

Conversão de uma moto 4 TRX 250 da Honda em elétrica

Luís Filipe Martins Loureiro

Dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. José Ferreira Duarte



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2012

Resumo

As preocupações ambientais e a escassez dos recursos energéticos de origem fóssil, bem como as preocupações relativamente ao aquecimento global, serem cada vez maiores justificam a necessidade de encontrar soluções alternativas face ao automóvel convencional. Assim, os veículos elétricos têm vindo a ser vistos como uma solução para o futuro por parte dos governos, fabricantes de automóveis e consumidores. A indústria automóvel tem um grande impacto na economia mundial, o que justifica o esforço e os recursos atualmente canalizados para o desenvolvimento dessas soluções, das quais os veículos elétricos híbridos fazem parte. A reduzida densidade energética das baterias, tendo em conta a tecnologia existente atualmente, é o grande entrave ao aumento da autonomia.

O propósito desta dissertação é o desenvolvimento de um veículo elétrico (VE). Tipicamente, o funcionamento deste tipo de veículos é diferente do conceito tradicional de um veículo movido por um motor de combustão interna. Desde logo o único motor que vai transmitir movimento às rodas é um motor elétrico que roda por ação de um campo magnético. Para que haja potência fornecida ao motor elétrico é necessário um conjunto de baterias que é comandado por um BMS. Todos os componentes são finalmente controlados por um sistema de controladores.

Esta dissertação é parte integrante de um projeto do departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) que consiste em desenvolver um VE com base na plataforma de uma moto 4x4.

O resultado desta dissertação é veículo elétrico.

Abstract

Environmental concerns and the scarcity of fossil energy resources as well as concerns about global warming are increasing justify the need to find alternative solutions compared to the conventional car, electric vehicles have thus been seen as a solution for the future by governments, automobile manufacturers and consumers. The automotive industry has a major impact on world economy, which justifies the effort and resources currently allocated to the development of these solutions, of which electric vehicles are a part. The reduced energy density batteries, taking into account the technology available today, is the greatest obstacle to increased autonomy.

The purpose of this dissertation is the development of an electric vehicle (EV), to predict the behavior of the real system. Typically, operation of such vehicles is different from the traditional concept of a vehicle powered by an internal combustion engine. Since then the only engine that will transmit movement to the wheels is an electric motor. To have power supplied to the electric motor requires a battery pack that is controlled by a BMS. All components are ultimately controlled by system controller.

This work is part of a project of the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto (FEUP) which is to develop an EV based on the platform of a 4x4.

The result of this dissertation is the electric vehicle.

Agradecimentos

Ao meu orientador, o Professor Doutor José Manuel Ferreira Duarte, pela amizade, pelo empenho, pela confiança depositada, pelos níveis de exigência, assim como pela ajuda e dedicação ao longo da realização da dissertação.

Ao Professor Doutor Armando Luís Sousa Araújo, pelos conselhos e conhecimentos transmitidos relativamente à eletrónica.

Ao Professor Doutor Joaquim Oliveira Fonseca pela verificação dos desenhos.

Ao Sr. José Fernando Rocha de Almeida e Sr. Albino Alves Calisto Dias pela ajuda na fabricação das peças nas oficinas de mecânica da FEUP.

Aos alunos José Ricardo Sousa Soares e Cláudio Fernando Pereira Pinto pela ajuda no controlo e ligações elétricas.

À minha família e amigos, que me têm apoiado.

E por fim o meu muito obrigado a todos que contribuíram com algo, diretamente ou mesmo indiretamente, para esta Dissertação.

Muito Obrigado!

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiii
Abreviaturas.....	xiv
Capítulo 1	1
1.1 Introdução	1
1.2 O projeto	2
1.3 Passos realizados para a realização da tese	3
1.4 Importância dos Veículos Elétricos	3
1.5 Motivação e Objetivos	4
1.6 Estrutura da dissertação	4
Capítulo 2	6
2.1 Estado da Arte.....	6
2.2 Perspetiva Histórica	6
2.3 Conceitos relacionados com veículos elétricos híbridos, VEH's.	9
2.4 Sistema de propulsão de veículos elétricos.....	12
Motores Elétricos.....	15
Motores de Corrente Contínua (C.C.).....	16
Motores de C.C. Íman Permanentes sem escovas	22
Motor síncrono trifásico com ímanes permanentes	22
Motores de relutância	23
Comparação entre os diferentes tipos de motores elétricos.....	25
2.5 Conversores de Potência	26
2.6 Baterias	29
Tipo de baterias mais usadas em veículos elétricos e híbridos.....	29
A bateria Ácido de chumbo (Pb-ácido)	30
Nickel-cadmium (NiCd)	31
Nickel hidreto metálico (NiMH)	31
Iões de Lítio (Li-ion)	32
2.7 Supercondensadores.....	33
2.8 Pilhas de Combustível (Full-Cell)	33

2.9 Estratégias de Controlo	34
Controlo direto por orientação de campo	34
Controlo indireto por orientação de campo	36
Space Vector Modulation	39
Controlo por orientação de campo com base em sensores de Hall.....	42
2.10 Comparação dos Sistemas de Propulsão	42
Capítulo 3 - Estudo do Projeto	44
3.1 Escolha do motor elétrico	44
3.2 Simulação do motor elétrico PMS 120W	47
3.3 Escolha do controlador	49
3.4 Escolha das Baterias	50
Vantagens	50
Desvantagens	50
Descarregamento	51
Carregamento.....	52
Capítulo 4- Concretização do projeto.....	53
4.1 Máquina Elétrica PMS 156W	53
Encoder	55
Sensor de Temperatura	56
Sistema de Refrigeração	56
4.2 Baterias [33].....	57
4.3 Controlador [32].....	61
Interface CAN (USB-para-CAN)	64
Dissipador de Calor	65
Capítulo 5 - Preparação do Veículo.....	66
5.1 Suporte de fixação do PMS 156W e acoplamento ao veículo	67
5.2 Acoplamento da bomba de água, ventoinha e permutador de calor	71
5.3 Fixação do controlador no veículo.....	72
5.4 Fixação das baterias	72
Capítulo 6	73
6.1 Conclusões	73
6.2 Trabalhos futuros	73
Capítulo 7 - Referências e Bibliografia	74
Anexos.....	78
Anexo A - Desenho do motor.....	78
Anexo B - Desenhos de algumas peças fabricadas e alteradas.....	79
Anexo C - Características e dimensões do rolamento 6301-2RSH	85

Lista de figuras

Figura 1 - Moto Fourtrax TRX 250 da Honda	2
Figura 2 - Moto elétrica Socovel	7
Figura 3 - Mike Corbin e sua moto elétrica [5]	7
Figura 4 - Charles E. MacArthur e a 1ª moto elétrica a subir o Mt. Washington [6].....	8
Figura 5 - Moto EMB Lectra VR24 [7].....	8
Figura 6 - Mota detentora do record de velocidade.....	8
Figura 7 - Topologia básica do BEV [8]	10
Figura 8 - Esquema de constituição de um BEV [8]	10
Figura 9 - Esquema de funcionamento de um veículo elétrico com extensão de autonomia...	11
Figura 10 - Diagrama de bloco de um sistema elétrico de propulsão [8].....	13
Figura 11 - Os dois grupos de tipos de motor a considerar para veículos elétricos [8].....	14
Figura 12 - Constituição do motor de corrente contínua [13]	16
Figura 13 - Curvas características do motor DC [14].....	17
Figura 14 – Características dos motores de corrente contínua	19
Figura 15 - Diagrama vetorial do motor de indução [15].....	20
Figura 16 - Características do Motor de Indução [14].....	21
Figura 17 - Motor de relutância comutado, com 8 pólos no estator e 6 pólos no rotor [18]	23
Figura 18 - Característica binário-velocidade do motor de relutância comutado [19].....	24
Figura 19 - Conversor de potência em Ponte completa.....	27
Figura 20 - Característica Binário-Velocidade do conversor de potência em ponte completa	27
Figura 21 - Característica tensão-corrente do conversor de potência em ponte completa	27
Figura 22 - Conversor de potência em ponte trifásica – inversor.....	28
Figura 23 - Características de várias tecnologias de baterias [30]	30
Figura 24 - Diagrama de blocos do controlo direto por orientação de campo [25].....	35
Figura 25 - Referencial do fluxo rotórico [25]	36
Figura 26 - Diagrama de blocos do controlo indireto por orientação de campo [25]	37
Figura 27 - Diagrama fasorial com $\delta=90^\circ$ [21].....	38
Figura 28 - Diagrama de blocos do controlo vetorial com encoder [21].....	39
Figura 29 - Esquema do inversor trifásico	40
Figura 30 - Representação vetorial de um inversor de três braços [21]	41
Figura 31 - Diagrama de blocos do Controlo por orientação de campo com base em sensores de Hall	42
Figura 32 - Característica Binário-Velocidade comparativa dos vários tipos de motores	43
Figura 33 - Motor PMS 120W.....	46

Figura 34 - Simulação em simulink do motor elétrico	48
Figura 35 - Controlador Sevcon G8035	49
Figura 36 - Corrente máxima de descarga admitida pelas baterias	51
Figura 37 - Tempo de carregamento com o carregador Sevcom.....	52
Figura 38 - Motor PMS 156W refrigerado a água	53
Figura 39 - Encoder - AM256 com íman	55
Figura 40 - Sinais de saída apresentados pelo encoder	55
Figura 41 - Sensor de temperatura, HTY84/130	56
Figura 42 - Permutador de calor (radiador).....	56
Figura 43 – Ventoinha	57
Figura 44 - Bomba elétrica de recirculação de água	57
Figura 45 - Pack de baterias Ni-MH, com invólucro, ligações e terminais para sensorização, à esquerda. Na direita um módulo composto por 12 células.....	58
Figura 46 - Resposta da tensão de uma célula de Ni-MH a diferentes correntes de descarga (5 a 10 s) e carga (20 a 25 s) [30].	59
Figura 47 - Resposta da tensão da bateria a uma carga: dinâmicas de descarga e rest time. ...	59
Figura 48 - Modelo da bateria adotado.....	60
Figura 49 - Controlador GEN4-80 – SEVCON	61
Figura 50 - Corrente permitida versus Base de temperatura do controlador.....	64
Figura 51 - Modulo Interface CAN (USB-para-CAN).....	64
Figura 52 - Dissipador de calor do controlador.....	65
Figura 53 - Moto antes das alterações	66
Figura 54 - Mota depois de retirar o motor de combustão	66
Figura 55 - Corrente de transmissão.....	68
Figura 56 - Veio de transmissão adquirido antes das alterações	68
Figura 57 - Montagem do veio alterado	68
Figura 58 - Peça auxiliar para acoplar no motor	69
Figura 59 - Suporte do motor	69
Figura 60 - Suporte do motor fixo nos apoios da mota	70
Figura 61 - Acoplamento do motor no suporte.....	70
Figura 62 - Acoplamento do permutador de calor (radiador).....	71
Figura 63 - Ligação do circuito de refrigeração	71
Figura 64 - Controlador e dissipador acoplado na mota.....	72

Lista de tabelas

Tabela 1 - Principais características do modelo considerado	3
Tabela 2 - Comparação entre os motores para VE	25
Tabela 3 - Características do conversor de potência em ponte completa	28
Tabela 4 - SSVs e tensões de fases [20]	41
Tabela 5 - Comparação dos sistemas de propulsão [26]	43
Tabela 6 - Cálculos de desempenho da mota	45
Tabela 7 - Características técnicas do PMS 120W	46
Tabela 8 - Características do controlador Sevcon G8035	49
Tabela 9 - Características do motor elétrico PMS 156 W	54
Tabela 10 - Características da Bomba de água elétrica	57
Tabela 11 - Folha de características do controlador SEVCON GEN4-80	62
Tabela 12 - Temperatura de operação do controlador GEN4-80	65

Abreviaturas

HEV - Hybrid electric vehicle (Veículo elétrico híbrido)

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

BEV - Electric vehicle batteries (Veículos elétricos a baterias)

AC - Alternating current (Corrente Alternada)

DC - Direct current motor (Motor de corrente contínua)

CC – Corrente continua

mph – (Milhas por hora)

CV - Cavalo vapor

EV – Electric Vehicle (veículo elétrico)

HP – Horsepower

MW – Mega watt

MRV - Variable reluctance motors (Motores de relutância variável)

PWM - Pulse width modulation (Modulação por largura de impulso)

IGBT - Insulated-gate bipolar transistor

V - Volt

SVM - Space Vector Modulation

SSV - Switching state vectors

PMSM - Permanent Magnet Synchronous Motor (Motor Síncrono de Ímanes Permanentes)

Capítulo 1

1.1 Introdução

O transporte de pessoas, mercadorias e bens, utilizando as vias rodoviárias sempre foi um dos maiores desafios enfrentados pela Humanidade, tendo como meta, realizá-lo o mais rapidamente, com mais segurança, mais conforto e maior autonomia possíveis. Atualmente os vários meios de transporte existentes apresentam grande dependência dos combustíveis fósseis, nomeadamente dos derivados do petróleo. Todos os dias somos confrontados com a escalada dos preços dos combustíveis fósseis, dos quais a Humanidade se encontra demasiadamente dependente. Associado a isto a sua escassez, cada vez mais preocupante, assim como os processos de extração e processamento, as desastrosas consequências ecológicas, que se manifestam na degradação do ar e no aumento da frequência dos desastres naturais, constituem uma herança extremamente pesada para as gerações vindouras.

Assim sendo, o transporte de pessoas e mercadorias de forma sustentada, utilizando as vias rodoviárias, comporta um dos maiores desafios num futuro próximo. O aumento exponencial da população mundial, essencialmente nos países economicamente emergentes, vai conduzir a um aumento significativo no número total de veículos rodoviários a circular no mundo inteiro. Se todos estes meios funcionarem a motores de combustão, é possível prever que surgirão graves problemas relacionados com a quantidade de emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, para além de que o petróleo disponível no nosso planeta é limitado. Com este cenário, está justificada a crescente investigação e desenvolvimento de carros elétricos e/ou híbridos e a necessidade de encontrar alternativas, energética e ecologicamente viáveis, face ao automóvel convencional. Portugal encontra-se na vanguarda relativamente à mobilidade elétrica, apostando em novos modelos energéticos, 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 novo carro elétrico tentando substituir o binómio motor térmico – combustíveis fósseis, por veículos amigos do ambiente.

Olhando para o peso económico do conjunto dos construtores mundiais do sector automóvel, facilmente se percebe o grande potencial de negócio associado ao desenvolvimento de veículos com fontes de energia alternativas, como o veículo elétrico híbrido (VEH). O aumento de interesse nos VEH's deve-se essencialmente aos avanços significativos verificados na área da eletrónica de potência, dos motores de ímanes permanentes e das baterias e supercondensadores ao longo dos últimos anos. O consequente aumento de rendimento destes equipamentos confere um novo potencial ao conceito de VEH que, apesar de já existir há mais de cem anos, nunca teve grande sucesso.

A vantagem mais óbvia dos motores elétricos sobre os motores de combustão interna é que são mais eficientes e não são poluentes pelo menos durante o seu funcionamento, reduz significativamente a poluição sonora e apresenta custos mais reduzidos de consumo (desprezando o custo de aquisição e substituição dos equipamentos associados, tais como a substituição de baterias) para o utilizador. No entanto, ao nível dos sistemas de armazenamento a tecnologia existente ainda não permite uma autonomia elevada quando comparado com os veículos que recorrem aos combustíveis fósseis, apresentam problemas técnicos práticos, como o tempo de carga das baterias e não estão totalmente livres de custos ambientais, apesar de estas serem quase 100% recicláveis. Os veículos híbridos, com motor elétrico (com blocos de baterias) e motor de combustão interna e veículos elétricos puros (apenas baterias) têm recebido grande atenção, sendo possível prever-se para os próximos anos a introdução de frotas desses veículos, principalmente nos grandes e poluídos centros urbanos.

1.2 O projeto

O Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (DEEC) da FEUP adquiriu, recentemente, duas motos 4x4, com o objetivo de desenvolver um VEH de topologia série, e um veículo elétrico puro.

Trata-se do modelo TRX 250 da HONDA, figura 1, cujas principais características se encontram resumidas na tabela 1:



Figura 1 - Moto Fourtrax TRX 250 da Honda

Tabela 1 - Principais características do modelo considerado

Modelo:	HONDA trx 250
Motor:	229cc quatro-tempos, refrigerado a ar
Dimensões:	1,9 x 1,035 x 1,17 (m)
Peso:	196 Kg

1.3 Passos realizados para a realização da tese

Para a concretização do projeto foram seguidos os seguintes passos:

- 1º- Realização de um estudo dos diversos componentes existentes do mercado.
- 2º- Desmontagem da carcaça exterior da moto e retirada do motor.
- 3º- Levantamento da geometria do quadro da moto e modelação do quadro.
- 4º- Projeto mecânico do sistema propulsor e do sistema de transmissão.
- 5º- Escolha dos materiais necessários para realizar os componentes e peças necessárias.
- 6º- Aquisição dos materiais e das peças necessárias
- 7º- Fabricação dos componentes projetados
- 8º- Montagem do sistema projetado.
- 9º- Testes de funcionamento.

1.4 Importância dos Veículos Elétricos

O veículo elétrico é uma invenção com mais de 100 anos que consiste num veículo com um motor elétrico que é alimentado com a eletricidade proveniente de um acumulador (ou bateria), que contem energia armazenada sob a forma de um potencial eletroquímico. Esta forma de motorização é a mais eficiente de todas as conhecidas, devidas às excelentes propriedades do motor elétrico, que disponibiliza um elevado binário a baixas rotações, mantendo uma potência constante num grande intervalo. Além disso, não consome energia quando parado e tem um rendimento de energia elétrica para mecânica superior 90%, pois pouca energia se perde em aquecimento do motor, como é normal no motor a combustão em que os rendimentos podem ser inferiores a 50%. Os veículos elétricos são ligados à rede elétrica para serem carregados, podendo esta operação ser efetuada em qualquer tomada elétrica. Para além disso, estes veículos conseguem ter a capacidade de regenerar energia, ou

seja, recuperar nas descidas e travagens parte da energia despendida no esforço de subida ou aceleração, aumentado ainda mais a sua eficiência global no uso da energia. Os veículos elétricos não têm qualquer emissão direta 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 apenas 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.

