2.32 - Características dos distintos sistemas de armazenamento de energia .....	40
Figura 2.33 - Características de várias tecnologias de baterias [27] .....	41

## Lista de tabelas

Tabela 1.1 - Organização da Dissertação .....	7
Tabela 2.1 - Características de Veículos Eléctricos [5] .....	11
Tabela 2.2 - Características do conversor de potência em ponte completa .....	27
Tabela 2.3 - SSVs e tensões de fases [23] .....	36
Tabela 2.4 - Comparação dos sistemas de propulsão [25].....	38

# 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)
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





# 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 tende 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 carros convencionais ser oriunda dos carros 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 Introdução

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 influencia 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.

Sabendo que a equipa apenas contém três elementos de electrotécnica e um elemento de mecânica foi necessário dividir a equipa em sub-equipas, donde se destaca a sub-equipa de mecânica que é responsável pela preparação/projecto do veículo e a sub-equipa de electrotécnica (ou de conversão do veículo) que é responsável pelo sistema de tracção, sistema de alimentação e pelo sistema de sensorização e telemetria, Figura 1.1.

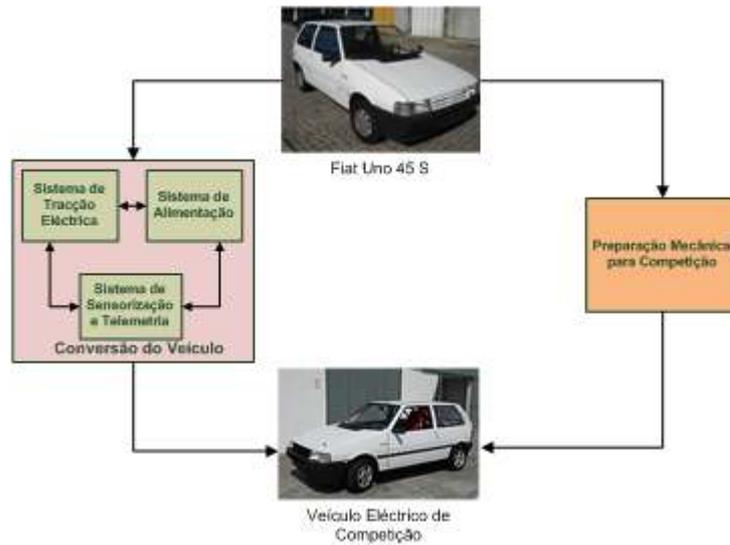


Figura 1.1- Diagrama do Projecto do Veículo Eléctrico de Competição

Na Figura 1.2 é possível verificar a distribuição da sub-equipa encarregue da conversão do veículo. A conversão do veículo será realizada por três elementos, um encarregue do sistema de tracção, outro do sistema de alimentação e gestão de energia e outro responsável pela sensorização e telemetria do veículo. Visto ser necessário posteriormente interligar todos os sistemas, é imprescindível garantir uma coordenação efectiva dentro desta sub-equipa.

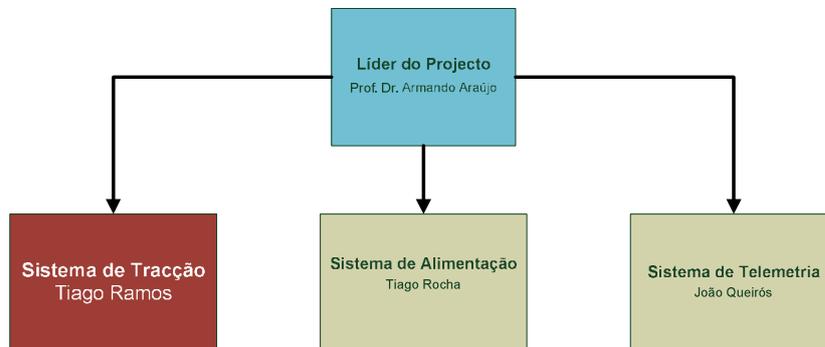


Figura 1.2 - Diagrama da Sub-Equipa - Conversão do Veículo

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

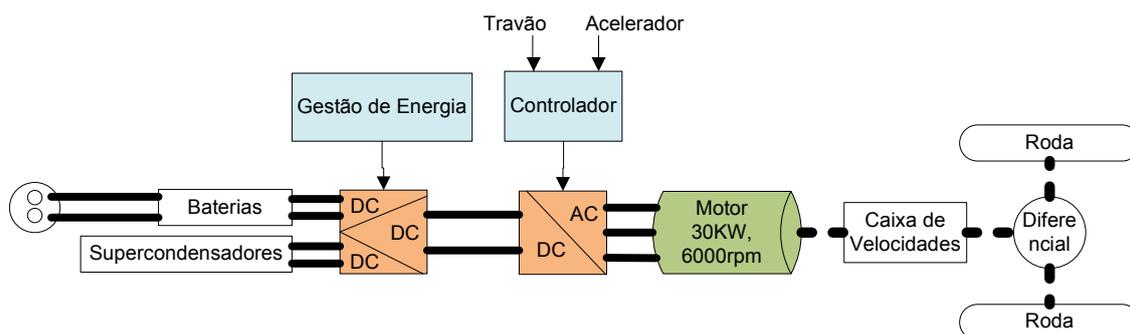


Figura 1.3 - Diagrama de blocos do Sistema de Conversão

## 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.

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.

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 dispendida no esforço de subida ou aceleração, aumentando ainda mais a sua eficiência global no uso da energia.

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.

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.

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 - Problemáticas Ambientais 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 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.

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.

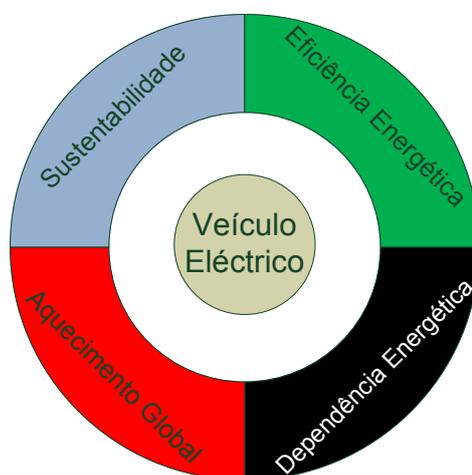


Figura 1.4 - Problemáticas Ambientais

### 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) tem sofrido grandes inovações, sendo reconhecido como um forte candidato para a propulsão de veículos eléctricos.

Neste âmbito juntamente com a filosofia da competição automóvel [Challenger 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 oito 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 envolvente teórica subjacente ao motor síncrono de ímanes permanentes e possíveis métodos de controlo

O veículo adoptado para o projecto será estudado e apresentado a nível mecânico e dinâmico no capítulo quatro.

O capítulo cinco evidencia o processo de simulação da totalidade dos sistemas eléctricos e mecânicos no sistema de tracção do veículo, bem como da dinâmica do mesmo, recorrendo aos softwares de simulação (Matlab-Simulink e PSIM).

No capítulo seis serão evidenciados todos os sistemas adoptados para o projecto bem como os testes realizados ao sistema de tracção do veículo.