1.5 Motivação e Objetivos

Nos últimos anos tem-se vindo a detetar um investimento acentuado na dinamização dos veículos com propulsão totalmente elétrica, nomeadamente por parte dos maiores fabricantes. Perante esta situação nota-se uma preocupação em conceber sistemas de tração elétrica mais eficientes e com perdas reduzidas, valorizando assim o sector dos motores e controladores elétricos. O motor síncrono de ímanes permanentes (PMSM) tem sofrido grandes inovações, sendo reconhecido como um forte candidato para a propulsão de veículos elétricos.

Neste âmbito juntamente com a motivação e desejo de dar seguimento e concretização a projetos já realizados na disciplina de Sistemas de Propulsão e Suspensão Automóvel no decorrer do curso, decidi realizar este projeto.

O principal objetivo é alterar uma moto 4, de forma a torná-la 100% elétrica.

1.6 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

O primeiro e presente capítulo trata da introdução ao documento, descrição geral e breve do trabalho e dos respetivos objetivos.

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

O terceiro capítulo apresenta em detalhe a envolvência teórica subjacente ao estudo do projeto.

O capítulo quatro apresenta uma descrição dos componentes utilizados e suas características.

No quinto capítulo são apresentados os acoplamentos e montagem das componentes.

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

Por fim, no sétimo capítulo encontram-se referências e bibliografia de vários documentos, livros e paginas web consultadas e pesquisadas.

Capítulo 2

2.1 Estado da Arte

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

Serão apresentados os vários componentes dos sistemas de propulsão elétrica já utilizados na tração de veículos elétricos destacando os motores, baterias, supercondensadores, conversores e as respetivas estratégias de controlo.

2.2 Perspetiva Histórica

Antes de mais, apresentam-se algumas datas relevantes no que diz respeito á origem dos veículos elétricos e o seu enquadramento histórico.

A história dos veículos elétricos surgiu em meados do século XIX com a invenção do motor elétrico por Michael Faraday em **1821**.

Entre **1832 e 1839** surgiu o primeiro carro elétrico construído na Escócia por Robert Anderson que funcionava com baterias não recarregáveis.

Em **1870** Sir David Salomon desenvolveu um carro com um pequeno motor elétrico e baterias muito pesadas que apresentava uma autonomia baixa;

Em **1881** o inventor francês Gustave Trouvé apresentou um trabalho realizado sobre um veículo de três rodas, na exposição internacional de Eletricidade em Paris, e levou a França e Grã-Bretanha a apoiarem o desenvolvimento generalizado de veículos elétricos.

Em **1886** foi introduzido na Inglaterra um táxi elétrico que utilizava uma bateria de 28 células e um pequeno motor elétrico;

Entre **1890 e 1910** houve melhoramentos significantes na tecnologia das baterias, especialmente com o desenvolvimento das baterias, de ácido-chumbo por *H. Tudor* e das baterias de níquel-ferro por *Edison e Junger*.

Em **1898** o australiano, *Dr. Ferdinand Porsche*, construiu o seu primeiro carro, o *Lohner Electric Chaise* sendo o primeiro carro de tração dianteira. O segundo carro de Porsche foi um híbrido, usando um motor de combustão interna para acionar um gerador que fornecia potência aos motores elétricos localizados nos cubos das rodas.

Em **1899** a *Pope Manufacturing Company* fundiu-se com duas empresas mais pequenas de carros elétricos para formar a *Electric Vehicle Company*, tendo posteriormente apresentado dois automóveis híbridos no salão de Paris.

Em **1904** *Henry Ford* superou os desafios impostos pelos carros a gasolina – ruído, vibração e cheiro – e iniciou a linha de montagem de veículos de baixo preço, baixo peso e com motores a gasolina. Com isto, pouco tempo depois a *Electric Vehicle Company* faliu.

Em **1911** motocicletas elétricas estavam disponíveis, de acordo com um artigo da “*Mecânica Popular*”, e na década de **1920**, Ransomes, um fabricante de empilhadores atuais, explorou o uso de uma motocicleta elétrica.

Em **1941** o racionamento de combustível na Europa incentivou a empresa austríaca Socovel a criar uma pequena moto elétrica, figura 2. Produziram cerca de 400 motos.



Figura 2 - Moto elétrica Socovel

Em **1973** Mike Corbin bateu o recorde de velocidade em terra de 101 mph (162 km/h) com uma moto elétrica, figura 3.



Figura 3 - Mike Corbin e sua moto elétrica [5]

Em **1974** Corbin Gentry, Inc., iniciou a venda de motos elétricas. O Professor Charles E. MacArthur foi o primeiro a usar uma moto elétrica Corbin, figura 4, para subir o Mt. Washington, em New Hampshire. O evento evoluiu para um rally anual chamado “Mt. Washington Alternative Vehicle Regatta”



Figura 4 - Charles E. MacArthur e a 1ª moto elétrica a subir o Mt. Washington [6]

Em **1990** Scott Cronk e EMB criaram a primeira moto elétrica EMB Lectra VR24, figura 5. Esta moto foi pioneira no uso de motores de relutância variável (daí o VR) e foi colocada no mercado para a sua comercialização.



Figura 5 - Moto EMB Lectra VR24 [7]

Atualmente o record de velocidade de uma moto elétrica é de 312 km/h e o de moto elétrica mais potente, com o equivalente a 240 cv de potência máxima. E agora, um novo recorde foi estabelecido: O de moto elétrica que mais rapidamente realizou a subida do Pikes Peak, figura 6.



Figura 6 - Moto detentora do record de velocidade

Como se pode observar, até ao início do século XX, os automóveis elétricos eram mais comuns do que os automóveis a gasolina na maior parte das cidades americanas e ninguém acreditava que poderiam ocorrer mudanças significativas a esse respeito. Um dos mais prestigiados fabricantes de carros elétricos daquela época dizia que *“a eletricidade preenche melhor os requisitos de um sistema de tração do que as máquinas a vapor ou mesmo os motores a explosão”*. A própria revista Scientific American de 1899 dizia que: *“a eletricidade é ideal para veículos pois ela elimina os dispositivos complicados associados aos motores movidos a gasolina, vapor e ar comprimido, evitando o ruído, vibração e calor associados”*.

Tal como foi referido, por volta de 1905 os automóveis a gasolina começaram a tomar a dianteira em termos de popularidade. A autonomia de cerca de 100 km era mais que o dobro da autonomia de um carro elétrico (aproximadamente 50 km) e além disso o investimento inicial assim como o custo operacional dos automóveis elétricos era maior quando comparados com os movidos a gasolina. Entretanto, nesta época foram descobertos grandes poços de petróleo fazendo cair os custos do mesmo. Por este e outros fatores, o desenvolvimento dos automóveis com motor de combustão aumentou significativamente, arruinando por completo a prosperação dos motores elétricos.

No entanto, à medida que o século XXI se ia aproximando, e devido aos diversos problemas provenientes da produção e utilização em massa deste tipo de automóveis, começaram a surgir novos entraves relativamente à sua utilização, nomeadamente, os gases com efeitos de estufa, o fato de utilizarem combustíveis fósseis, entre outros. Posto isto surgiu novamente uma oportunidade de prosperação dos motores elétricos. Além de ser uma solução cada vez mais plausível, devido ao constante avanço da tecnologia nesta área, e também pelo elevado preço dos combustíveis, tem-se observado um elevado interesse por parte da industrial automóvel no desenvolvimento de novos automóveis movidos e/ou auxiliados a energia elétrica.

2.3 Conceitos relacionados com veículos elétricos híbridos, VEH's.

O veículo elétrico é um tipo de veículo que utiliza motores elétricos como propulsores. É composto por um sistema primário de energia, uma ou mais máquinas elétricas e um sistema de acionamento e controlo de velocidade ou binário.

Atualmente existem diversos tipos de veículos:

➤ Veículos puramente elétricos – veículo que depende unicamente de energia elétrica como fonte de tração.

Exemplos:

- Veículos elétricos a bateria (BEV);

- Veículos elétricos solares;

- Veículos elétricos que estão fisicamente ligados a uma rede de distribuição de energia (normalmente veículos de transporte coletivo), como é o caso do metro, comboios, trolley.

O fluxo de energia nos veículos elétricos de baterias ocorre principalmente em cabos elétricos flexíveis, em detrimento das ligações mecânicas verificadas nos veículos de combustão interna, adotando 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 [8].

Na figura 7, podemos observar a topologia básica do BEV, e na figura 8, ilustra-se a constituição de um BEV, constituído pelo subsistema de propulsão elétrica, subsistema de fonte de armazenamento de energia, e subsistema auxiliar.

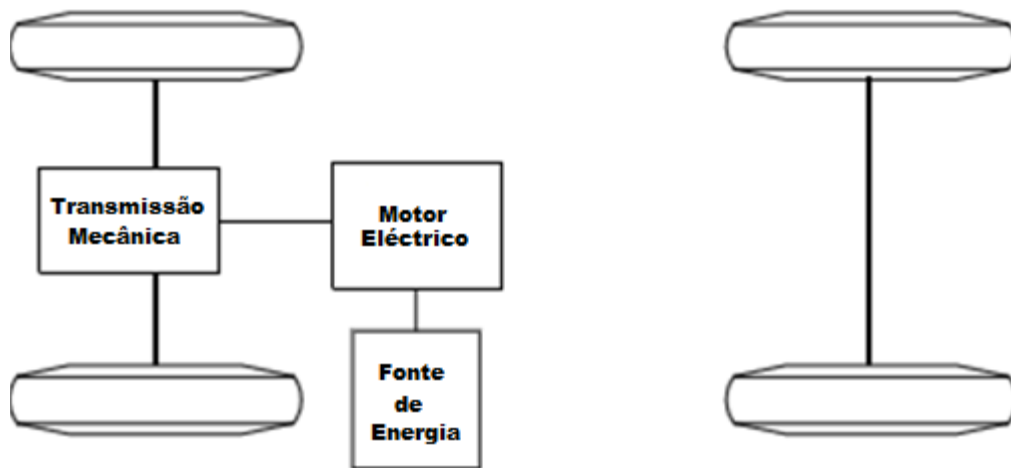


Figura 7 - Topologia básica do BEV [8]

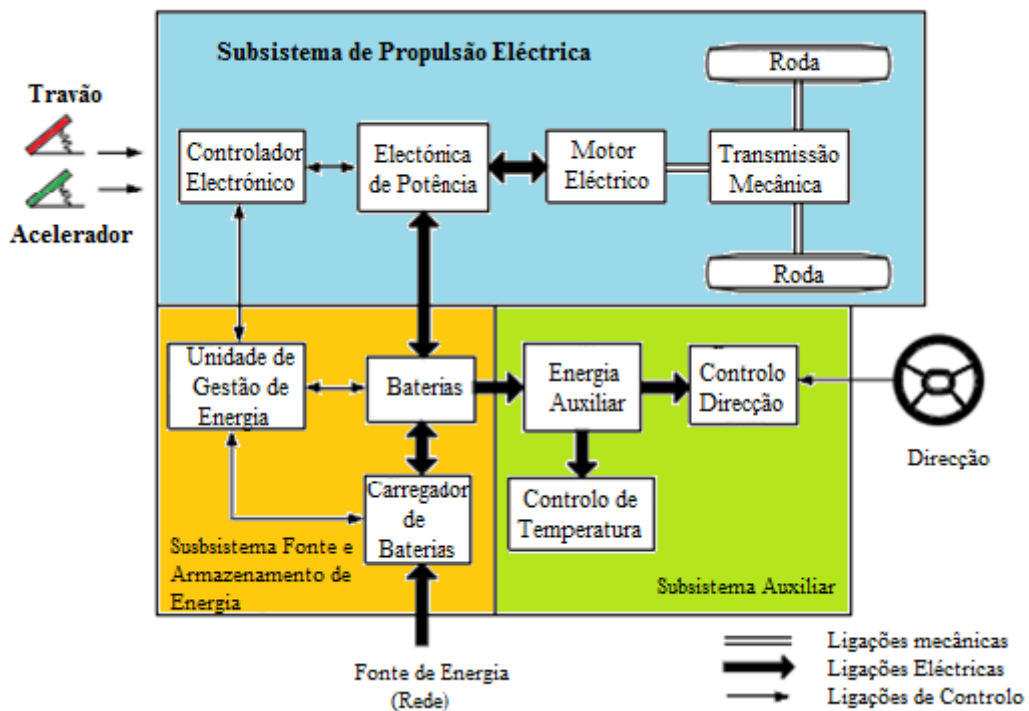


Figura 8 - Esquema de constituição de um BEV [8]

Através das entradas de controlo dos pedais de travão e acelerador do veículo, o controlador eletrónico disponibiliza sinais de controlo adequados à ligação e corte dos dispositivos de eletrónica 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 eletrónico 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 respetivo 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 direção e de toda a eletrónica de controlo e sensorização [8].

➤ Veículos Híbridos - Os veículos que utilizam motores de combustão interna a gasolina, gasóleo, etanol, entre outros, mas que também utilizam motores eléctricos em certos regimes de funcionamento são considerados veículos eléctricos híbridos. Os veículos híbridos emitem gases nocivos para a atmosfera embora em menor quantidade, uma vez que em certos regimes de funcionamento só o motor eléctrico se encontra em funcionamento. Noutros casos estão os dois em funcionamento tendo o motor eléctrico a função de auxiliar o motor de combustão interna na produção de tração, reduzindo assim o consumo de combustível e consequente emissão de poluentes para a atmosfera.

➤ Veículos Eléctricos com extensão de autonomia - Os veículos eléctricos com extensão de autonomia possuem um motor de combustão interna auxiliar onde o motor de combustão serve unicamente para recarregar as baterias. Na figura 9 podemos ver o esquema de funcionamento. Em funcionamento normal estes veículos são puramente eléctricos, pois o motor de combustão interna, que em geral é de baixa potência e económico, sendo ligado apenas para o carregamento das baterias quando estas atingem uma determinada percentagem de carga, e este (motor de combustão) através de um gerador eléctrico e de eletrónica adicional (conversores/retificadores AC/DC) recarrega as baterias do veículo permitindo assim estender a sua autonomia (ver descrição pormenorizada mais á frente), é o exemplo do comboio.



Figura 9 - Esquema de funcionamento de um veículo eléctrico com extensão de autonomia

➤ Veículos a célula de combustível - Existem ainda os veículos elétricos a célula de combustível cujo desenvolvimento tem sofrido um forte investimento nos últimos anos e ainda se encontram em fase de estudo. A fonte de energia nestes veículos é o hidrogénio, combustível muito instável e que tem de ser armazenado em condições específicas, sendo este um dos fatores que dificulta o desenvolvimento deste tipo de veículos.

Vantagens e desvantagens dos veículos elétricos

Vantagens:

- Redução do ruído;
- Baixo custo de utilização;
- Eficientes a qualquer velocidade;
- Arranque suave;
- Ausência de embraiagem e caixa de velocidades;
- Facilidade de utilização;
- Total inexistência de poluição direta;
- Travagem regenerativa.

Desvantagens:

- Autonomia limitada;
- Velocidade limitada em alguns casos;
- Elevado peso;
- Inexistência de uma rede nacional generalizada de carregamento;
- Tempo de carregamento das baterias;
- Problemas das baterias.

2.4 Sistema de propulsão de veículos elétricos

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

O motor elétrico tem como funcionalidade converter energia elétrica 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 eletrônico, pois é através dos sinais provenientes do controlador eletrônico 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 eletrônico pode ser dividido em três unidades funcionais. A unidade de sensorização tem a função de medir parâmetros necessários ao controlo como é o exemplo da corrente, tensão, temperatura, velocidade, binário e fluxo, de modo a enviar esses parâmetros para o circuito de interface. O circuito de interface tem a função de adaptar os sinais oriundos dos sensores de forma a serem decodificados e interpretados pelo processador. O processador tem a função de processar os dados de forma a gerar sinais de controlo para o conversor de potência.

O diagrama de blocos presente na Figura 10 ilustra o sistema de propulsão.

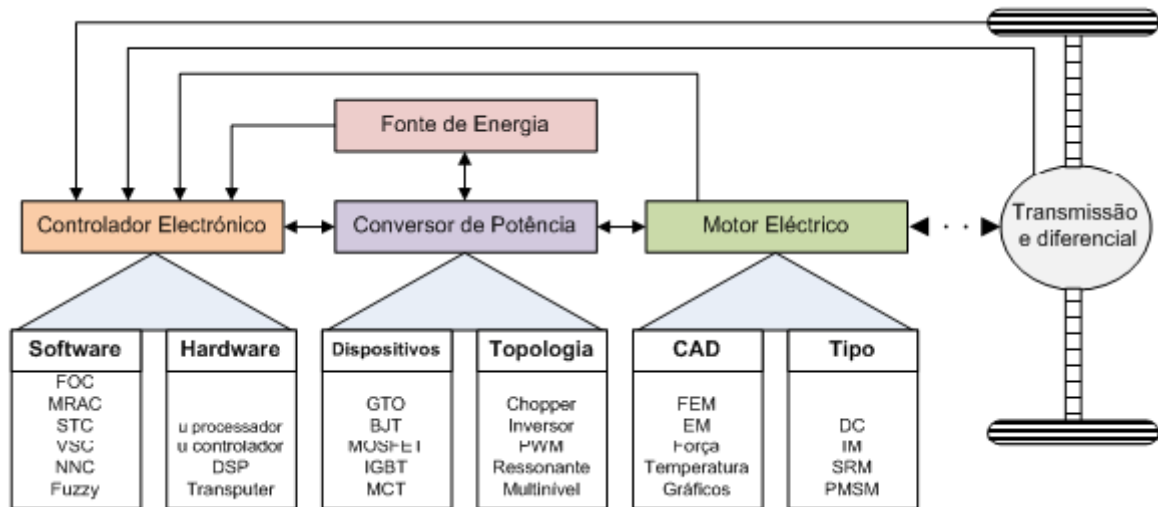


Figura 10 - Diagrama de bloco de um sistema elétrico de propulsão [8]

A escolha do sistema de propulsão de um EV é obtida através de dois fatores 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 elétrico influenciam o processo de escolha do sistema elétrico de propulsão, sendo possível adaptar o sistema às necessidades/requisitos.

Sabendo que o controlador eletrônico 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 subsistema a escolher será o motor elétrico.

Os motores para veículos elétricos podem ser classificados em dois grandes grupos, como ilustra a figura 11, nomeadamente um que inclui motores com comutador/coletor e outro que inclui os motores sem comutador.

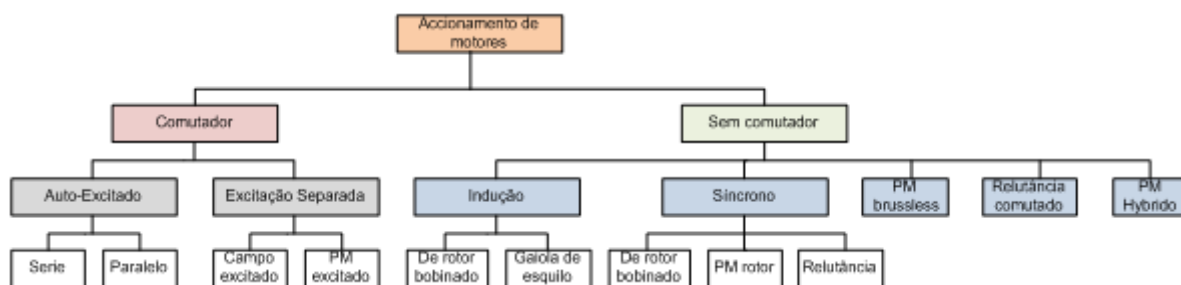


Figura 11 - Os dois grupos de tipos de motor a considerar para veículos elétricos [8]

No grupo mais à esquerda, da Figura 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 tração elétrica devido à sua característica binário-velocidade adaptar-se para as solicitações da tração de um veículo e o seu controlo ser relativamente simples. No entanto, os motores CC necessitam de comutadores/coletores 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 [8].

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 [9].

As recentes evoluções tecnológicas fizeram com que os motores sem coletores avançassem, sendo dotados de maior eficiência, densidades de potência mais elevadas e custos de operação mais reduzidos que os motores CC tradicionais [10, 11].

O grupo mais à direita da figura 11, referente aos motores sem controlador aparece hoje em dia num plano mais atrativo e desejável. Assim sendo, os motores de corrente alternada (CA) tornaram-se, nos últimos anos, muito mais atrativos como meios de propulsão de EV's.

De entre os motores CA sem comutador, sem dúvida o que 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 e eliminam também as perdas no cobre. Atualmente 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 eletrónica [12].

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 propositalmente 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 desempenho. 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 elétricos [8].

Outro tipo de motor reconhecido como tendo algum potencial para ser usado em aplicações de tração em veículos elétricos é o motor de relutância comutada. Basicamente este motor deriva-se diretamente 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 elétricos. 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 detetarem 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 [8].

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

Motores Elétricos

O motor elétrico é um componente fundamental no sistema de tração. Este é responsável por fazer a conversão da energia elétrica em mecânica que, através da ligação a um eixo, movimenta o veículo.

À partida, qualquer motor elétrico pode ser utilizado para esta conversão, desde que se faça um controlo do binário e velocidade do eixo.

Os requisitos que um motor deve cumprir para ser possível instalar num veículo elétrico são:

- Alta densidade de binário e de potência;
- Elevado binário de arranque, em baixas velocidades e em subidas, com elevadas potências nas altas velocidades do veículo;
- Faixa de aceleração, operando com potência constante, até 3 a 4 vezes a velocidade nominal;
- Maior eficiência ao longo do movimento do binário e da velocidade, incluindo operação com binário baixo;
- Capacidade de sobrecarga intermitente, tipicamente o dobro do binário nominal, com curta duração;
- Alta robustez e fiabilidade, apropriadas ao ambiente do veículo;

- Custo aceitável.

Vamos agora apresentar as características dos diversos tipos de motores usados em veículos elétricos, apontando as suas vantagens e desvantagens.

Motores de Corrente Contínua (C.C.)

O motor de corrente contínua ou motor DC, figura 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.

Estes motores são mais utilizados quando desejamos um controlo da velocidade, fazendo variar a tensão fornecida aos terminais. Para tal, basta uma eletrónica muito simples.

Os motores de corrente contínua podem apresentar-se em quatro configurações diferentes:

- Motor com excitação independente;
- Motor CC em derivação (shunt);
- Motor CC série;
- Motor CC composto.

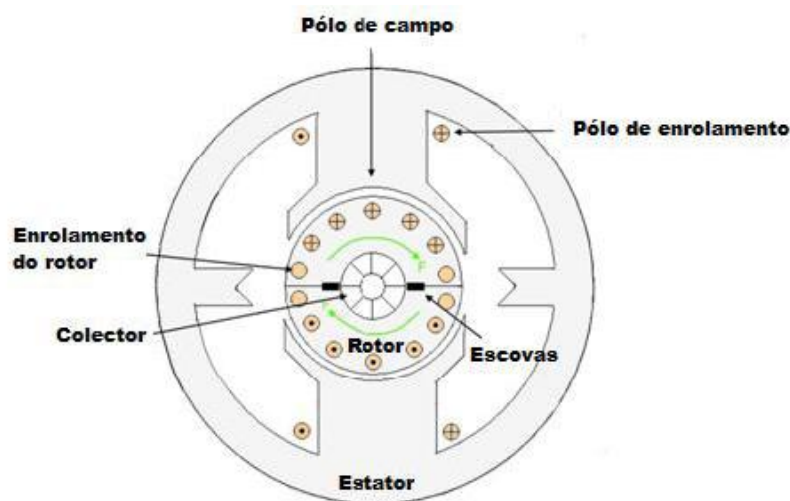


Figura 12 - Constituição do motor de corrente contínua [13]

A corrente elétrica é fornecida ao enrolamento do rotor por uma fonte de corrente contínua, aplicada através de escovas a um coletor, sendo a rotação originada pela interação entre o campo elétrico do rotor e o campo magnético existente entre os pólos norte e sul do estator. Para manter esta interação e a direção 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, ligando os enrolamentos do rotor ao coletor, de modo a que as escovas entrem alternadamente em contacto com as extremidades opostas dos enrolamentos do rotor, em cada 180° da rotação [13].

Apesar da característica binário-velocidade do motor de corrente contínua cumprir as exigências de tração elétrica, figura 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 coletor utilizado [14].

Os recentes desenvolvimentos da eletrónica 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 eletrónica de potência, os motores de corrente alternada são utilizados para potências elevadas, sendo os motores de corrente contínua, uma alternativa para potências mais baixas [14].

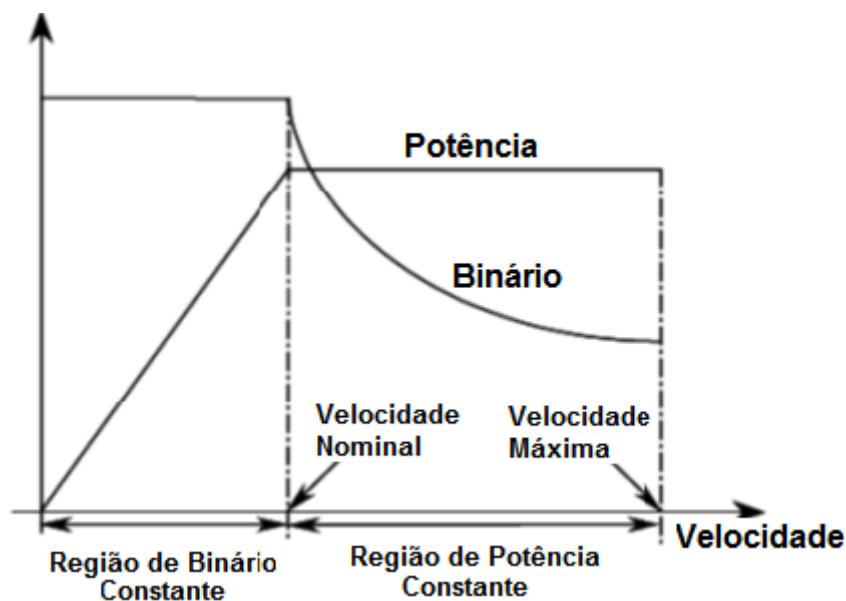


Figura 13 - Curvas características do motor DC [14]

Motor com excitação independente

Esta configuração exige que se disponha de duas fontes de corrente contínua, uma para o campo e outra para a armadura.

Permite um controlo eficaz da velocidade do motor, uma vez que esta depende da tensão induzida na armadura (força contra eletromotriz) e do fluxo no enrolamento do campo. Com esta configuração, é possível controlar esses dois parâmetros separadamente.

Motor CC em derivação (shunt)

Apresenta os enrolamentos do campo e da armadura com ligação em paralelo. Tem curva de velocidade parecida com o motor CC com excitação independente.

É utilizado em aplicações que exijam um bom controlo da velocidade e necessita apenas de uma fonte CC.

Motor CC série

Os enrolamentos da armadura e do campo são ligados em série, o que faz com que ambos compartilhem a mesma corrente elétrica.

O binário é proporcional ao quadrado da corrente e a sua velocidade tem uma curva inversamente proporcional à corrente.

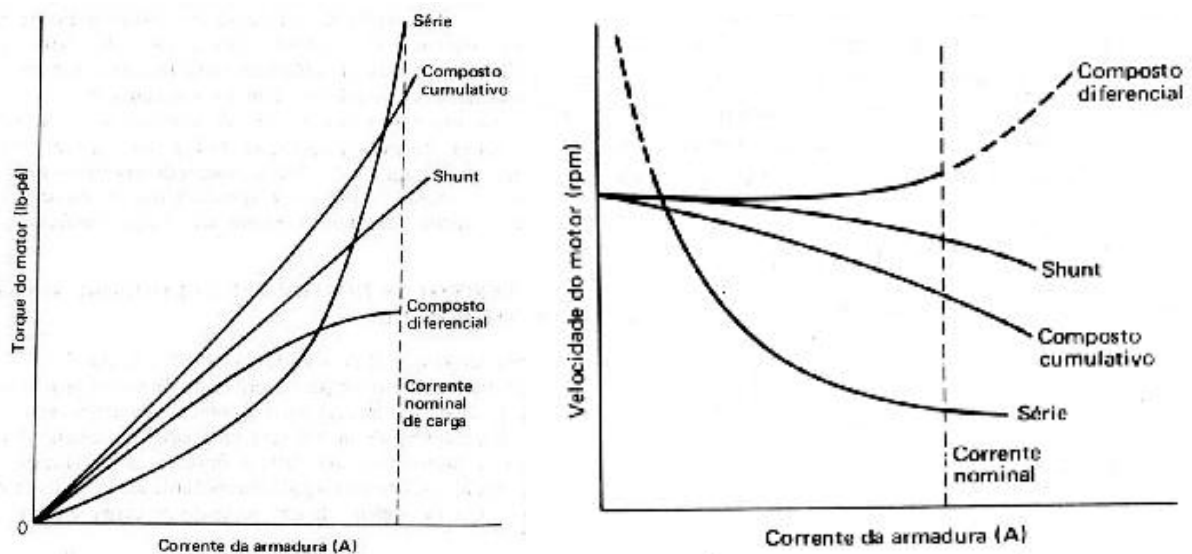
Motor CC composto

Neste motor o enrolamento de campo é dividido e uma parte é ligada em série e a outra em paralelo com a armadura.

Este motor combina características dos motores série e em derivação, podendo ter duas configurações, quanto ao fluxo do enrolamento do campo:

- Cumulativo;
- Diferencial.

Dos motores de corrente contínua com escovas, este é o mais apropriado para aplicação em veículos elétricos, devido ao binário elevado do motor série e o controlo da velocidade do motor shunt como podemos observar na figura.



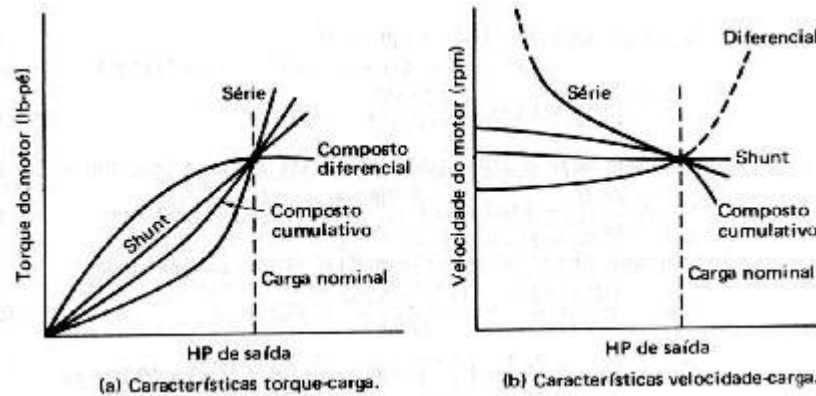


Figura 14 – Características dos motores de corrente contínua

Motor de indução

De todos os tipos, o motor de indução, particularmente o que tem rotor em gaiola de esquilo, é o mais usado na indústria.

Estas máquinas são bastante económicas, robustas, fiáveis e disponíveis no mercado numa vasta faixa de potências, desde frações de horsepower's (HP) até alguns megawatts (MW). As máquinas de baixa potência, frações de HP, são monofásicas, mas para aplicações de velocidade variável, as trifásicas são mais usuais.

A máquina de indução assíncrona é constituída por um estator, que contém o enrolamento da armadura, constituído por bobinas distribuídas uniformemente de acordo com o número de polos e de fases, e de um rotor que pode ser de dois tipos:

- Gaiola de esquilo;
- Rotor bobinado.

O bom desempenho dinâmico pode ser conseguido se forem aplicados o controlo vetorial ou controle de binário direto. Para os motores de indução convencionais, a faixa de potência constante estende-se tipicamente até 2 a 3 vezes a velocidade nominal. Entretanto, para máquinas da tração, isto pode ser estendido até 4 a 5 vezes a velocidade nominal.

Com um inversor a alimentar a máquina, pode conseguir-se um elevado binário e baixa corrente de arranque, desde que a tensão e a frequência da fonte sejam variadas.

Assim, comparado com as máquinas projetadas para alimentação com frequência constante, determinadas limitações de operação são removidas.

Pela escolha apropriada da tensão e frequência da fonte, o binário de arranque pode ser quase tão elevado quanto o binário máximo, enquanto uma elevada eficiência pode ser conseguida pelo controle do escorregamento.

O motor de indução, figura 15, desenvolve binário pela interação do campo magnético radial produzido pela corrente nos enrolamentos do estator, e a corrente no rotor induzida por indução eletromagnética entre os enrolamentos do estator e do rotor [15].

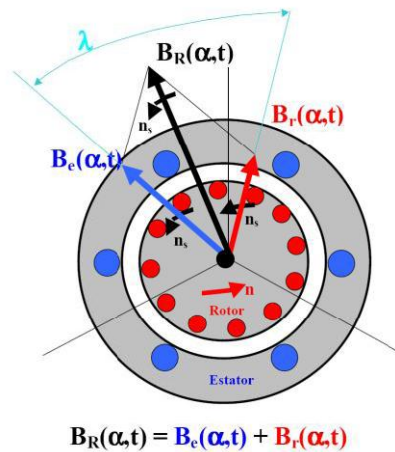


Figura 15 - Diagrama vetorial do motor de indução [15]

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” [13]

Aplicando uma tensão trifásica aos enrolamentos do estator, gera-se um campo magnético girante que induz uma força eletromotriz 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 [13].

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 elétricos, onde a velocidade do veículo é controlada através da frequência da tensão trifásica aplicada [13].

O motor de indução é muito utilizado em veículos elétricos, 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 [13].

Na figura 16 representam-se diversas características do motor de indução, em função da velocidade, procedendo a uma variação na frequência de alimentação.

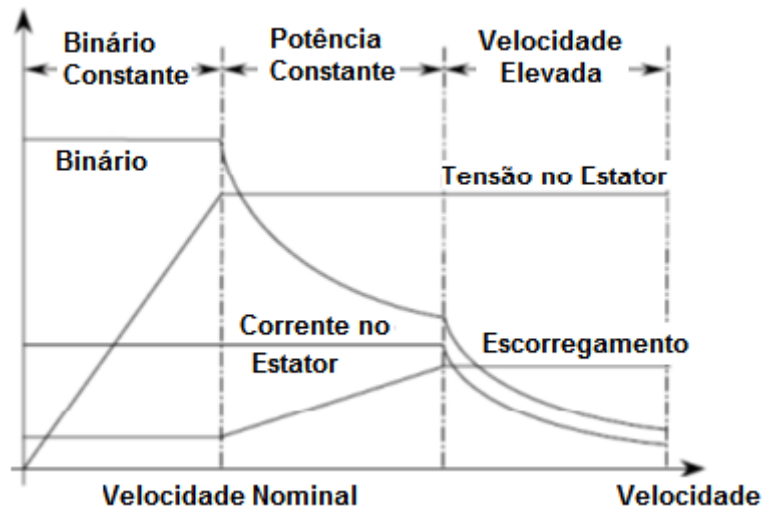


Figura 16 - Características do Motor de Indução [14]

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

A extensão da gama de velocidade com potência constante para além da velocidade nominal é acompanhada de atenuação de fluxo, visto não ser possível aumentar a tensão de alimentação para além do seu valor nominal. Contudo, a existência de um declínio do binário limita a extensão da gama de potência constante, sendo atingido o binário mínimo para a velocidade crítica [14].