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

Para se tornar mais fácil compreender a organização da dissertação foi concebida a seguinte tabela:

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	Estudo do desempenho do Fiat Uno 45 S Troféu
Capítulo 5	Simulação do Powertrain eléctrico
Capítulo 6	Testes dos vários componentes e do sistema de tracção
Capítulo 7	Conclusões gerais do trabalho
Capítulo 8	Bibliografia

Após a estruturação da dissertação bem como da tarefas a realizar achou-se por bem mencionar o estado actual do trabalho apresentando as fases do projecto já executadas, bem como as que faltam realizar (Diagrama de Gantt - Anexo A).

# 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 EV's 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 [1].

Este tipo de carros 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 [2]. 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[3]



Figura 2.2 - VE que em 1899, estabeleceu o recorde de velocidade [4]

A nível comercial a primeira aplicação de carros eléctricos deu-se em 1897, nos Estados Unidos, com a construção de uma frota de táxis para a cidade de Nova Iorque, por parte da Electric Carriage & Wagon Company de Filadélfia [2].

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 [1].

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 [1].

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 [1].

As primeiras crises do petróleo em 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 [2], 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 [5], 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 e os HEV, sendo possível compara-los na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Características de Veículos Eléctricos [5]

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 [6].

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](#).

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. [6]

Nos últimos anos, corridas deste tipo têm sido realizadas pelo mundo, donde se destacam as provas de Drag 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 no 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) [7]



Figura 2.4 - Veículo de Competição Eléctrico da Formula Student [8]



Figura 2.5 - Veículo de Competição Eléctrico da EVCUP- 3 categorias [9]



Figura 2.6 - Veículo de Competição Eléctrico preparado para Provas de Montanha [10]

## 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 baterias químicas, Figura 2.7.

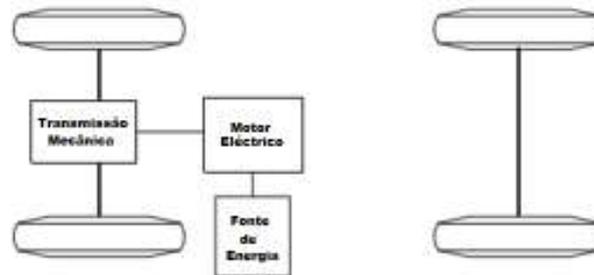


Figura 2.7 - Topologia básica do BEV [5]

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 [5].

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.

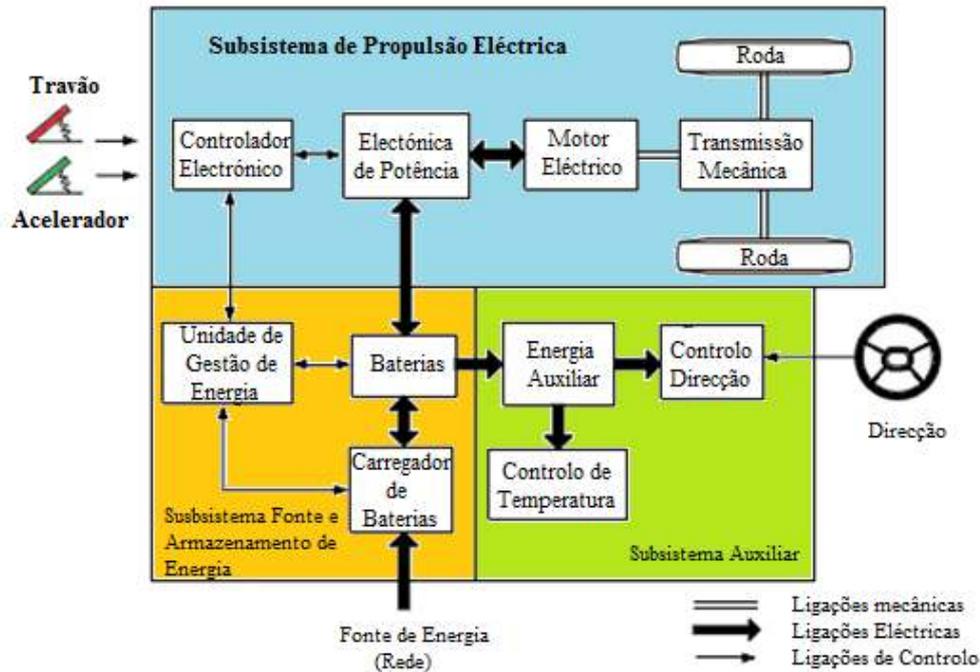


Figura 2.8 - Esquema de constituição de um BEV [5]

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 [5].

## 2.2.2 Topologias

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

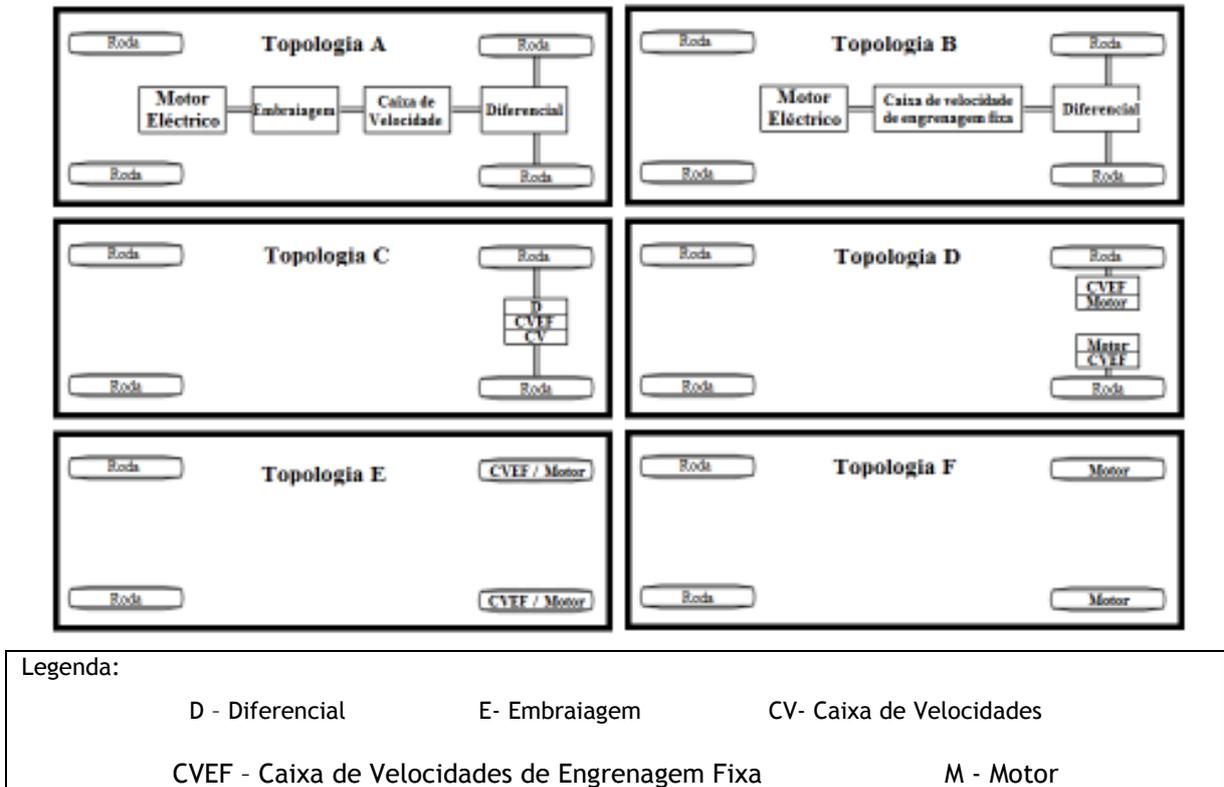


Figura 2.9 - Topologias de BEV [5]

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 consequentemente 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 descodificados 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.