O motor de indução possui como desvantagens perdas elevadas devido à utilização de enrolamentos no estator, reduzido o fator de potência e o fator de utilização do inversor, sendo estas mais críticas para velocidades elevadas [16, 17].

Com a atualíssima 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 elétrico de indução, que substituirá o magnético atualmente utilizado no Prius” - Automotor 2011-01-14

Devido à dependência de minerais raros a Toyota encontra-se recentemente a desenvolver uma nova tecnologia para os motores de indução. A possível quebra no fornecimento de Dispósio e Neodímio, utilizados no fabrico de motores elétricos de ímanes permanentes, que alimentam a quase totalidade de motores elétricos dos grandes fabricantes, está diretamente 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.

Motores de C.C. Íman Permanentes sem escovas

Os motores CC com íman permanente sem escovas, são os mais adequados para competir com os motores de indução para a propulsão de veículos elétricos híbridos.

Estes motores têm algumas vantagens:

- O peso e o volume totais são reduzidos significativamente para uma dada potência de saída (densidade de potência elevada);
- Têm uma eficiência mais elevada;
- O calor é dissipado eficientemente para o exterior.

Entretanto, estes motores têm uma região curta de potência constante devido à sua característica limitada de enfraquecimento do campo, resultando do facto de o campo magnético ser produzido por um íman permanente (o valor fixo do fluxo magnético limita o prolongamento da faixa de velocidade).

Para aumentar a faixa da velocidade e melhorar a eficiência destes motores, o ângulo de condução do conversor de potência deve ser controlado acima da velocidade nominal.

Nestes motores, um enrolamento de campo adicional pode ser usado de tal maneira que o campo do entre ferro pode ser enfraquecido durante a operação a altas velocidades com potência constante controlando o sentido e valor da corrente do campo CC, estes são chamados de híbridos.

No entanto, numa faixa de velocidades muito altas, a eficiência pode cair por causa do risco de desmagnetização dos ímanes. Dependendo do arranjo do íman, basicamente, eles podem ser classificados como:

- Íman na superfície do rotor;
- Íman embutido no rotor (mais robusto).

Os projetos com ímanes na superfície podem usar poucos ímanes, enquanto os projetos com ímanes embutidos podem conseguir uma densidade mais elevada do fluxo do entre ferro.

Uma outra configuração é o motor híbrido de íman permanente, onde o campo magnético do entre ferro é obtido com a combinação do íman permanente com o enrolamento de campo.

Motor síncrono trifásico com ímanes permanentes

Motores CA (corrente alternada) com ímanes permanentes no rotor, são máquinas elétricas síncronas polifásicas, muito semelhantes às máquinas síncronas convencionais.

Neste tipo de motores não há enrolamentos de campo, que são substituídos por ímanes permanentes. Não possuem escovas ou fontes de tensão contínua, reduzindo com isto as manutenções, aumentando o rendimento e com melhor relação binário/volume.

A utilização do uso de ímanes permanentes do tipo cerâmicos, em detrimento dos usados nas máquinas elétricas convencionais, tem aumentado consideravelmente. No entanto, houve um desenvolvimento mais importante, que se deu a partir da utilização de novos

materiais magnéticos, como os ímanes de terras raras, ou mais conhecidos por "super ímanes".

Estes possuem uma elevada produção energética superior aos magnéticos de materiais cerâmicos. A utilização deste tipo de ímanes em novas configurações, resultou num alto rendimento

Motores de relutância

O motor de relutância comutado é considerado um tipo especial de motor síncrono, sendo a sua operação dependente da disponibilidade de elementos de eletrónica 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 ligados 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 [13].

Uma configuração típica deste motor encontra-se na figura 17, existindo diversas combinações de pólos do estator e do rotor.

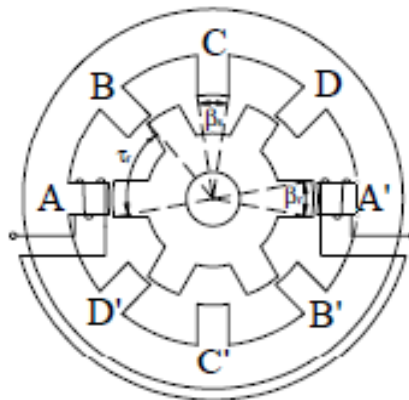


Figura 17 - Motor de relutância comutado, com 8 pólos no estator e 6 pólos no rotor [18]

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 direção 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 [13].

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 elétricos, figura 18, possuindo uma gama de potência constante relativamente alargada [12].

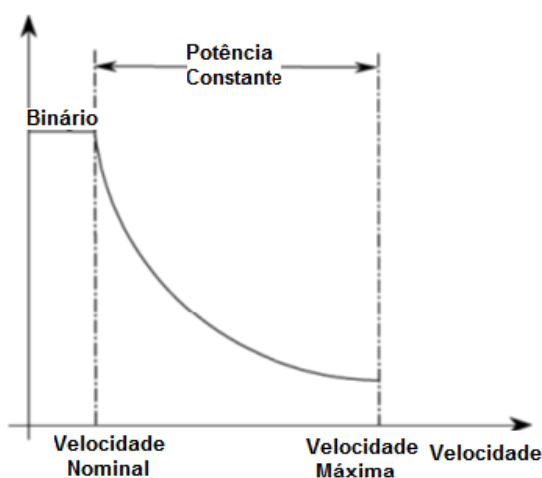


Figura 18 - Característica binário-velocidade do motor de relutância comutado [19]

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 [13].

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 [9].

Os motores de relutância variável (MRV) são talvez os mais simples dos motores. Embora a sua construção seja simples, este tipo de motor não pode ser simplesmente alimentado com a tensão da rede.

É necessário o controlo dos pulsos aplicados, em função da posição do rotor, pois só há produção de binário na região onde há variação de relutância. Assim, as indutâncias variam com a posição do rotor.

Os MRV funcionam com um controlador eletrónico que através de sensores de posição determina em que instante deverá ser aplicado o pulso de corrente de modo que produza o binário necessário à movimentação do rotor.

Sistemas de acionamentos dos MRVs são projetados para atender a critérios tais como:

- baixo custo,
- binário constante,
- gama de velocidade desejada,
- alto rendimento,
- alta densidade de binário,

dos motores elétricos, bem como em outras características difíceis de comparar com as máquinas ditas convencionais.

Os ímanes dos MRV possuem as seguintes características:

- Diminuem sensivelmente os riscos de desmagnetização, além de possibilitar o desenvolvimento de máquinas com elevada relação binário /volume. Esta relação é obtida em máquinas síncronas com ímanes permanentes;
- Têm um melhor rendimento, que as máquinas com enrolamento de campo, porque elas não têm nenhuma perda de excitação, uma vez que não possuem enrolamentos no motor. Exceção feita as máquinas que, além dos ímanes, possuem uma gaiola;
- Ocupam menos espaço que o campo com enrolamentos. Para tamanhos de armadura pequenos esta vantagem é significativa e o custo reduzido. Quando os ímanes cerâmicos (ferritas) são usados, o custo destes motores tende a ser bastante competitivo.

Comparação entre os diferentes tipos de motores elétricos

O motor de indução é o motor mais adaptado para propulsão de veículos elétricos urbanos. Esta solução é consensual, como ilustrado pela Tabela 2, e baseado nas características principais da propulsão elétrica de veículos elétricos, numa escala de 0 a 5.

Tabela 2 - Comparação entre os motores para VE

Características/ Propulsão	Motor CC	Motor de Indução	Motor CC com íman permanente	Motor síncrono trifásico com íman permanente	Motor de relutância variável
Densidade de potência	2,5	3,5	5	5	3,5
Eficiência	2,5	3,5	5	5	3,5
Controlo	5	5	4	5	3
Confiabilidade	3	5	4	4	5
Maturidade tecnológica	5	5	4	4	4
Custo	4	5	3	5	4
Total	22	27	25	28	23

No entanto, e após uma pesquisa mais aprofundada, verificou-se que o motor síncrono trifásico com ímanes permanentes seria a melhor escolha, face ao motor de indução, por apresentar melhores características e por ser melhor que o anterior concorrente, o motor CC com íman permanente.

2.5 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 elétricos acima mencionados, sendo esta exposição baseada na referência [21].

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

- AC-AC;
- AC-DC (retificador);
- DC-AC (inversor);
- DC-DC (chopper)

Estando perante um projeto de um veículo elétrico 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 projeto.

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.

Os conversores DC-DC de quatro quadrantes, figura 19, são empregados para o controlo de velocidade reversível e regeneração dos motores DC (figura 20 e Tabela 3).

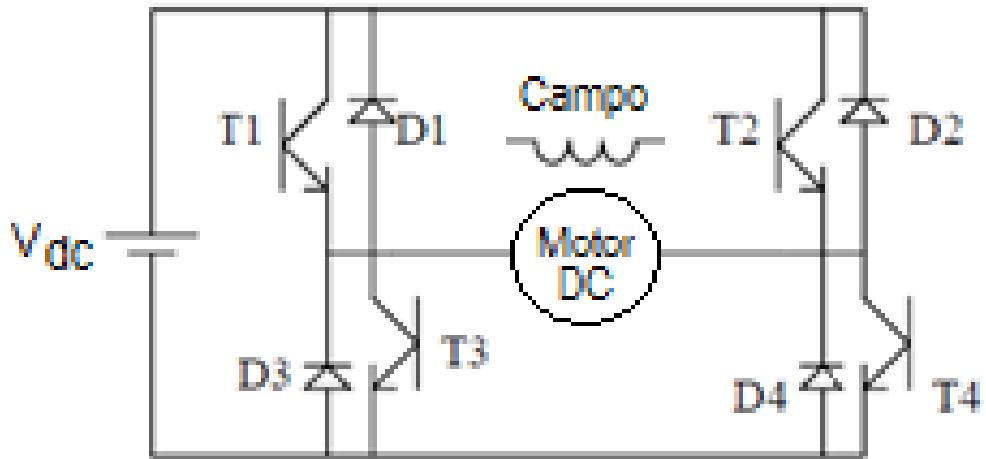


Figura 19 - Conversor de potência em Ponte completa

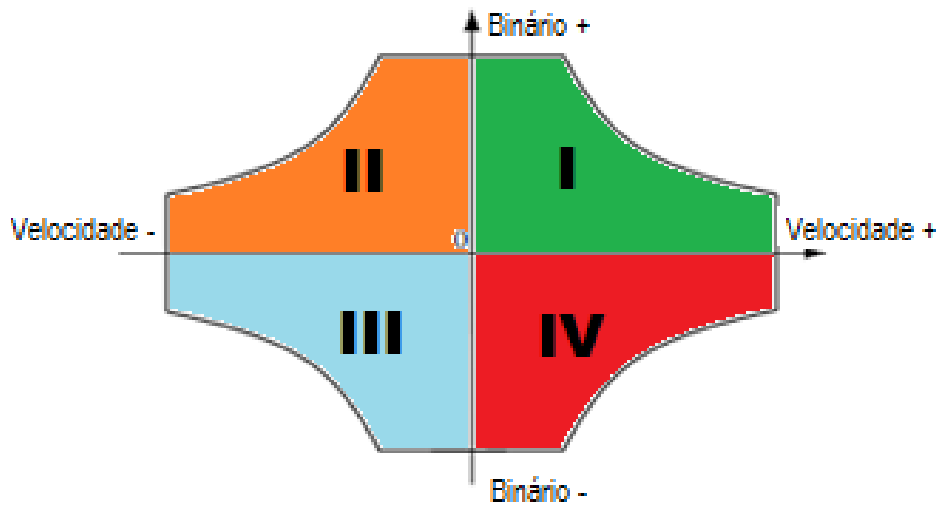


Figura 20 - Característica Binário-Velocidade do conversor de potência em ponte completa

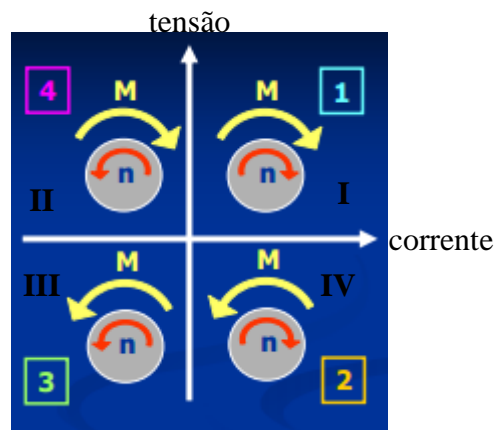


Figura 21 - Característica tensão-corrente do conversor de potência em ponte completa

Tabela 3 - Características do conversor de potência em ponte completa

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

Os inversores são geralmente do tipo alimentado em tensão e do tipo 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 utilizados para propulsão elétrica. Na verdade, inversores alimentados com tensão são usados quase que exclusivamente, porque eles são muito simples e podem ter fluxo de potência em qualquer direção. O típico conversor trifásico em ponte completa está apresentado na figura 22.

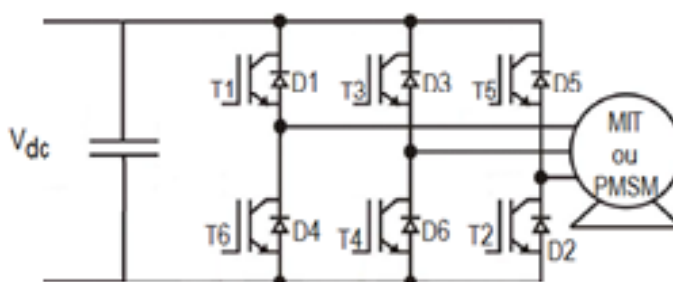


Figura 22 - Conversor de potência em ponte trifásica – inversor

Na figura 22 está representado um conversor alimentado por um barramento DC, em ponte completa trifásica com Insulated-gate bipolar transistor (IGBT), 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 ligado mais um braço à ponte, ou seja mais dois transístores a comutar.

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

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

O uso do controle de corrente para o inversor alimentado em tensão é particularmente atrativo para acionamentos de motores de alto desempenho, pois o binário do motor e o fluxo estão diretamente relacionados com a corrente controlada. O estado de arte dos atuais sistemas de PWM controlado são a banda de histerese, o controle de corrente instantânea com PWM de tensão e PWM por espaço vetorial

2.6 Baterias

Tanto nos veículos híbridos como nos elétricos uns dos componentes mais importantes são sem dúvida as baterias elétricas. E como tal são também o componente que mais influencia o projeto, concepção, fiabilidade e comercialização dos mesmos. Posto isto torna-se essencial dar especial atenção no estudo teórico das baterias.

As baterias são compostas por células ligadas entre si em que a energia química é convertida em energia elétrica e vice-versa. Os níveis de tensão e de carga desejados numa bateria são conseguidos ligando um certo número de células em serie e em paralelo respetivamente. Como vimos no capítulo anterior, as baterias são classificadas em termos da capacidade energética e potência.

Para a maioria dos tipo de baterias, a potência e a energia que estas são capazes de fornecer não são independentes uma da outra e por isso, durante o projeto das baterias, são fixados os valores que se quer atingir para estas grandezas. Como também foi visto existem outras características que influenciam a escolha do tipo de bateria, tais como o ciclo de vida, a temperatura de funcionamento e a profundidade de descarga.

Com o desenvolvimento que tem existido nesta área, diferentes tipos de baterias têm sido desenvolvidos apesar de ser uma área da tecnologia que não é bem entendida, leva-nos a acreditar que muito vai mudar nos tempos vindouros.

Tipo de baterias mais usadas em veículos elétricos e híbridos

Os principais tipos de baterias usados neste tipo de veículos são [23] (Husain 2005):

- Acido-chumbo (Pb - acid);
- Nickel-cadmium (NiCd);
- Nickel hidreto metálico (NiMH);
- Iões de lithium (Li-ion);
- Lithium polímeros (Li-poly);

- Sulfureto de sódio (NaS);
- Ar-Zinco (Zn-Air).

Na figura 23 é possível observar algumas características de várias tecnologias de baterias.

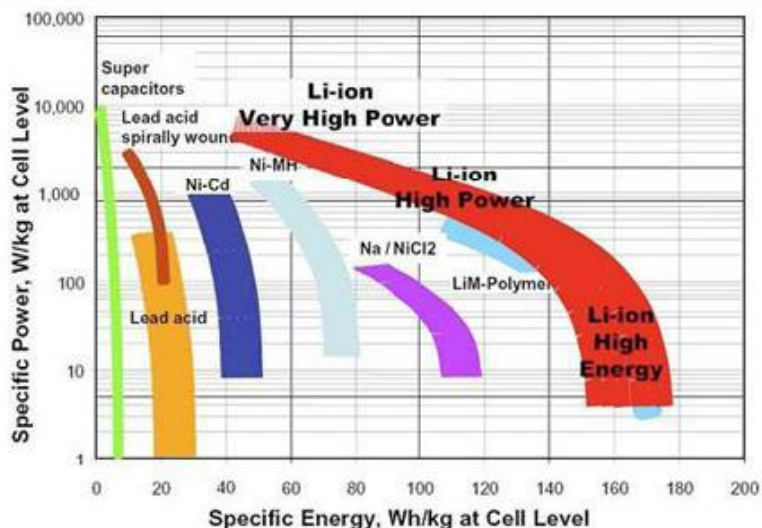


Figura 23 - Características de várias tecnologias de baterias [30]

Dentro das acima referidas daremos mais ênfase às baterias de ácido-chumbo, Nickel-cadmium, Nickel hidreto metálico e Iões de lítio, devido às suas destacadas posições em termos de utilização e perspectivas de evolução.

A bateria Ácido de chumbo (Pb-ácido)

Baterias de descarga profunda: A maioria dos veículos elétricos ainda hoje está equipada com baterias de ciclo profundo. Este tipo de baterias são projetadas para terem uma vida útil de 400 a 800 ciclos [22].

Baterias "horizon": são as baterias usadas no Austin TX, um carro que a Austin está a testar e que tem a capacidade de fazer 177 km sem carregamento.

Estas são baterias com um fabrico especial que foi patenteado pela "ELECTROSOUCE". É uma bateria com maior capacidade, ciclos de vida mais longos de descarga profunda sem degeneração e de recarga rápida e alta energia específica [22].

Os pontos fortes gerais destas baterias são [23]:

- Custo relativamente baixo;
- Matérias-primas de fácil acesso (chumbo, enxofre);
- Facilidade de fabricação;

- Características eletromecânicas favoráveis;

Os pontos fracos são:

- Baixa densidade energética;
- Ciclo de vida reduzido.

Nickel-cadmium (NiCd)

Este tipo de baterias já é usado por empresas da indústria automóvel da Europa e do Japão. São mais caras do que as baterias de chumbo, mas têm uma maior densidade energética e um ciclo de vida de 1000 cargas.

São um tipo de baterias que podem ser carregadas rapidamente mas que para isso é necessário ter alguns cuidados pois tem tendência a aquecer [22].

O cádmio é altamente tóxico, por isso este é um elemento que tem de ser manejado com muito cuidado. A reciclagem de cádmio é possível, mas perigosa.

Os pontos fortes desta bateria são:

- Maior densidade energética que a bateria de Pb-acid ;
- Maior número de ciclo de vida;
- O cádmio é passível de reciclagem.

Pontos fracos:

- Tendência a sobreaquecer quando submetida a carga rápida;
- Preço elevado;
- Cádmio é altamente tóxico.

Nickel hidreto metálico (NiMH)

Esta bateria é constituída por materiais recicláveis e não tóxicos. Tem uma vida útil esperada igual ao dobro da vida útil da bateria de chumbo-acido. É um tipo de bateria livre de manutenção, pode ser carregada rapidamente e suporta sub e sobrecarga sem perigo de sobreaquecimento ou explosão [22].

Os pontos fortes desta bateria são:

- Maior densidade energética Pb-acid;
- Maior numero de ciclo de vida quando comparada com Pb-acid;

- Reciclável;
- Materiais não tóxicos;
- Uso mais seguro;
- Rápida recarga.

Pontos fracos:

- Ciclos de vida de menor número quando comparada com a bateria NiCd ;
- Preço elevado em relação à Pb-acid.

Iões de Lítio (Li-ion)

Estas baterias são as baterias usadas nos aparelhos portáteis usados hoje em dia, como os computadores portáteis e os telemóveis, e estão a ser agora usadas por alguns construtores de automóveis, como a Nissan e a Tesla.

São baterias com efeito de memória baixo, alta energia específica (100 Wh/kg) e alta densidade de potência (300W/Kg).

A vida útil espera-se que seja superior a 1000 ciclos.

Cada célula desta bateria tem uma tensão nominal de 2,5 a 4,5 V durante o carregamento e descarregamento, respetivamente.

Estas baterias necessitam de um controlo complexo de operação de cada célula e de um sistema eficaz de arrefecimento, com o perigo de explosão na falha destes, sendo que são baterias de custo muito elevado.

Os pontos fortes desta bateria são:

- Maior densidade energética;
- Maior numero de ciclo de vida quando comparada com Pb-acid;
- Maior densidade de potência;
- Maior energia específica;
- Operam em ampla faixa de temperaturas.

Pontos fracos:

- Preço elevado (relativamente aos outros tipos de baterias pode custar 2 e 3 vezes mais);
- Altamente instáveis;
- Sistema de controlo complexo;
- Necessidade de sistema auxiliar de refrigeração;

2.7 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 eletroquímicos (ou de dupla-camada), que conseguem aliar o pouco volume com densidades de energia e capacidades bastante mais elevadas que os condensadores usuais.

Atualmente, 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 elétrica, como fonte de armazenamento de energia auxiliar ou como buffers de energia elétrica ao absorverem os picos de carga existentes no sistema e, como resultado, alongam o tempo de vida das baterias, devido à menor utilização destas [24].

2.8 Pilhas de Combustível (Full-Cell)

Ao contrário das baterias, a pilha de combustível é um aparelho eletroquímico 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 reação da pilha de combustível é apenas água [9].

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 selecionadas, o desempenho dos veículos pode ser bastante melhorado [12].

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

2.9 Estratégias de Controle

As estratégias de controle utilizadas nos controladores eletrônicos serão aprofundadas nesta seção visto terem a função de efetuar o comando dos semicondutores (drives) utilizados nos conversores de potência. Têm a função de controlar as grandezas inerentes à tração elétrica (velocidade e binário) através da corrente e da tensão aplicada ao motor, bem como das componentes eletromagnéticas nele produzidas.

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

Os motores de indução podem ser controlados através de métodos de controle escalar e métodos de controle 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 eletrônica de potência, apresentando um fraco desempenho dinâmico. Assim sendo não serão sujeitos a estudo.

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

O controle 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 reação à variação de velocidade garantindo uma produção máxima de binário com um menor número de ondulações.

No controle por orientação de campo, é importante o conhecimento da posição do fluxo ligado no rotor. Assim, este método de controle nos motores de indução pode ser classificado como direto ou indireto, dependendo do método de obtenção da referida posição do fluxo ligado no rotor. O controle direto 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 diretamente o binário, permitindo respostas rápidas, embora mais lentas do que as verificadas no controle por orientação de campo.

Controle direto por orientação de campo

No controle direto, a posição do fluxo do rotor é medida diretamente 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 diretamente 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 direta e de quadratura, no referencial dq, através das equações (2.1) e (2.2), respetivamente.

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

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

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

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

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

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

O diagrama de bloco da figura 24, ilustra o princípio do controlo direto por orientação do campo.

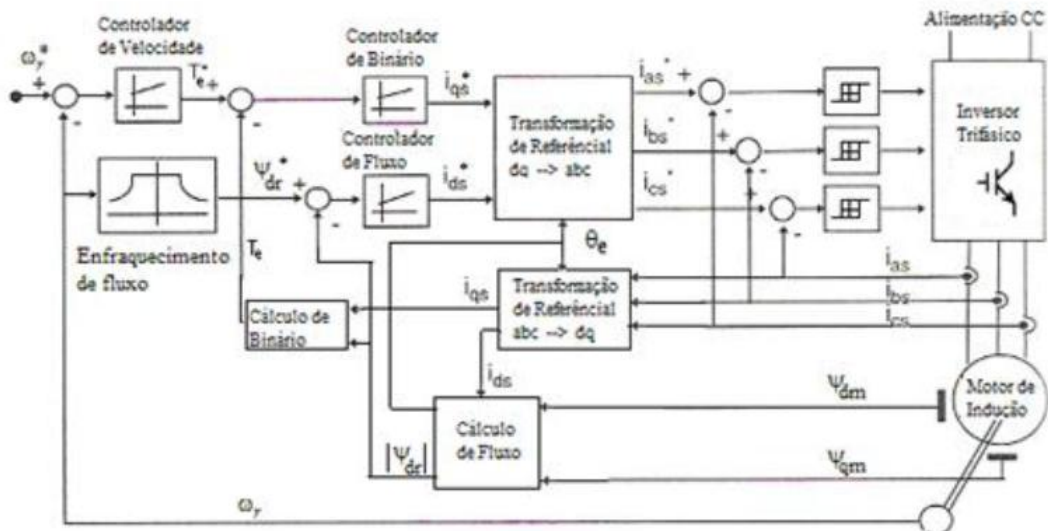


Figura 24 - Diagrama de blocos do controlo direto por orientação de campo [25]

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

Nas malhas de binário e fluxo, o erro verificado entre as referências e os valores medidos destas grandezas, aplicado respetivamente aos controladores de binário e fluxo, permite obter as componentes de corrente no referencial dq, i_{ds}^* e i_{qs}^* , 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 injetadas no estator da máquina, o comportamento dinâmico destas pode ser desprezado.

Apesar do método de controlo direto 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 [20].

Controlo indireto por orientação de campo

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

Observando a figura 25, considera-se o vetor de fluxo alinhado com o eixo direto no referencial dq, rodando à velocidade de sincronismo ω_e , e com um ângulo θ_{sl} de avanço relativamente a um referencial fixo ao rotor. Correspondendo o ângulo θ_{sl} à velocidade do campo girante do estator em relação ao rotor ω_{sl} , a posição θ_e do fluxo rotórico é dada pela integração da soma desta última com a velocidade elétrica de rotação, equação (2.5).

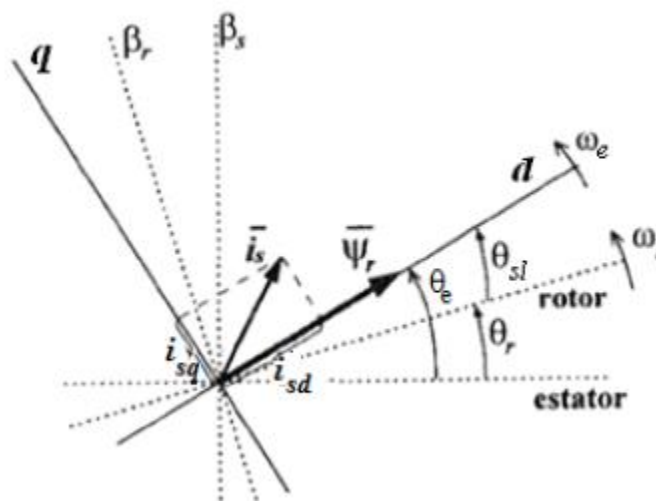


Figura 25 - Referencial do fluxo rotórico [25]

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

O diagrama de bloco da figura 26, ilustra o princípio do controlo indireto por orientação do campo.

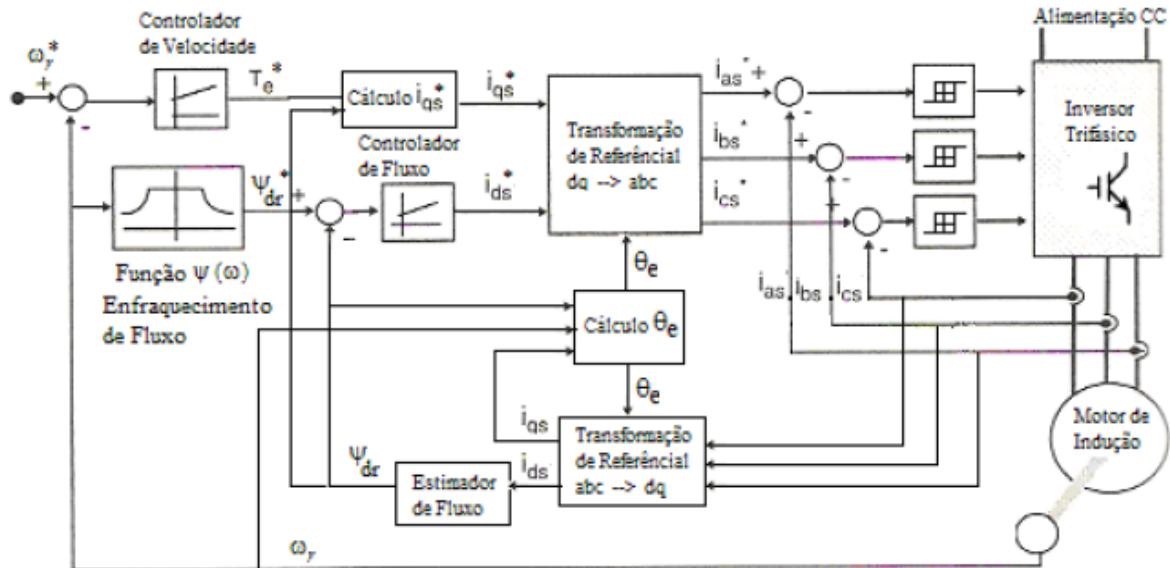


Figura 26 - Diagrama de blocos do controlo indireto por orientação de campo [25]

Como no método direto, o controlador de velocidade gera um valor de binário de referência proporcional ao erro verificado entre a referência e o valor medido da velocidade elétrica de rotação, produzindo a função de enfracimento de fluxo numa referência de fluxo em função da velocidade elétrica de rotação. Obtido o valor de referência de binário eletromagnético 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 eletromagnético e o controlo do fluxo magnético.

Identicamente ao que se verifica no método de controlo direto, 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 [25].

Nos motores Síncronos de Ímanes Permanentes para implementar o controlo por orientação de campo é necessário adquirir uma informação da posição do rotor, a qual usualmente é obtida através de sensores de elevada resolução tais como encoders ou resolvers. Estes sensores para além de serem bastante dispendiosos, podem deslocar-se

conduzindo a uma posição errada do rotor. Uma das soluções possíveis é a utilização de métodos de controlo sem qualquer sensorização da posição do rotor o que conduz à implementação de algoritmos complexos de estimação da posição e da velocidade. Estes métodos além da sua complexidade e elevada carga computacional também possuem alguns problemas na detecção da posição inicial no momento de arranque do motor e no funcionamento a baixas velocidades, uma vez que utilizam algoritmos que estimam as forças contra eletromotrizes 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 elétrica. Usualmente são utilizados três sensores que permitem obter uma informação da posição do rotor com uma resolução de 60 graus elétricos. 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°, as forças contra eletromotrizes 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° entre os dois campos magnéticos.

Quando existe um desfasamento de 90° entre os dois campos magnéticos, então $\delta=90^\circ$ o que permite obter um binário máximo de acordo com a equação (2.6) e com o fasor da figura 27.

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

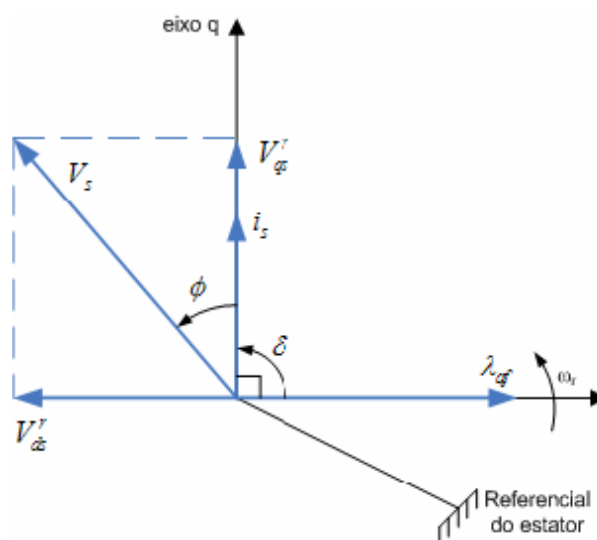


Figura 27 - Diagrama fasorial com $\delta=90^\circ$ [21]

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 projeções anteriormente apresentadas é possível obter uma estrutura de controlo similar ao motor DC de excitação separada, sendo controlável independentemente o binário e o fluxo de magnetização produzidos uma vez que estes são diretamente proporcionais a I_q e I_d , respetivamente.

Na figura 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 ótimo de binário. Uma vez que se trata de um sistema equilibrado, o somatório das correntes é nulo o que possibilita o calculo de uma das correntes através das outras duas, eliminando assim a necessidade de medir três correntes. A partir das correntes medidas é obtido o vetor 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.

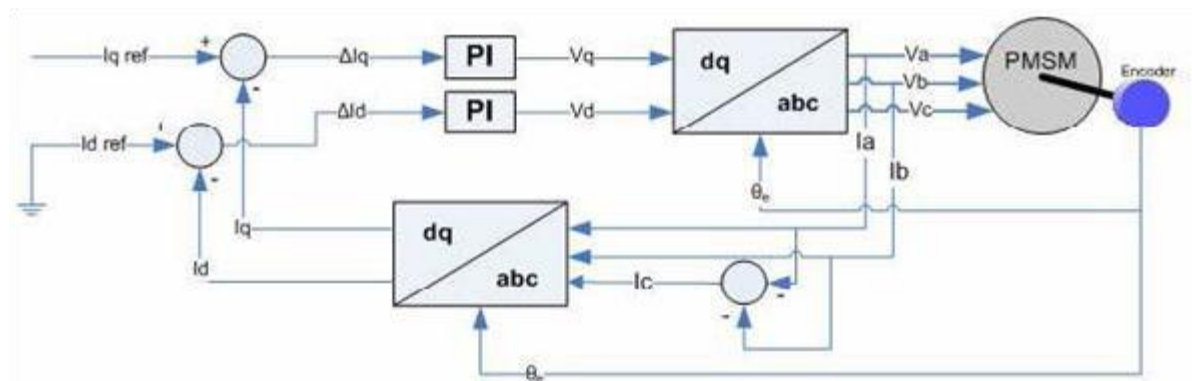


Figura 28 - Diagrama de blocos do controlo vetorial com encoder [21]

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 eletrónico de potência é ideal, ou seja que as tensões geradas pelo controlador são diretamente aplicadas ao motor.

Space Vector Modulation

A técnica Space Vector Modulation (SVM) tornou-se a mais popular e importante técnica de PWM pois permite comandar inversores trifásicos de tensão aplicados no controlo de motores de Indução AC, motores Brushless DC, motores de Relutância e motores Síncronos de Ímanes Permanentes. É uma técnica que permite aplicação de níveis de tensão mais elevados ao motor e menor distorção harmónica [21].