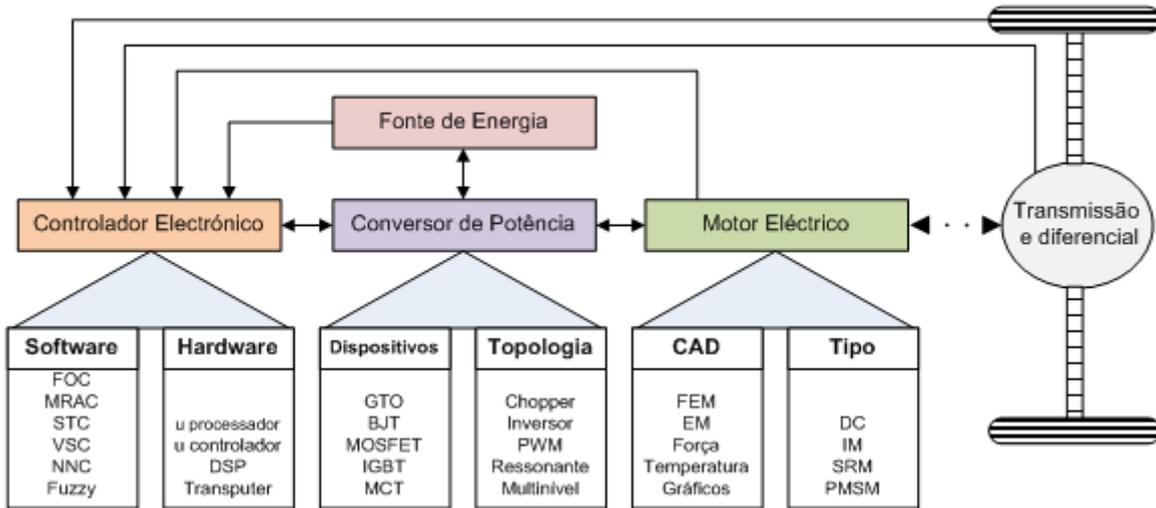


Figura 2.10 - Diagrama de bloco de um sistema eléctrico de propulsão [5]

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.

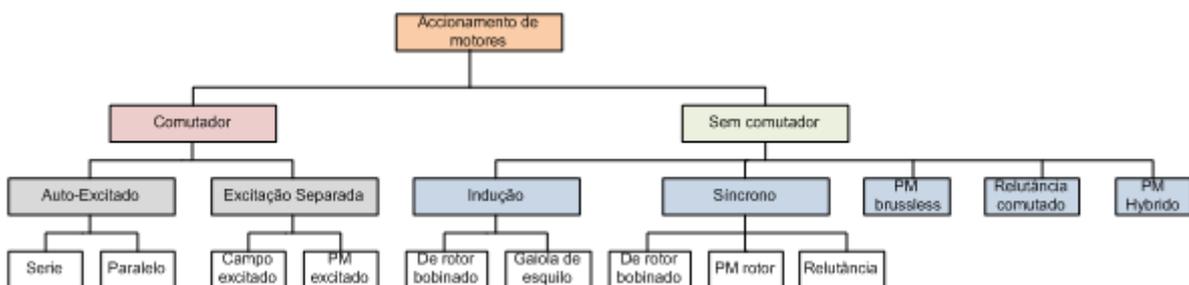


Figura 2.11 - Os dois grupos de tipos de motor a considerar para veículos eléctricos [5]

No grupo mais á 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 [5].

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 [11].

As recentes evoluções tecnológicas fizeram com que os motores sem colectores avançassem, sendo dotados de maior eficiência, densidades de potencia mais elevadas e custos de operação mais reduzidos que os motores CC tradicionais[12, 13].

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 [14].

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 [5].

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 [5].

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 propulsão 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.

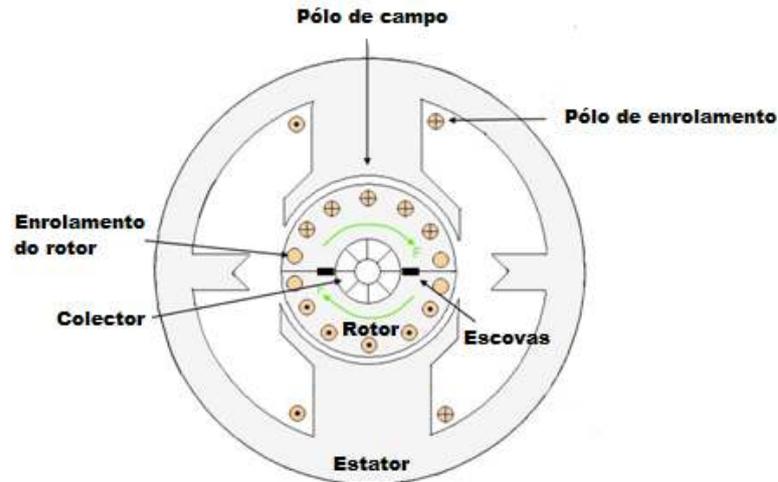
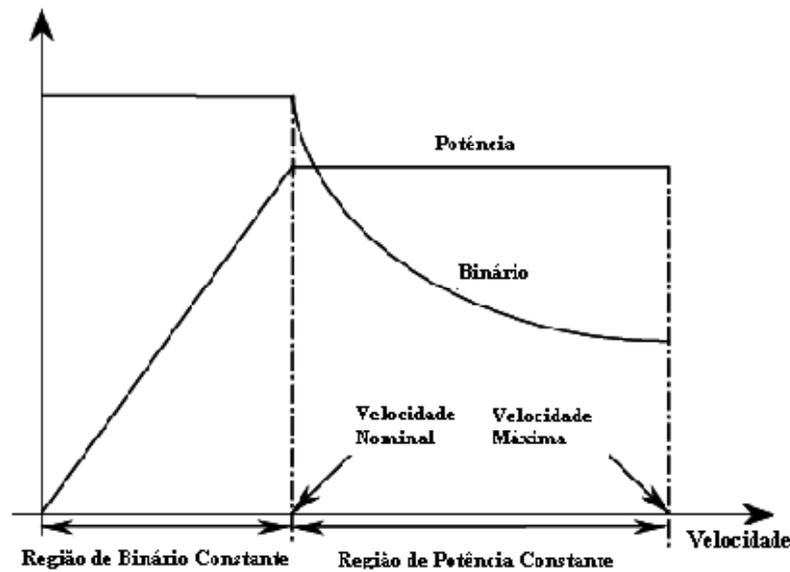


Figura 2.12 - Constituição do motor de corrente contínua[15]

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 [15].

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 [16].

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 [16].



### 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 [17].

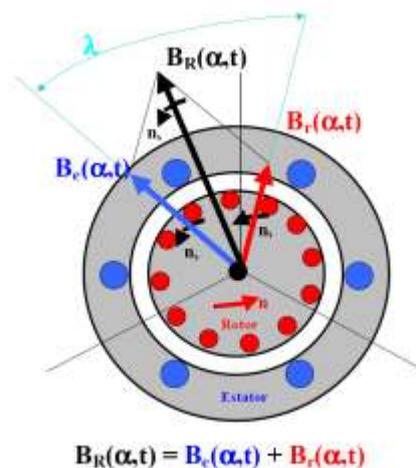


Figura 2.14 - Diagrama vectorial do motor de indução [17]

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” [15]

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 [15].

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 [15].

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 [15].

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

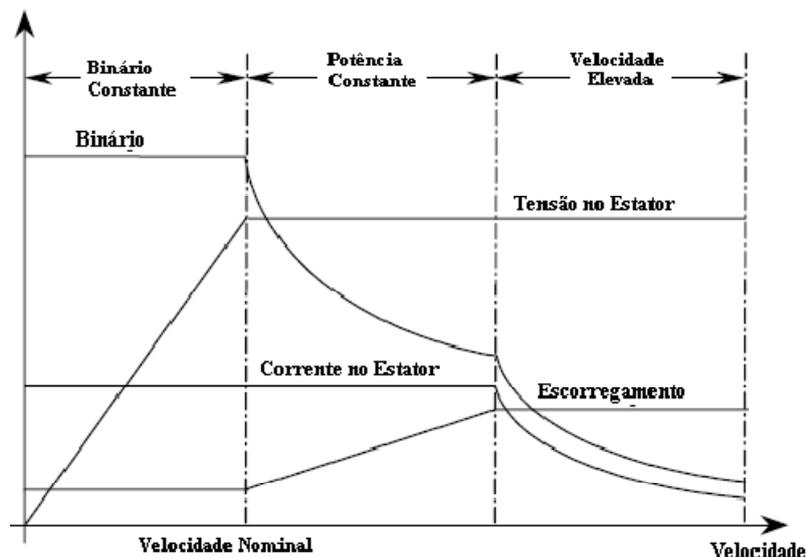


Figura 2.15 - Características do Motor de Indução [16]

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 [11].

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 [16].

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 [18, 19].

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 Disprósio 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 [11].

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 [11].

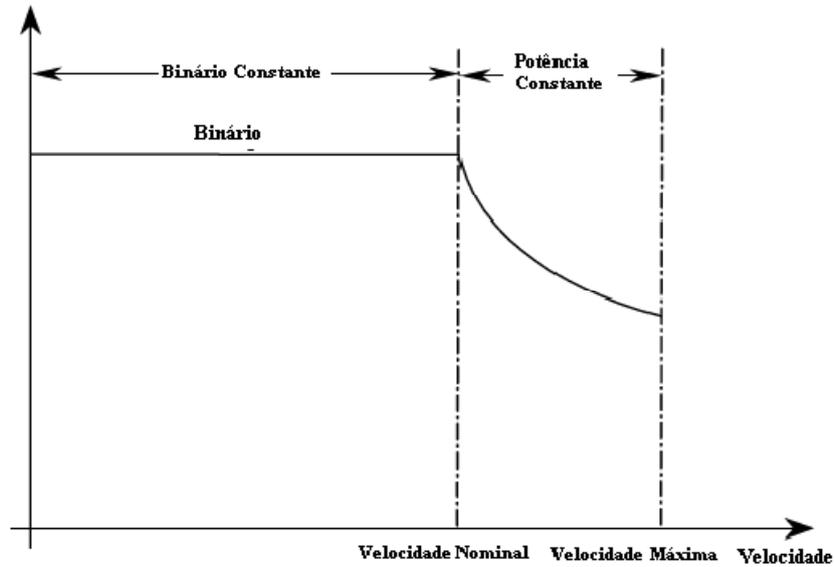


Figura 2.16 - Característica binário-velocidade do motor PMSM [16]

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 [16].

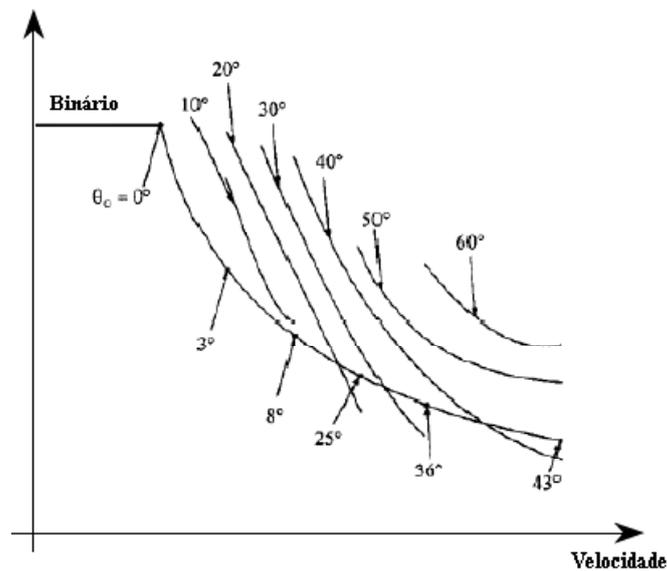


Figura 2.17 - Característica binário-velocidade do motor síncrono de ímãs permanentes com controlo do ângulo de condução [16]

Como desvantagens deste motor, tem-se o considerável custo da alta coercibilidade do material magnético permanente, e a possibilidade de desmagnetização deste [15].

O motor síncrono de ímãs 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 [15].

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

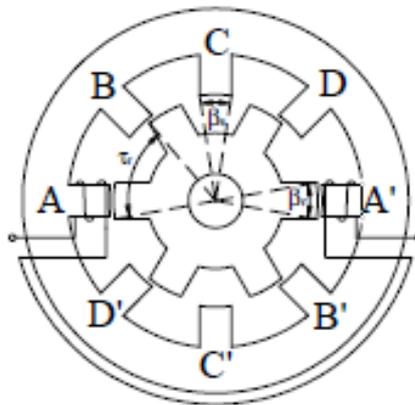


Figura 2.18 - Motor de relutância comutado, com 8 pólos no estator e 6 pólos no rotor [20]

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 [15].

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 [14].