Esta técnica baseia-se na representação vetorial do inversor e realiza a transformação de tensões no plano $\alpha\beta$ diretamente em sinais de PWM. As principais vantagens inerentes a este método são: a tensão de saída é 15% maior do que nos métodos de modulação usuais permitindo um uso mais eficiente da fonte de tensão de alimentação DC, maior eficiência, o número de comutações dos semicondutores é cerca de 30% menor do que utilizando o método convencional Sinusoidal Pulse Width Modulation [21].

Considerando que o estado de cada braço do inversor é representado pelo estado da variável S_x ($S_x=1$ se o semicondutor superior estiver fechado e o inferior estiver aberto e vice-versa para $S_x=0$) e que o inversor tem três braços de acordo com a figura 29, o inversor pode assumir oito estados diferentes.

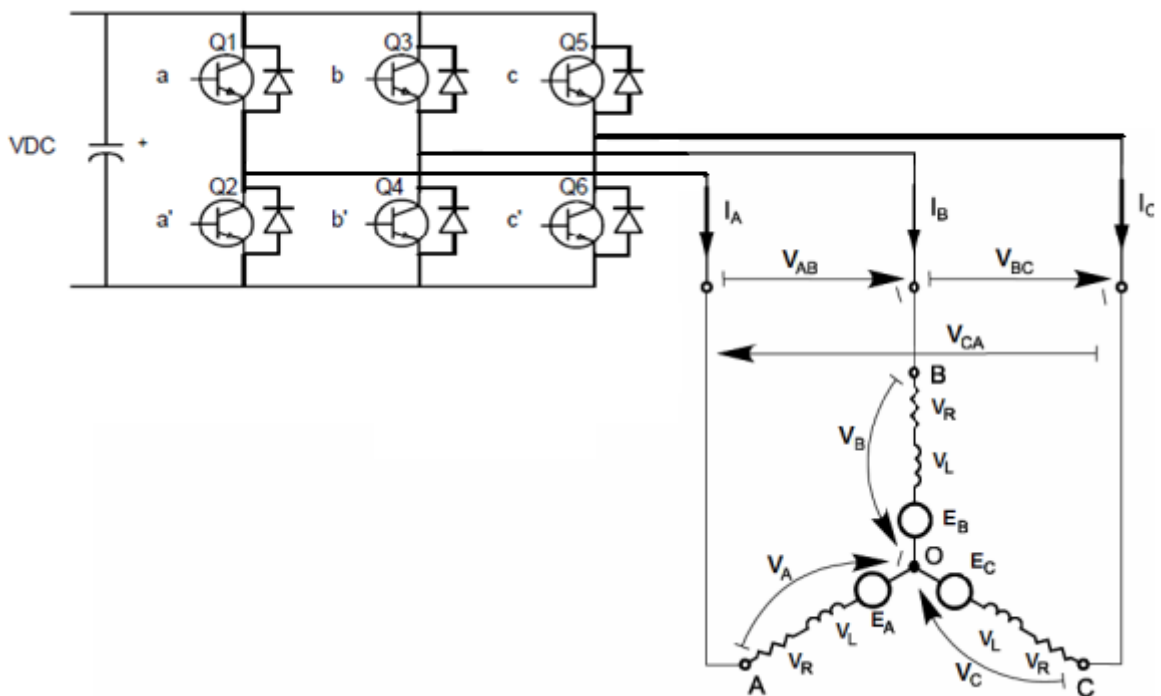


Figura 29 - Esquema do inversor trifásico

Na Tabela 4 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 vetor de tensão do referencial rotacional do estator (V_d e V_q) em componentes no referencial estacionário do estator (V_α e V_β). Através dos oito estados diferentes do inversor, é possível criar oito vetores (sendo dois deles vetores nulos), chamados switching state vectors (SSVs), que dividem o plano $\alpha\beta$ em seis sectores. Assim, é possível representar qualquer vetor através da soma dos switching state vectors adjacentes [21].

Tabela 4 - SSVs e tensões de fases [20]

Sa	Sb	Sc	VAB	VBC	VCA	SSV
0	0	0	0	0	0	V000
1	0	0	VDC	0	-VDC	V0
1	1	0	0	VDC	-VDC	V60
0	1	0	-VDC	VDC	0	V120
0	1	1	-VDC	0	VDC	V240
0	0	1	0	-VDC	VDC	V300
1	0	1	VDC	-VDC	0	V360
1	1	1	0	0	0	V111

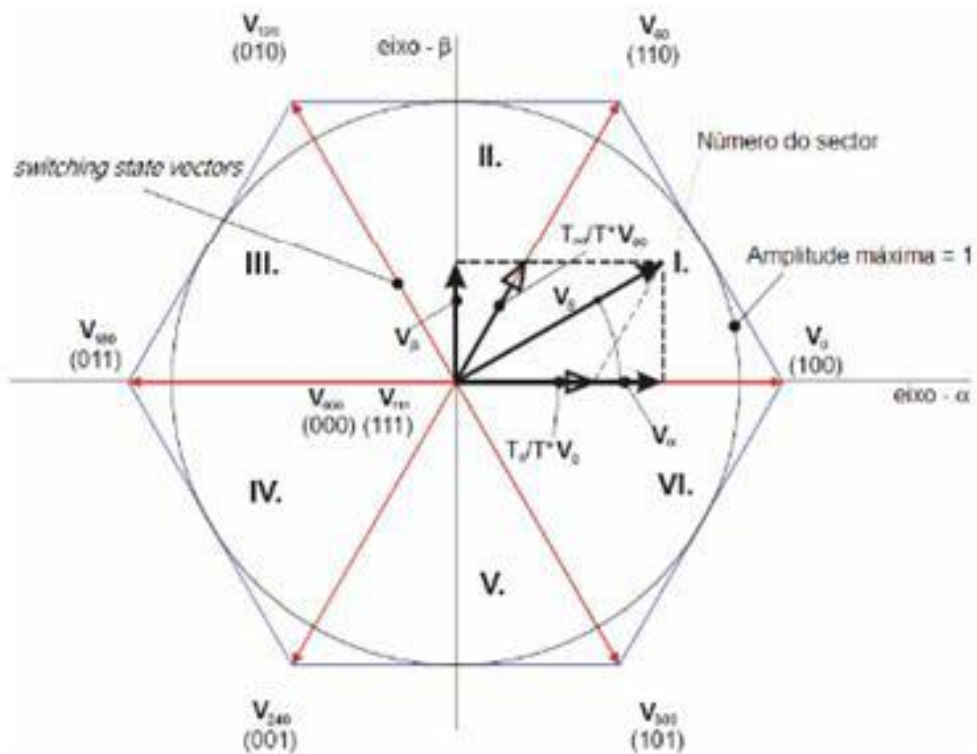


Figura 30 - Representação vetorial de um inversor de três braços [21]

A técnica SVM consiste basicamente em três etapas:

- Identificação do sector onde se encontra o vector VS;
- Decomposição do vetor VS 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 31 é apresentado o diagrama de blocos do controlador por orientação de campo de motores síncronos de ímãs permanentes com base em sensores de Hall.

Como é possível observar o bloco “Estimador de ω e θ_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 projeção das correntes I_a , I_b e I_c no referencial dq e a projeção de V_q e V_d no referencial $\alpha\beta$ realizada no interior do bloco SVM.

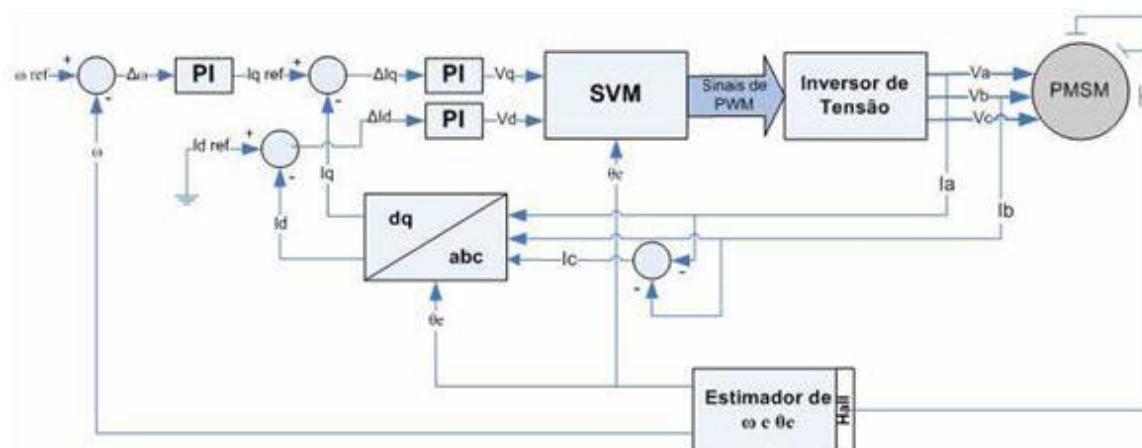


Figura 31 - Diagrama de blocos do Controlo por orientação de campo com base em sensores de Hall

2.10 Comparação dos Sistemas de Propulsão

Analisando comparativamente os sistemas de propulsão elétrica mencionados anteriormente, o motor de indução e o motor síncrono de ímãs permanentes são atualmente os sistemas de propulsão mais adequados a aplicações em veículos elétricos. Esta afirmação resulta dos três fatores determinantes para a seleção do conjunto motor controlador sendo eles o rendimento, o peso e o custo.

Na tabela 5 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 respetivo controlador, pode-se diferenciar o rendimento do motor, do controlador e do conjunto motor e controlador, tabela 5. 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 efetuar uma comparação com os restantes tipos de motores. O sistema de comparação apresentado para o peso é também utilizado para comparar o custo.

Tabela 5 - Comparação dos sistemas de propulsão [26]

	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 situa-se entre as áreas de alta eficiência de um PMSM e um SRM, figura 32.

Na verdade através da figura 32 é possível concluir que o PMSM consegue ter rendimentos superiores a baixas velocidades e com binários bastante elevados, performance importante na tração elétrica. Assim sendo, o PMSM consegue ter as melhores prestações relativamente aos restantes motores referenciados.

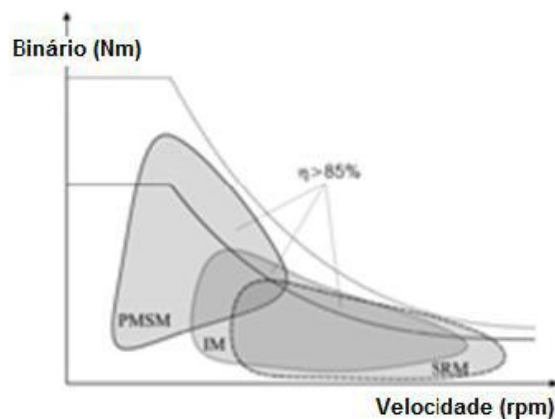


Figura 32 - Característica Binário-Velocidade comparativa dos vários tipos de motores

Capítulo 3 - Estudo do Projeto

Neste ponto serão apresentados os diversos componentes escolhidos e dimensionados para este projeto. Os dados apresentados encontram-se assentes para uma utilização em plano e inclinações máximas de 15% e para uma velocidade máxima em plano de 50 km/h e no plano inclinado de 30 km/h.

3.1 Escolha do motor elétrico

Com base na pesquisa e estudo teórico apresentado no Estado Arte, chegou-se á conclusão que o motor síncrono de ímanes permanentes seria a escolha mais adequada, tendo em conta as características pretendidas para a moto 4x4. No entanto, no mercado existem variadíssimos modelos deste tipo de motores e por isso surgiu a necessidade de especificar, através de cálculos numéricos, quais os requisitos mínimos (potência, binário) que este haveria de garantir para que a moto 4x4 funcionasse corretamente nas condições referidas anteriormente (terrenos planos e/ou inclinações até 15%).

Posto isto, o passo seguinte consistiu em calcular as potências e respetivos binários para diversas situações, incluindo para o pior caso

Com estes dados e algumas informações como redução no eixo traseiro de 3,692 e introduzindo uma redução de 2 na transmissão por correntes entre o motor e o veio, com diâmetro das rodas de 22” e peso aproximado da moto de 320 kg (retirando o motor de combustão, escape e filtro de ar e colocando o motor elétrico, baterias e controlador entre outros componentes e o condutor de 80 kg) chegou-se a alguns valores aceitáveis que estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Cálculos de desempenho da moto

Percentagem de inclinação: Angulo da inclinação:	15% 8,5 Graus
Velocidade máxima: Massa do veiculo: Coeficiente de atrito de rolamento: Outros coeficientes de atrito:	30 km/h 320 Kg 0,015 0,03
Potência requerida:	5,04 kW
Potência máxima do motor: Força desenvolvida: Aceleração:	6000 W 114,6 N 0,36 m/s ²
Tempo de aceleração até Vmax:	23,3 Seg.
Binário máximo do motor: Redução primária: Redução final: Diametro dos pneus:	40 Nm 2 3,692 22 "
Binário máximo à roda:	295,36 Nm

Na tabela 6 para o caso mais extremo com a inclinação de 15% e velocidade máxima de 30 km/h podemos verificar que requer uma potência de 5.04 kW.

Tendo em conta os fatores apresentados anteriormente, o tipo de motor escolhido foi o motor síncrono de ímanes permanentes, dado este tipo de motor ser segundo a pesquisa realizada aquele que é mais indicado para a execução de uma tarefa com altos níveis de desempenho requeridos tal como a propulsão de um veículo exige. Tendo em conta a os

fatores de desempenho definidos durante a definição do conceito da moto e tomando como pressuposto a tentativa de utilização de um motor Europeu com o intuito de minimizar os custos de implementação, dado que um motor de ímanes permanentes apresenta um custo elevado que acrescido ao facto de ser importado de outro continente iria ainda ser mais significativo, a escolha realizada foi o PMS 120 W, figura 33 da empresa alemã Perm Motor.

Como se pode observar na tabela 7, este motor pode funcionar em quatro níveis de tensão 48 V DC, 72 V DC, 96 V DC e 320 V DC e pode ser refrigerado a ar ou a água. A escolha realizada foi a alimentação do motor a uma tensão de 72 V DC com limitação de rotação do motor às 3000 rpm e refrigeração a ar.



Figura 33 - Motor PMS 120W

Tabela 7 - Características técnicas do PMS 120W

Rpm	1500 min-1 to 6000 min-1		Depending on the windings, adapted to the System Voltage	
Rated Power	2,2 kW bis 7,0 kW		Depending on rpm	
Peak Torque	40 Nm		Pulse-Peak torque only up to 30 % of rated rpm	
Motor-Impuls-torque	~ 50 Nm		Impulstorque for max. 0,5 sec. and rpm < 50 rpm	
Motorfeedback	Analog Hallsensors (sin/cos); Resolver or Encoders		Depending on controller-specifications	
Weight	~ 12,3 kg		Incl. sin/cos Encoder, without break	

rpm [min-1]	48 V DC		72 V DC		96 V DC		ab 320 V DC	
	torque [Nm]	Power [kW]	torque [Nm]	Power [kW]	torque [Nm]	Power [kW]	torque [Nm]	Power [kW]
1500	20,4	3,2	20,4	3,2	20,4	3,2	20,4	3,2
3000	18,5	5,8	19,1	6,0	19,1	6,0	19,1	6,0
4500	13,8	6,5	13,8	6,5	13,8	6,5	13,8	6,5
6000	10,4	6,5	11,1	7,0	11,1	7,0	11,1	7,0

Características do motor a 72V DC e 3000 rpm:

- Binário: 19.1 Nm;
- Potência: 6 kW;
- Peso: 12.3 kg;

3.2 Simulação do motor elétrico PMS 120W

A simulação efetuada compreende apenas a simulação do motor elétrico em malha aberta, esta simulação foi construída em Matlab Simulink, tomando como base o bloco *Permanent Magnet Synchronous Machine* que corresponde ao motor elétrico a um motor elétrico síncrono de ímanes permanentes. No entanto alguns dos parâmetros do motor necessários para a simulação não eram fornecidos pela Perm e nenhuma informação sobre os parâmetros de controlo é fornecida pela Sevcon, foi realizada uma estimativa dos parâmetros do controlador, e das resistências e indutâncias do motor elétrico.

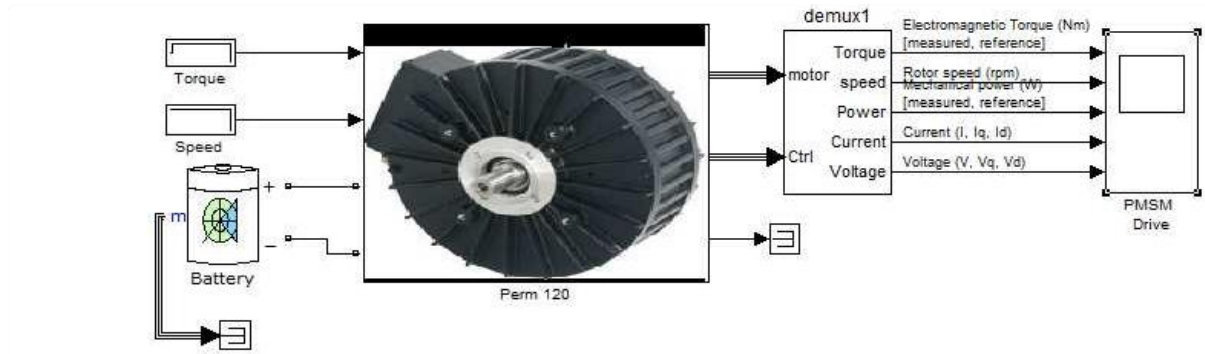
A caracterização do motor foi realizada pela constante de binário que corresponde a relação entre o torque nominal e a corrente de pico, ou seja a corrente que atravessa o motor à potência máxima de funcionamento.