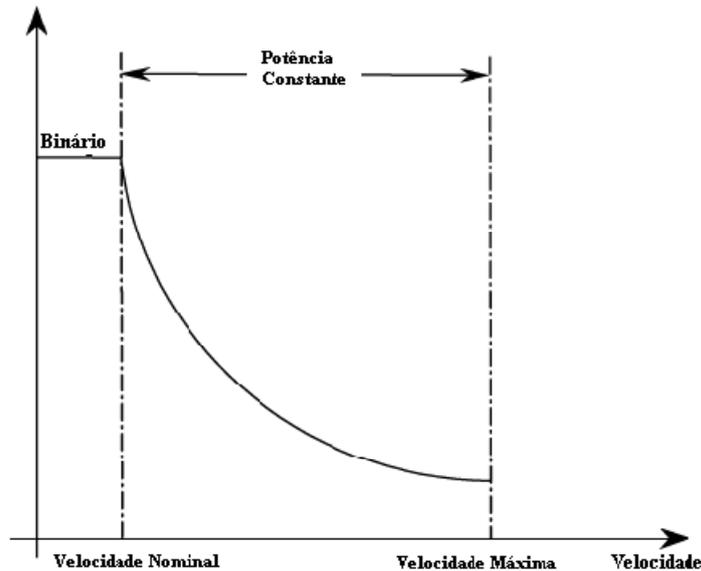


Figura 2.19 - Característica binário-velocidade do motor de relutância comutado [21]

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 [15].

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 [11].

### 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. 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).

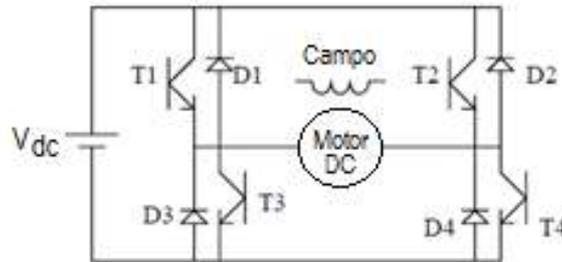


Figura 2.20 - Conversor de potência em Ponte completa

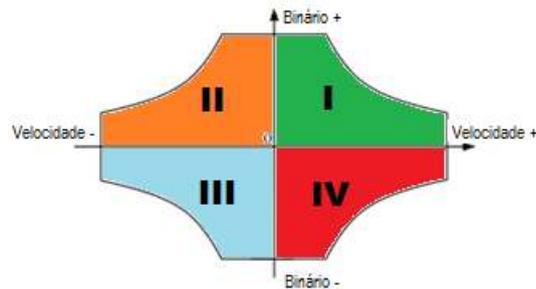


Figura 2.21 - Característica Binário-Velocidade do conversor de potência em ponte completa

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.

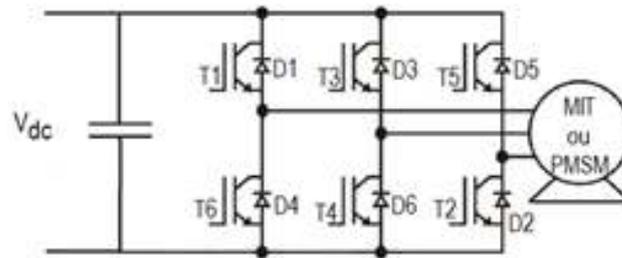


Figura 2.22 - Conversor de potência em ponte trifásica - inversor

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

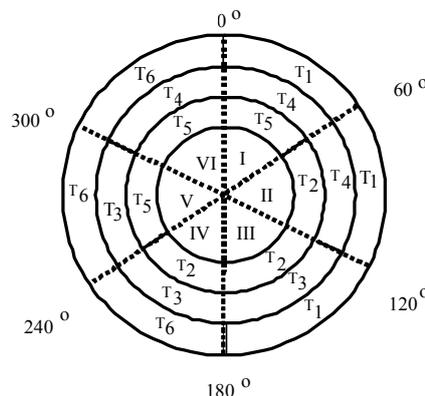


Figura 2.23 - Comando dos Transístor do inversor trifásico em ponte

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 Controladores Electrónicos

Os controladores electrónicos serão aprofundados 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 através das componentes electromagnéticas nele produzidas.

Sendo os motores de indução e os motores síncrono de ímanes permanentes os mais utilizados na tracção eléctrica apenas se fará referencia 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.

## 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 (1.1) e (1.2), respectivamente.

Admitindo o vector de fluxo ligado no rotor alinhado com o eixo directo no referencial dq, apenas tem interesse a equação (1.1).

$$\psi_{dr} = \frac{L_r}{L_m} \psi_{dm} - L_{ls} i_{ds} \quad (1.1)$$

$$\psi_{qr} = \frac{L_r}{L_m} \psi_{qm} - L_{ls} i_{qs} \quad (1.2)$$

Sendo difícil a medição directa de binário electromagnético, recorre-se à equação (1.3), 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 (1.4), resultante da equação (1.3).

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds}) \quad (1.3)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} i_{qs} \quad (1.4)$$

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

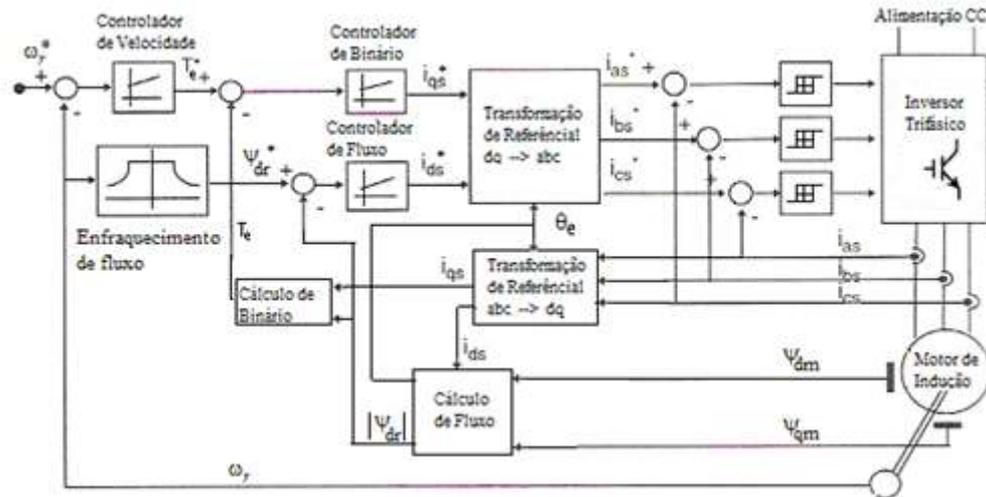


Figura 2.24 - Diagrama de blocos do controlo directo por orientação de campo [22]

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,  $i_{qs}^*$  e  $i_{ds}^*$ , e conseqüentemente 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 [23].

## 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.

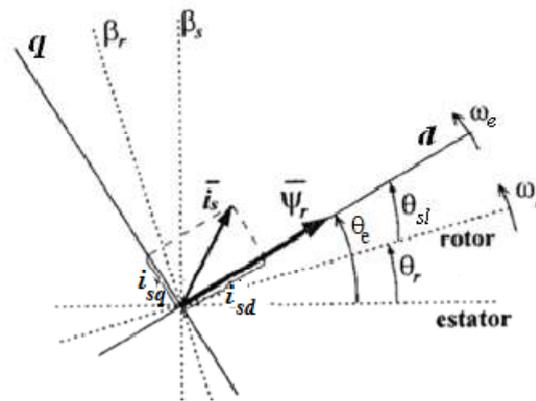


Figura 2.25 - Referencial do fluxo rotórico [22]

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 (1.5).

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt = \int \left( \omega_r + \frac{R_r L_m i_{qs}}{L_r \psi_{dr}} \right) dt \quad (1.5)$$

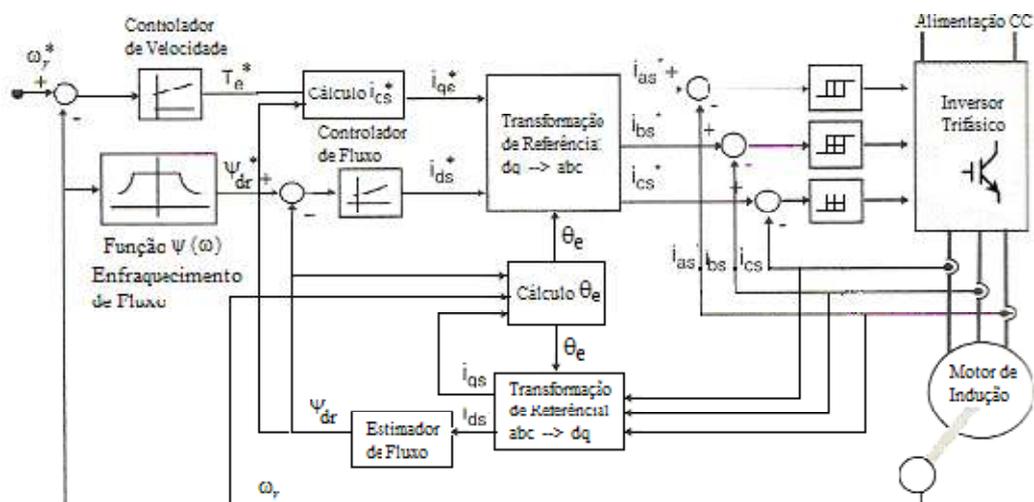


Figura 2.26 - Diagrama de blocos do controlo indirecto por orientação de campo [22]

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 [22].

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 enconders 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 electromotrices 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 enconders 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 electromotrices 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 (1.6) e com o fasor da Figura 2.27.

$$T_e = \frac{3P}{2} \lambda_{af} i_s \quad (1.6)$$

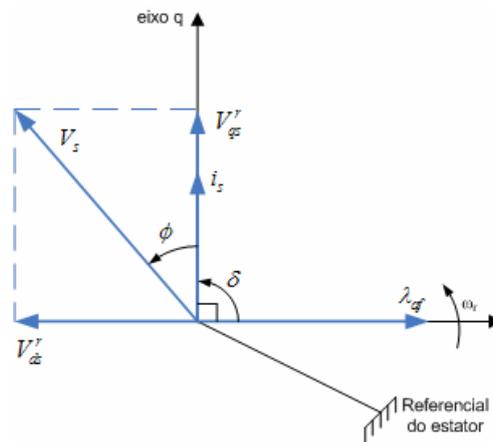


Figura 2.27 - Diagrama fasorial com  $\delta=90^\circ$  [24]

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 controlado 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 cálculo 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.

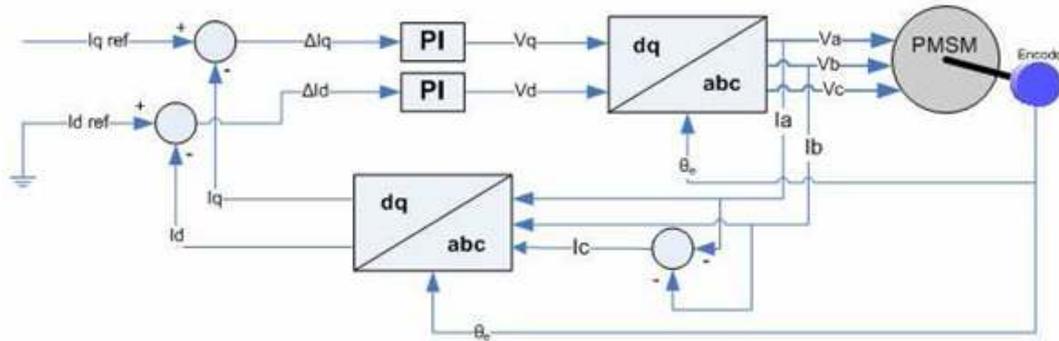


Figura 2.28 - Diagrama de blocos do controlo vectorial com encoder [24]

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.

## Space Vector Modulation

A técnica Space Vector Modulation (SVM) tornou-se a mais popular e importante técnica de PWM para 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 [24].

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 DC, maior eficiência, o número de comutações dos semicondutores é cerca de 30% menor do que utilizando o método convencional Sinusoidal Pulse Width Modulation [24].

Considerando que o estado de cada braço do inversor é representado pelo estado da variável  $S_x$  ( $S_x=1$  se o semiconductor 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 2.22, 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 [24].

Tabela 2.3 - SSVs e tensões de fases [23]

$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_{AB}$	$V_{BC}$	$V_{CA}$	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	$V_{111}$

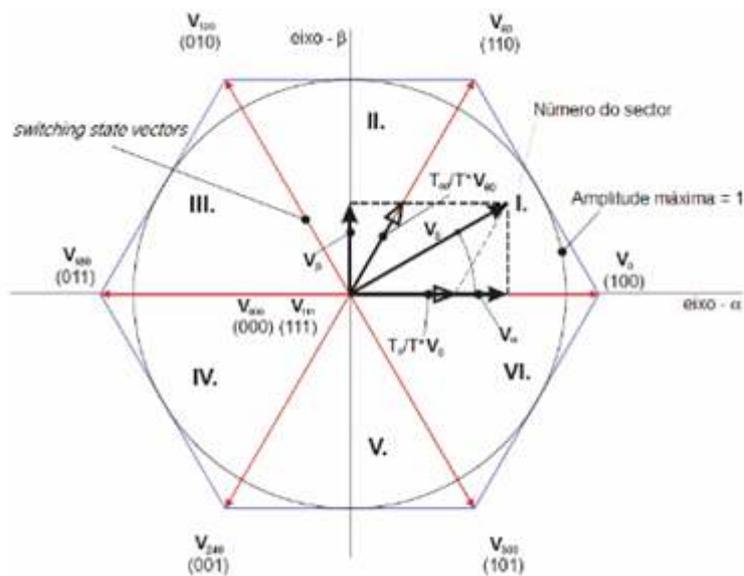


Figura 2.29 - Representação vetorial de um inversor de três braços[24]

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.

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

Na Figura 2.30 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  $I_c$  no referencial dq e a projecção de  $V_q$  e  $V_d$  no referencial  $\alpha\beta$  realizada no interior do bloco SVM.