A simulação obtida apresenta os seguintes resultados para o funcionamento do motor à potência máxima:

- Binário: aproximadamente 23 Nm;
- 2900 rpm;
- Potência 6500 W;
- Corrente do Motor: aproximadamente 100 A;

Os resultados obtidos na simulação figura 34, divergem um pouco dos esperados, especialmente ao nível da corrente do motor e da potência obtida. Esta variação é devida principalmente à necessidade de um maior esforço de controlo no motor que o utilizado, indicado pelo ripple obtido no binário do motor e na potência do mesmo. Os resultados da simulação seriam de melhor qualidade com a utilização dos parâmetros corretos do motor PMS 120 que estão em falta e com a utilização de um maior esforço de controlo no motor substituindo o controlador PI atualmente utilizado no modelo por um PID devidamente parametrizado para reduzir o erro de steady-state do sistema.

Conversão de uma moto 4 TRX 250 da Honda em elétrica



Discrete,
Ts = 6e-005 s.
powergui

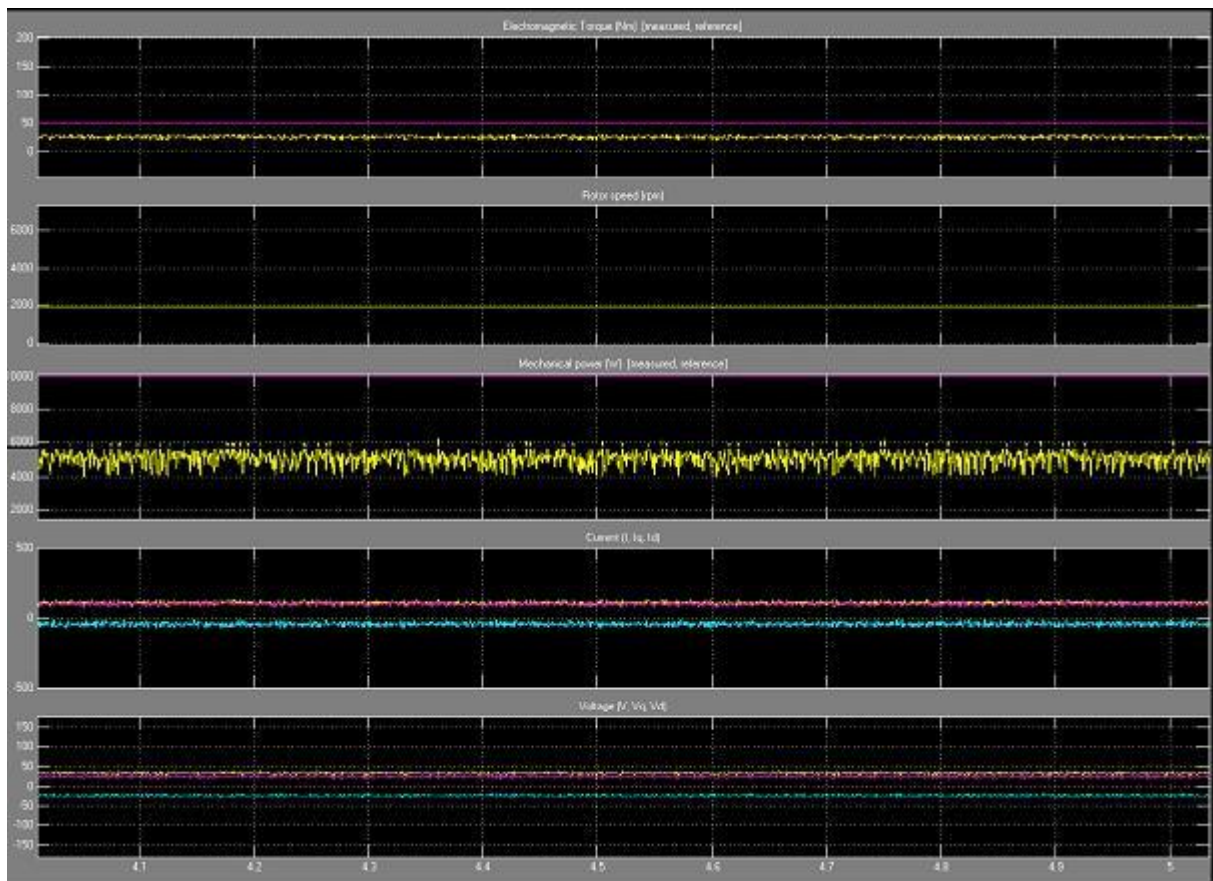


Figura 34 - Simulação em simulink do motor elétrico

3.3 Escolha do controlador

Para o controlo deste motor foi escolhido um controlador de uma das marcas referenciadas pela Perm Motor para utilização com os seus motores, sendo o Controlador escolhido o Sevcon G8035, figura 35. Funcionando a uma tensão 72 V DC. Este controlador permite a implementação de travagem regenerativa que constitui um mecanismo de ampliação da autonomia das baterias do veículo elétrico.

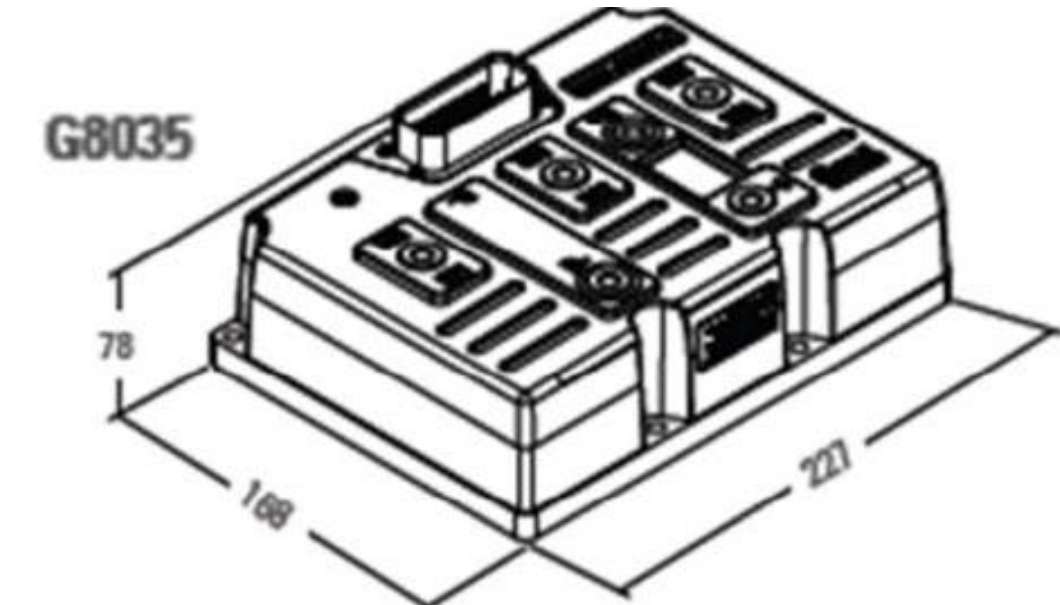


Figura 35 - Controlador Sevcon G8035

Tabela 8 - Características do controlador Sevcon G8035

Tensão máxima admitida:	116 VDC
Tensão nominal das baterias:	72 a 80 VDC
Peak current - 2 min.:	350 A
Boost current - 10 sec.:	420 A
Cont. Current - 60 min.:	140 A

3.4 Escolha das Baterias

Escolheram-se baterias de LiFe (Litio Ferro) com base no balanço das vantagens e desvantagens das mesmas face aos outros tipos disponíveis no mercado para o projeto em causa. Enumeram-se em seguida os fatores ponderados na escolha.

Vantagens

- Tecnologia avançada que requer um circuito de proteção construído dentro da bateria;
- Li-ion é usada onde se precisa de grande densidade energética (mais do que NiMh e aproximadamente 35% mais que a NiCd);
- Não desenvolve efeito memória;
- Provê mais horas de uso e maior tempo de operação do que a NiMh.

Desvantagens

- Tempo de carga mais longo;
- Não tem boa performance em baixas temperaturas;
- É comercialmente a bateria mais cara.

Depois de alguma pesquisa às baterias que se adequam ao uso pretendido e à relação entre características e preço, escolheram-se as baterias HP-PW-60AH da Hipower New Energy Group Co., Ltd cujas características são:

- **Tensão** - 3.2V
- **Carga Nominal** – 60 Ah
- **Dimensões** - 114×61×203
- **Peso** - 2.04 kg
- **Terminais** - M6 bolts
- **Descarga @ 23 °C**
- Corrente Maxima Contínua - 180 A
- Pico @ 60 sec. - 300 A
- Tensão de Corte - 2.50 V
- **Carga @ 23 °C**
- Método de Carga - CC / CV (3.65 V)
- Corrente Máxima Contínua - 60 A
- Tensão de Corte - 3.85 V

Implementando algumas características, destas baterias (HP-PW-60AH), no Matlab/Simulink e procedendo às simulações de carregamento e descarregamento obteve-se os seguintes resultados.

Descarregamento

Admitiram-se cinco regimes:

No primeiro gráfico da figura 36, a corrente máxima de descarga admitida pelas baterias.

E no segundo gráfico da mesma figura:

- Carga completa (130A);
- $\frac{3}{4}$ de Carga (97,5A);
- $\frac{1}{2}$ de Carga (65A);
- $\frac{1}{4}$ Carga (32,5A).

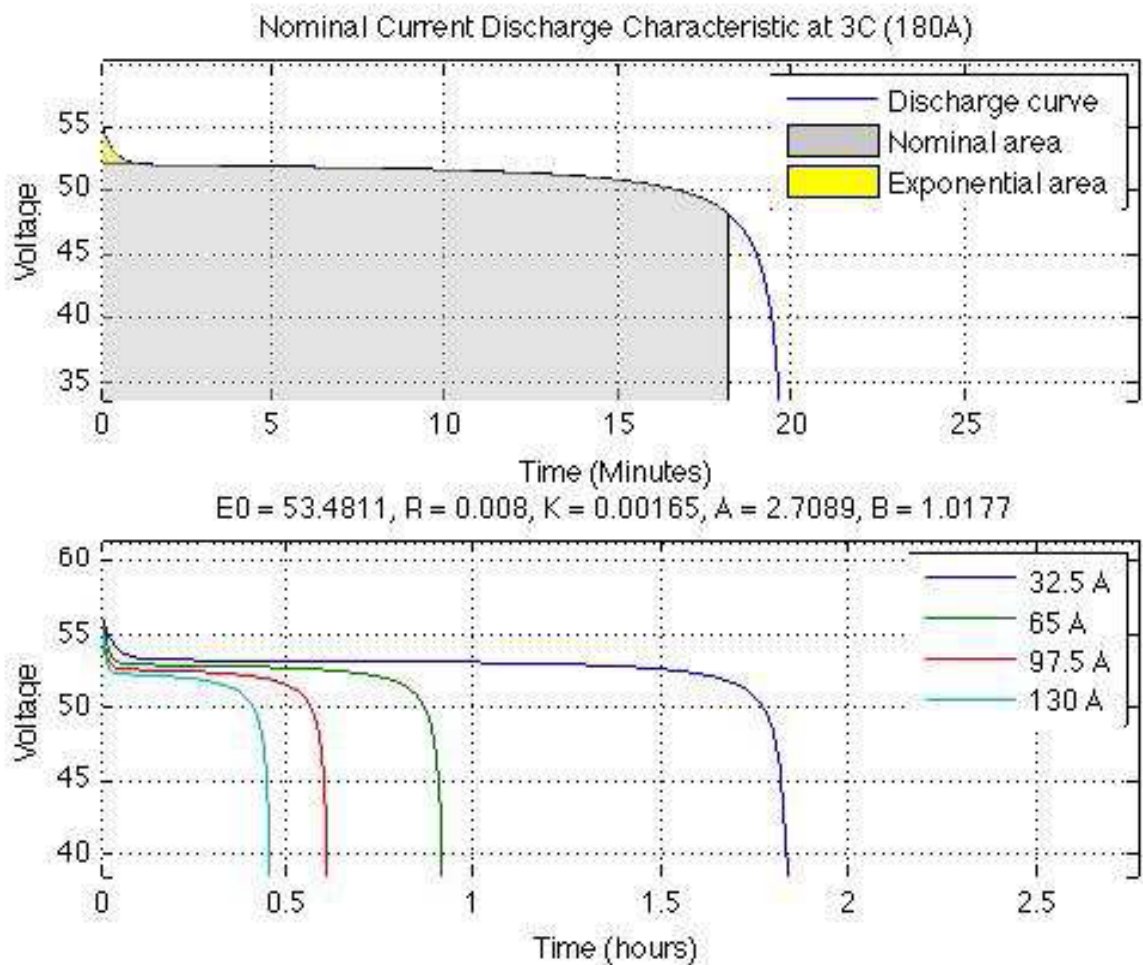


Figura 36 - Corrente máxima de descarga admitida pelas baterias

Carregamento

Na figura 37, simulou-se a carga completa através do carregador ligado à rede elétrica.

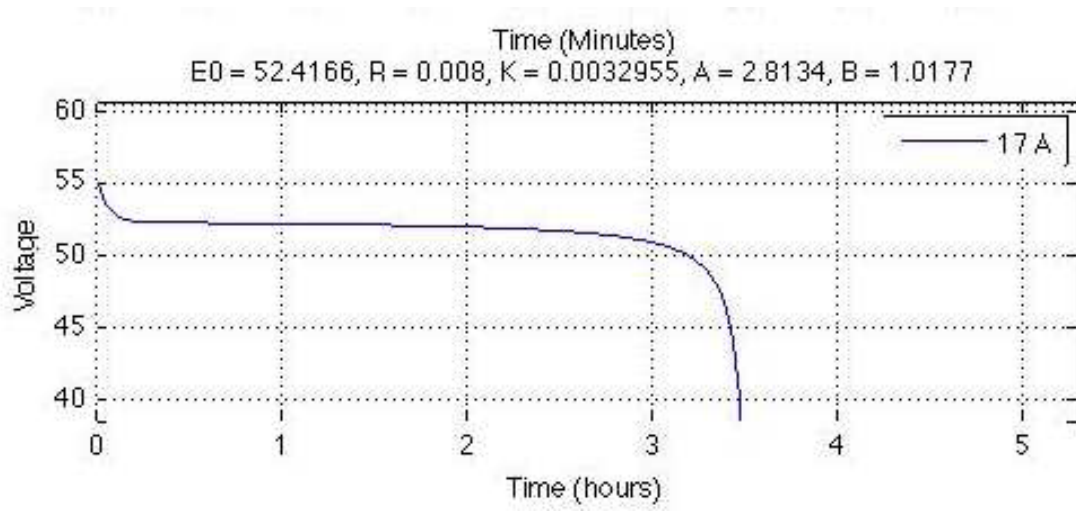


Figura 37 - Tempo de carregamento com o carregador Sevcom

Capítulo 4- Concretização do projeto

Devido à dificuldade em adquirir um motor síncrono de ímanes permanentes da PERM-MOTOR PMS 120W refrigerado a ar, e como havia disponível um motor síncrono de ímanes permanentes da PERM-MOTOR o PMS 156W, figura 38, do tipo *pancake* refrigerado a água, foram feitas algumas alterações e implementado o PMS 156W refrigerado a água, para isso foi necessário também implementar um sistema de refrigeração (um radiador com ventoinha e uma bomba de água), foi também necessário proceder a alteração do controlador sendo utilizado o controlador próprio do PMS 156W. Assim sendo vão ser apresentados os componentes instalados.

4.1 Máquina Elétrica PMS 156W

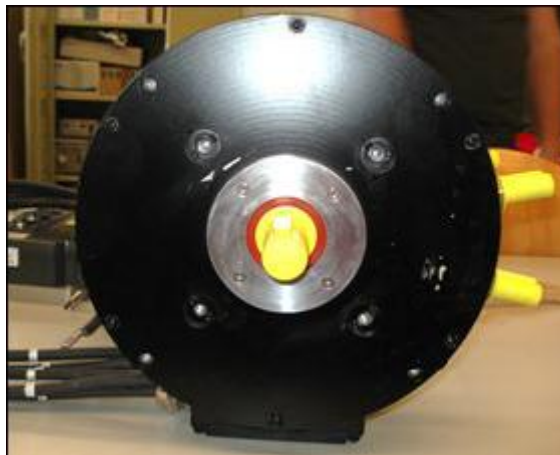


Figura 38 - Motor PMS 156W refrigerado a água

Este motor apresenta uma elevada densidade de potência, que é extremamente importante no projeto de VE's, é um motor em forma de disco de fluxo axial com dois estatores trifásicos e um rotor com ímanes permanentes, com a particularidade de ser sem núcleo. O fluxo magnético criado nos ímanes permanentes corre axial ao longo das duas condutas de água e através dos dentes do estator. O resultado do uso de ímanes de NdFeB permite ter um fluxo magnético muito superior originando um elevado binário nominal.

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

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

A marca efetuou um ensaio completo ao motor adquirido, cujos principais resultados se encontram na tabela 9:

Tabela 9 - Características do motor elétrico PMS 156 W

Motor	PMS 156 W
Tipo	Motor Síncrono de Ímanes Permanentes (Disc Motor)
Refrigeração	Refrigerado a água com 60°C de temperatura máxima; 6 L/minuto de caudal mínimo
Proteção	IP 54
Velocidade [rpm]	6000 rpm
Material dos ímanes	Neodymium-Iron-Bor
Potência [KW]	30 KW
Número de polos	8
Peso [kg]	31

O PMS 156W contém um *encoder* analógico acoplado de forma a determinar se a posição angular do rotor. Um sensor de temperatura está integrado na máquina para monitorizar a temperatura dos ímanes permanentes do rotor de forma a garantir que a mesma esteja dentro dos limites especificados.