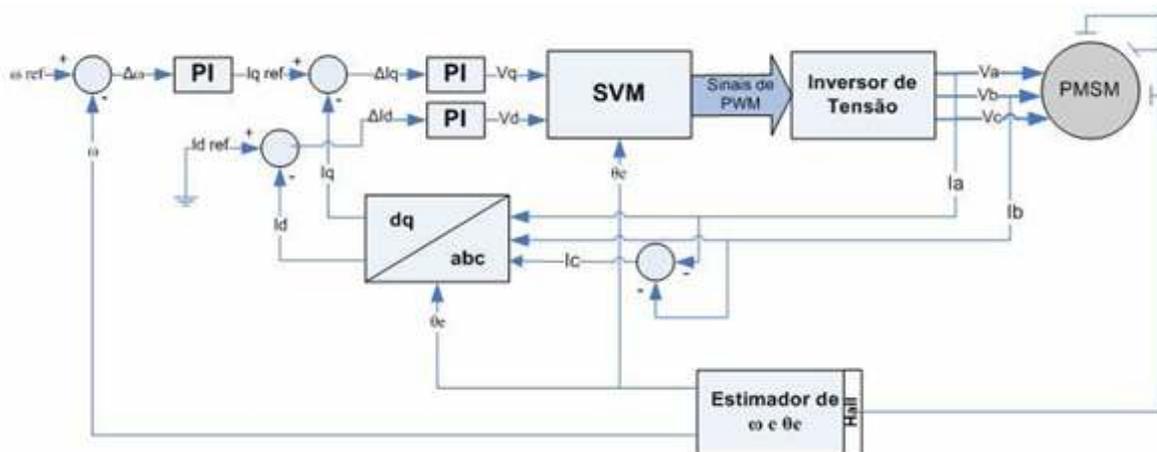


Figura 2.30 - Diagrama de blocos do Controlo por orientação de campo com base em sensores de Hall

### 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. 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 [25]

	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 2.31.

Na verdade através da Figura 2.31 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.

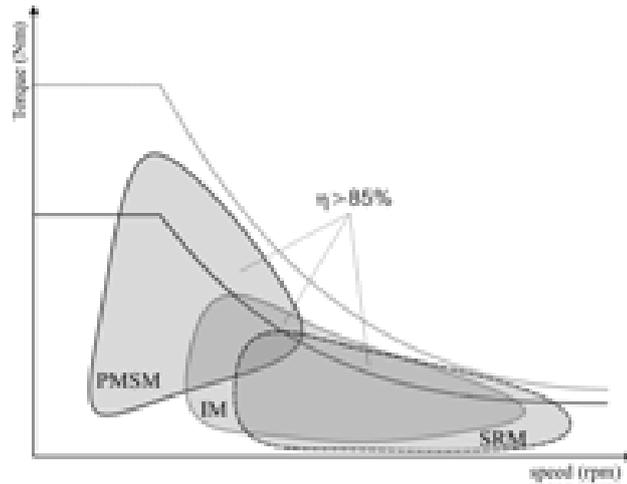


Figura 2.31 - Característica Binário-Velocidade comparativa dos vários tipos de motores

## 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 2.32 é representado um mapa de densidade de energia e de potência de várias fontes de energia.

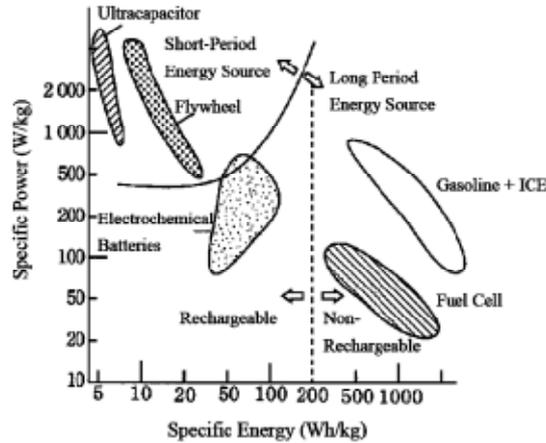


Figura 2.32 - Características dos distintos sistemas de armazenamento de energia

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 suprimidos pelos supercondensadores, resultando em menor potência fornecida por estas, aumentando assim a eficiência [11, 26].

Existem opiniões de que a densidade de energia e potência das actuais baterias e dos condensadores são suficientes para conceber veículo eléctrico 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 [14].

### 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 2.33.

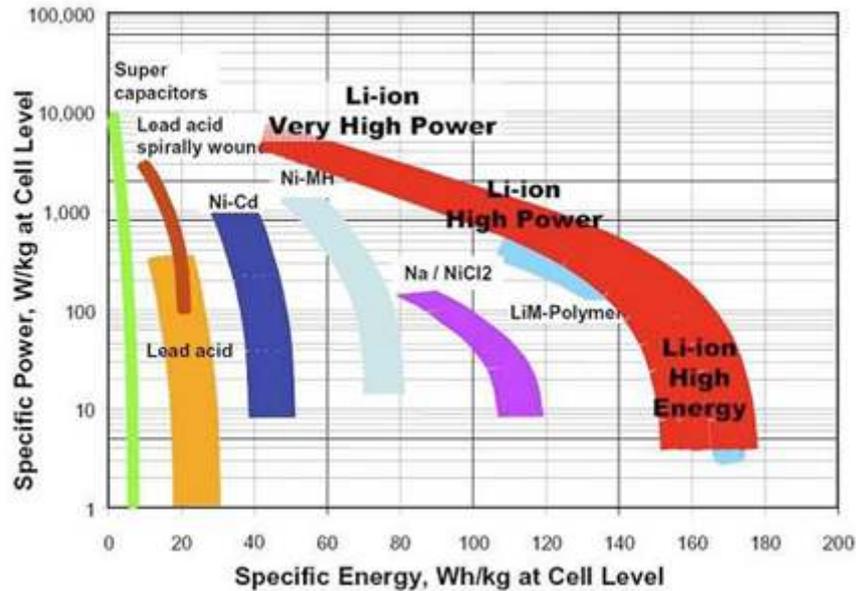


Figura 2.33 - Características de várias tecnologias de baterias [27]

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 otimizar 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 melhor 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 [26].

## 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 [11].

De acordo com a Figura 2.32, 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 [14].

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.

# Referências

1. HistóriaEV. Available from: <http://inventors.about.com/library/weekly/aacarselectrica.htm>.
2. EAAEV, H.; Available from: <http://www.eaaev.org/eaevsforsale.html>.
3. Duryea, C.; Available from: [http://www.f1-info.cz/?gallery=f1foto/foto0000/1894\\_1899](http://www.f1-info.cz/?gallery=f1foto/foto0000/1894_1899).
4. Rodrigues, G.B.T., *Modelação e Simulação de um Formula Student Eléctrico*. 2009, Instituto Superior Técnico.
5. Mehrdad Ehsani, Y.G., Ali Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles* Second Edition ed, ed. C. Press.
6. Karner, D.B., *State of the art in electric race car power electronics*. Power Electronics in Transportation, 1996: p. 215-217  
232.
7. DRAGRACE. Available from: [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).
8. FormulaStudent. Available from: <http://www.automotto.org/entry/university-racing-eindhoven-striping-all-electric-racer-does-100kmh/>.
9. EVCUP. Available from: <http://evcup.com/>.
10. MontanhaYokohama. Available from: [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).
11. Chan, C.C., *The state of the art of electric and hybrid vehicles*. Proceedings of the IEEE, 2002. **90**(2): p. 247-275.
12. Chan, C.C., *The state of the art of electric vehicles*. Proceedings of the World Engineers' Convention 2004, Vol F-B, Power and Energy, 2004: p. 511-518  
626.
13. Chan, C.C. 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, 2004: p. 46-57  
1818.

14. Chan, C.C., *The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles*. Proceedings of the IEEE, 2007. **95**(4): p. 704-718.
15. Westbrook, M.H., *The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars*. IEE Power & Energy Series. Vol. 38. 2001.
16. Zeraouia, M., M.E.H. Benbouzid, and D. Diallo. *Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study*. in *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference*. 2005.
17. MotorInducao. Available from: <http://paginas.fe.up.pt/~ee02060/MIT.html>.
18. Zidani, F., M.E.H. Benbouzid, and D. Diallo, *Fuzzy efficient-optimization controller for induction motor drives*. Power Engineering Review, IEEE, 2000. **20**(10): p. 43-44.
19. Zidani, F., et al., *Fuzzy optimal Volts/Hertz control method for an induction motor*. IEMDC 2001: IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2001: p. 377-381 1004.
20. MotorRelutanciaComutado. Available from: <http://www.deetc.isel.ipl.pt/jetc05/CCTE02/papers/finais/fortes/22.pdf>.
21. Zeraouia, M., M.E.H. Benbouzid, and D. Diallo, *Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study*. 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2005: p. 280-287 837.
22. Granadeiro, S.A.M., *Controlo de Motor Assíncrono, Aplicado a Veículos Eléctricos*, in *Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa*. 2009.
23. Krishnan, R., *Electric motor drives : modeling, analysis, and control*. 2001.
24. Lopes, F.A.P., *Estudo e Comparação de Diferentes Métodos de Controlo de Motores Síncronos com Ímanes Permanentes*. 2008, FEUP.
25. West, J.G.W. *DC, induction, reluctance and PM motors for electric vehicles*. in *Motors and Drives for Battery Powered Propulsion, IEE Colloquium on*. 1993.
26. Moreno, J., M.E. Ortuzar, and J.W. Dixon, *Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006. **53**(2): p. 614-623.
27. Reis, N., *O automóvel híbrido como elemento fornecedor-consumidor de electricidade*. 2008, Instituto Superior Técnico.

# Anexos

		Task Name	Duration	Start	Finish	Predecessors
1		<b>Projecto - Sistema de Tracção de um VEC</b>	185 days?	Mon 01-11-10	Thu 14-07-11	
2		Estruturação do Projecto	6 days?	Mon 01-11-10	Mon 08-11-10	
3		Concepção da Página WEB	11 days?	Mon 01-11-10	Mon 15-11-10	
4						
5		<b>Estudo e Familiarização com o Tema</b>	24 days	Tue 09-11-10	Fri 10-12-10	
6		Estudo da motorização e mecânica do Fiat Uno 45S	5 days	Tue 09-11-10	Mon 15-11-10	
7		Estudo da topologia dos veículos de combustão interna	5 days	Tue 09-11-10	Mon 15-11-10	
8		Estudo das alterações do Fiat Uno 45 S para o Challenger Desafio Único	5 days	Tue 09-11-10	Mon 15-11-10	
9		Estudo dos veículos eléctricos comercializados	7 days	Mon 15-11-10	Tue 23-11-10	
10		Estudo dos motores utilizados nos VE's	7 days	Mon 15-11-10	Tue 23-11-10	
11		Estudos dos métodos de Controlo dos VE's	7 days	Mon 15-11-10	Tue 23-11-10	
12		Estudo das topologias	7 days	Mon 15-11-10	Tue 23-11-10	
13		Relatório Progresso	16 days	Tue 09-11-10	Tue 30-11-10	
14			10 days?	Mon 10-01-11	Sat 22-01-11	
15		<b>Elaboração do estado de arte</b>	30 days	Fri 24-12-10	Thu 03-02-11	
16		Entrega do Relatório ao Orientador com Estado de Arte - 1ª Revisão	1 day?	Fri 04-02-11	Fri 04-02-11	15
17		1ª Revisão Orientador	5 days	Sun 06-02-11	Thu 10-02-11	16
18		Alteração/Correcção do Estado de Arte	2 days	Fri 11-02-11	Mon 14-02-11	17
19		Entrega do ESTADO DE ARTE	1 day?	Tue 15-02-11	Tue 15-02-11	18
20						
21		<b>Encomenda de Material</b>	41 days	Fri 03-12-10	Fri 28-01-11	
22						
23		<b>Simulações</b>	30 days	Mon 31-01-11	Thu 10-03-11	
24		PowerTrain Fiat Uno 45S	8 days	Mon 31-01-11	Tue 08-02-11	
25		Controlo de Motor Sincrono de Ímanes Permanentes	15 days	Wed 09-02-11	Tue 01-03-11	24
26		PowerTrain Motor Eléctrico (Motor+caixa de velocidade + diferencial)	8 days?	Wed 02-03-11	Fri 11-03-11	25
27						
28		<b>Testes ao Motor e Controlador Escolhidos para o Projecto</b>	30 days?	Mon 14-03-11	Fri 22-04-11	
29		Estudo das folhas de características do motor e do controlador	5 days	Mon 14-03-11	Fri 18-03-11	
30		Teste do Motor	5 days	Mon 21-03-11	Fri 25-03-11	29
31		Teste do Controlador	5 days	Mon 28-03-11	Fri 01-04-11	30
32		Programação do Controlador	15 days	Mon 04-04-11	Fri 22-04-11	31
33						
34		<b>Acoplamento no Veículos do Sistema</b>	55 days?	Mon 21-02-11	Fri 06-05-11	
35		Desenho e concepção da plataforma dos suportes para o motor e controlador	30 days	Mon 21-02-11	Fri 01-04-11	
36		Montagem do Motor no Veículo	5 days	Mon 04-04-11	Fri 08-04-11	35
37		Teste do Motor no Veículo	10 days	Mon 11-04-11	Fri 22-04-11	36
38		Teste do PowerTrain	10 days	Mon 25-04-11	Fri 06-05-11	37
39						
40		<b>Testes Finais</b>	50 days?	Mon 09-05-11	Fri 15-07-11	
41		Teste em Pista do Veículo	30 days	Mon 18-07-11	Fri 26-08-11	40
42						
43		<b>Relatório Final</b>	114 days?	Tue 08-02-11	Fri 15-07-11	
44		Elaboração do Relatório Final (Versão Provisória)	20 days	Mon 23-05-11	Fri 17-06-11	
45		Entrega do Relatório (Versão Provisória) ao orientador	5 days	Mon 20-06-11	Fri 24-06-11	44
46		Alteração/Correcção do Relatório (Versão Provisória)	5 days	Mon 27-06-11	Fri 01-07-11	45