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

Encoder

O encoder, figura 39, acoplado à máquina é constituído por um circuito integrado AM256 e um íman, utilizando a tecnologia do sensor efeito de hall, figura 38, de forma a detetar a distribuição de densidade de fluxo magnético na superfície do silício.

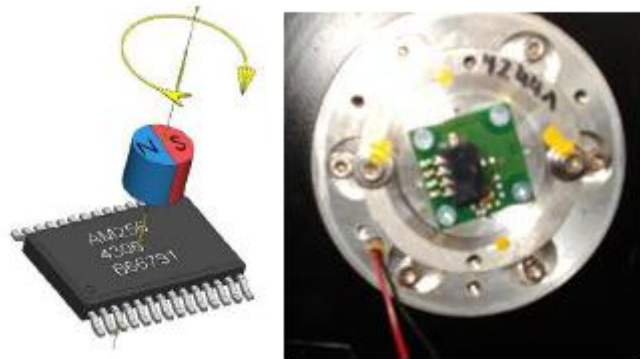


Figura 39 - Encoder - AM256 com íman

O íman encontra-se colocado no veio/rotor da máquina, assim á medida que este roda a posição do íman também varia o que origina uma alteração dos valores de tensão do seno e do cosseno produzidos pelo circuito integrado, figura 40. Os valores do seno e do cosseno são assim enviados para o controlador efetuando este uma análise das duas sinusoides de modo a determinar a posição angular do rotor.

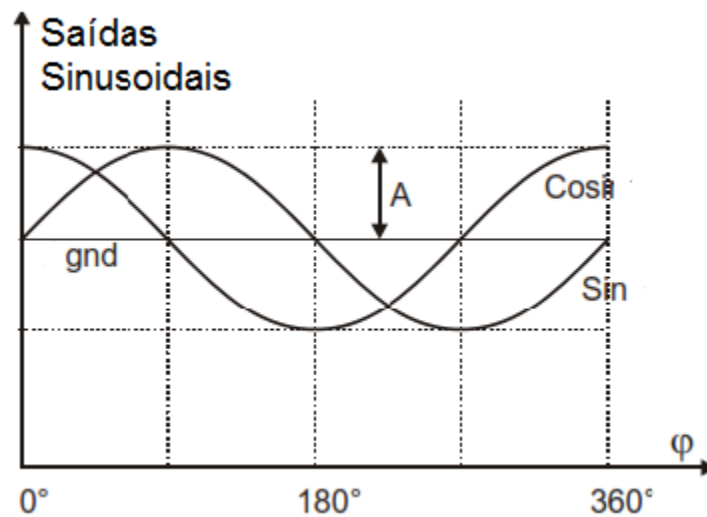


Figura 40 - Sinais de saída apresentados pelo encoder

Sensor de Temperatura

O motor elétrico também contém ligado um sensor de temperatura de silicone da série KTY84/130, figura 41.

O KTY84/130 é um sensor resistivo que varia o valor da resistência com a variação da temperatura, sendo a sua faixa de medição dos -40 a 300 °C.

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

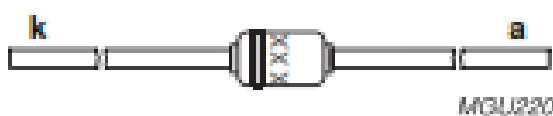


Figura 41 - Sensor de temperatura, HTY84/130

Sistema de Refrigeração

Como foi apresentado atrás o motor necessita de ser refrigerado a água, o que torna necessário a utilização de um permutador de calor (radiador) com ventoinha, bem como de uma bomba de recirculação de água.

O permutador de calor (radiador) utilizado encontra-se na figura 42, É um permutador já existente e que serve para as especificações apresentadas, como não possui reservatório de água por isso foi utilizado o depósito de gasolina original como reservatório de água. Para esse efeito foram realizadas as devidas alterações ao depósito. A ventoinha que foi acoplada ao permutador de calor (radiador) pode-se ver na figura 43. A bomba elétrica de recirculação de água escolhida é uma bomba elétrica da Bosch, figura 44, utilizada em veículos convencionais, e comparando a folha de características da bomba elétrica de recirculação da água, tabela 10, com a folha de características do motor elétrico, tabela 9, é possível verificar que o caudal que a bomba debita é muito superior às especificações do motor elétrico o que valida a sua utilização, esta bomba foi escolhida pois era de fácil aquisição (tempo de encomenda e receção baixo e custo acessível).



Figura 42 - Permutador de calor (radiador)



Figura 43 – Ventoinha



Figura 44 - Bomba elétrica de recirculação de água

Tabela 10 - Características da Bomba de água elétrica

Tensão nominal (Un)	12 V
Volume (V)	850...1050 dm ³ h ⁻¹
Pressão (p)	0,1 bar
Direção de rotação	Direita
Grau de proteção	IP 54
Peso	0,25 kg

4.2 Baterias [33]

As baterias de íons de lítio, como já foi referido anteriormente, são as que têm melhores características para serem utilizadas no Veículo Elétrico. No entanto, devido a este tipo de bateria ter um custo elevado, optou-se por utilizar a tecnologia de níquel hidreto metálico.

Como este tipo de baterias já foi utilizado, estudado e descrito num projeto idêntico (Fiat Uno Elétrico de Competição), também desenvolvido na Faculdade de Engenharia da

Universidade do Porto, pelos engenheiros Tiago Ramos, Tiago Rocha, Rui Santos e João Queirós, devo referir que este subcapítulo foi retirado da tese do Tiago Rocha [33]

Este tipo de baterias é utilizado por vários fabricantes de veículos híbridos como, por exemplo, a Toyota e a Honda. As informações disponíveis destas células de Ni-MH são a sua tensão nominal de 1,2 V e a capacidade de 5,5 Ah. Cada pack de baterias contém 11 módulos de baterias, compostos por 12 células em série, perfazendo um total de 132 células de Ni-MH por pack, figura 45. A energia total armazenada em cada pack tem portanto um valor de 871,2 Wh.

Não tendo em mão a informação acerca de um modelo desta bateria, houve a necessidade de a modelar e parametrizar. O modelo elétrico da bateria tem um papel fundamental na simulação de todo o sistema de alimentação do VEC, pois permite obter a dinâmica da tensão perante casos distintos do funcionamento do veículo, bem como em diferentes condições das mesmas, para assim se conseguir obter uma simulação mais próxima da realidade.



Figura 45 - Pack de baterias Ni-MH, com invólucro, ligações e terminais para sensorização, à esquerda. Na direita um módulo composto por 12 células.

As formas de onda típicas da dinâmica na tensão de uma bateria são apresentadas em vários artigos: [27], [28], [29] e [30]. Os Autores impõem uma variação praticamente instantânea da corrente na bateria, observando a resposta da tensão. Os resultados práticos, levados a cabo nestes artigos, levam a admitir que a bateria, quando é forçada a uma descarga tende a baixar a sua tensão, enquanto ao ser forçada a uma carga a sua tensão tende a subir, conforme é ilustrado na figura 46.

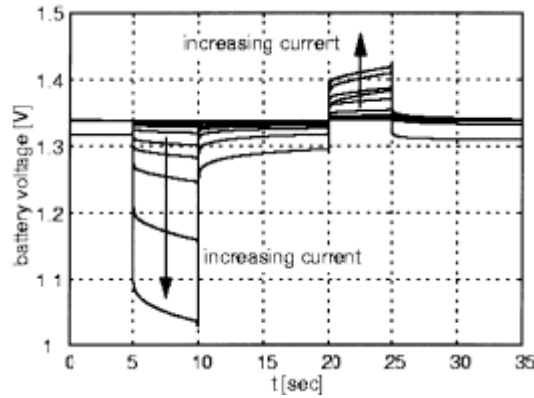


Figura 46 - Resposta da tensão de uma célula de Ni-MH a diferentes correntes de descarga (5 a 10 s) e carga (20 a 25 s) [30].

Com o intuito de comparar a resposta da tensão das baterias, de Ni-MH utilizadas no projeto, com a relatada nos artigos, desenvolveu-se um sistema de teste.

Como referido anteriormente as baterias estão disponíveis em módulos de 12 células em série. Tornou-se impossível separá-las fisicamente, pelo que todos os testes são feitos ao módulo completo.

Para forçar a bateria a uma variação brusca de corrente, colocou-se esta em paralelo com resistências de potência. Ao fechar o circuito foi possível verificar, com a ajuda de um osciloscópio digital, a resposta da tensão à corrente de descarga imposta, bem como, aquando da abertura do circuito (rest time), figura 47.



Figura 47 - Resposta da tensão da bateria a uma carga: dinâmicas de descarga e rest time.

Das imagens capturadas é possível observar, quando a bateria é ligada à carga dissipativa, que existe uma queda de tensão instantânea, e uma dinâmica mais lenta, nos segundos seguintes. Quando o circuito é aberto, ou seja, a corrente que estava a circular da

bateria para a carga torna-se zero, a tensão da bateria sobe instantaneamente e tem uma resposta mais lenta nos segundos seguintes.

O modelo da bateria deve ter em conta estas características dinâmicas da tensão das células de Ni-MH, bem como a alteração da tensão em circuito aberto conforme o seu SOC, temperatura e número de ciclos por que já passou. No entanto, torna-se difícil de estabelecer uma relação entre número de ciclos - tensão em circuito aberto, já que levaria a fazer um teste exaustivo com centenas de cargas e descargas, e por isso é descartada, para já, a hipótese de ser modelada. Seria também interessante modelar a temperatura no funcionamento da bateria pois, como se sabe tem influência nas características da tensão em circuito aberto e na dinâmica [31]. No entanto, para simplificar os cálculos da modelação/parametrização, achou-se por bem afastar o efeito da temperatura, e admitir que os testes foram todos feitos a uma temperatura semelhante e constante.

O modelo apresentado por Schweighofer em [30] permite modelar a resposta transitória e estacionária da tensão para um determinado SOC. O modelo está representado no circuito da figura 48, onde V_{bat} é a tensão aos terminais da bateria e a corrente a circular na bateria é designada de I_{bat} . A tensão em circuito aberto V_{oc} é representada por uma fonte de tensão e modela o valor de tensão que a bateria apresenta, depois de estabilizada em circuito aberto.

Esta última tensão V_{oc} possui valores distintos para cada estado de carga, ou seja, é função do SOC. Com estados de carga altos, V_{oc} tem valores superiores, do que num estado de carga inferior, conforme foi referido no capítulo anterior. Acrescentando ainda, nas baterias de Ni-MH, V_{oc} tem valores diferentes para quando está em carga ou descarga.

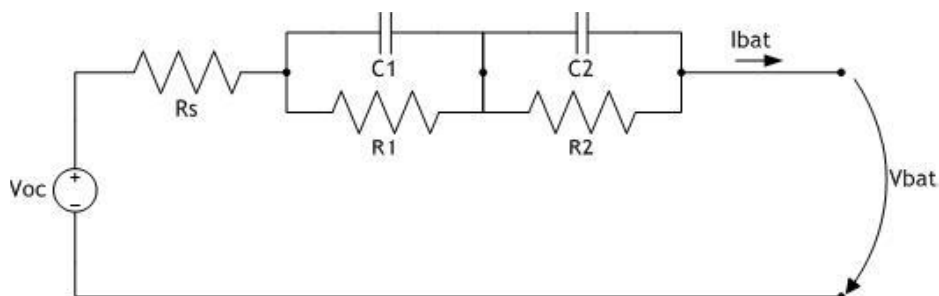


Figura 48 - Modelo da bateria adotado.

A resistência R_s , designada de resistência interna ou série, modela as resistências internas presentes na bateria por parte dos conectores, eléctrodos e eletrólito. A resposta instantânea da tensão a um degrau de corrente (carga), visualizado na figura 46, é modelada por esta resistência série.

A dinâmica da tensão a uma variação da corrente na bateria é modelada pelas duas malhas RC. A primeira malha R_1C_1 modela uma resposta transitória mais rápida, na ordem das décimas de segundo, enquanto a malha R_2C_2 define uma resposta mais lenta da bateria, podendo mesmo chegar a várias horas.

Os parâmetros deste modelo variam com o estado de carga da bateria. Com o intuito de parametrizar, este modelo, foi necessário desenvolver um procedimento de teste capaz de fornecer dados experimentais da bateria.

Devido a elevada voltagem destas baterias foi necessário fazer as ligações da bomba de água, ventilador e luzes à bateria original da moto de 12V.

4.3 Controlador [32]

Este subcapítulo foi retirado da tese do Tiago Ramos [32], pois este controlador é igual ao utilizado, estudado e descrito no projeto Fiat Uno Elétrico de Competição.

O controlador utilizado foi projetado para controlar motores de indução e motores síncronos de ímãs permanentes utilizados na tração e alimentados por baterias.

O controlador, figura 49, utilizado na parte prática deste trabalho é fabricado pela SEVCON e contém as seguintes características, ver tabela 11.



Figura 49 - Controlador GEN4-80 – SEVCON

O controlador contém conectores de potência onde se efetuam as ligações do motor (M1,M2,M3) bem como do sistema de alimentação (B-, B+) e um único conector de sinal com 35 pinos, como é possível observar na figura acima apresentada. No Manual do controlador GEN4-80 é possível verificar a designação bem como a funcionalidade de cada um dos pinos correspondentes ao conector de sinal.

Tabela 11 - Folha de características do controlador SEVCON GEN4-80

Modelo	GEN4 – G8055
Tensão nominal das baterias	72 a 80 V DC
Máxima tensão de operação	116 V DC
Mínima tensão de operação	39.1 V DC
Corrente de Pico (2 min)	550 A
Corrente Impulsional - Boost (10 sec)	660 A
Corrente contínua (60 min)	220 A
Entradas digitais	8
Entradas analógicas	2
Entrada do Sensor temperatura do motor	Termistor
Contactora/Saída solenóide (2A)	3 (1-16 kHz)
Entrada do motor UVW	Contém
Entrada do encoder do motor (AB)	Contém
Entrada SEN/COS	Contém
Saída alimentação Encoder	5 V ou 10 V (máx. 100 mA)
Suporta CANopen	DS201, DS401, DS402
Temperatura de operação ambiente	-40 °C a +85 °C
Classe de proteção	IP66
Peso	4.6 kg

O controlador tem a capacidade de se adaptar às condições de carga bem como ao ambiente onde é operado. A sua principal funcionalidade consiste no controlo nos quatro

quadrantes do binário e da velocidade do motor (condução e frenagem regenerativa no sentido direto/frente ou inverso/trás) sem a necessidade de contactores direcionais.

A aplicação de comandos de controlo de tração é realizada pelo driver usando uma relação de controlos digitais e controlos analógicos.

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

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

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

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

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

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

O rendimento do conversor de potência é obtido através da minimização das resistências térmicas, do uso da tecnologia mais recente de MOSFET, da proteção térmica interna (se as temperatura forem excessivas, o binário de saída é reduzido, figura 50), da proteção contra sobre correntes, da medição interna da corrente de saída, da sobretensão em caso de travagem regenerativa eleva a tensão das baterias para níveis inseguros.

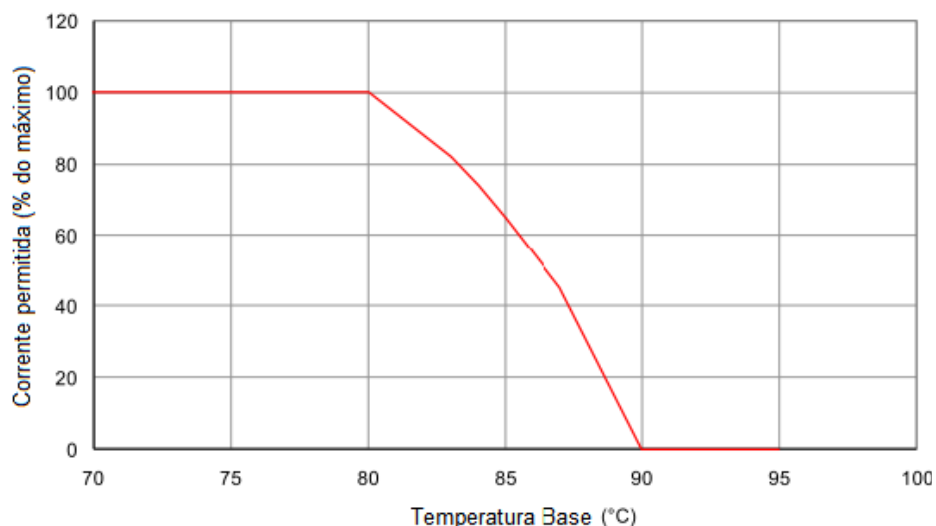


Figura 50 - Corrente permitida versus Base de temperatura do controlador

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

Para o diagnóstico visual simples de falhas do sistema e monitorizar o seu funcionamento, um LED verde está contido no corpo do controlador. É continuamente aceso quando se encontra pronto para operar (sem problemas/falhas), mas pisca um número diferente de vezes, num padrão repetido, quando há uma falha. O número de vezes que o LED pisca indica o tipo de falha, como se pode verificar no Manual do controlador GEN4-80.

Interface CAN (USB-para-CAN)

O módulo USB-para-CAN, figura 51, realiza a interface entre barramentos CAN e os barramentos USB (Versão 2.0).



Figura 51 - Módulo Interface CAN (USB-para-CAN)

O sistema contém um microcontrolador de 16 bits integrado que tem várias funcionalidades pois garante uma transmissão fiável e sem perdas, permite receber mensagens

em redes CAN com uma taxa de transmissão alta bem como quando o barramento está subcarregado.

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

Dissipador de Calor

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

Tabela 12 - Temperatura de operação do controlador GEN4-80

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

Na verdade a temperatura onde o controlador se encontra é aproximadamente a temperatura ambiente pois a estrutura permite o controlador estar em contacto com a temperatura ambiente assim sendo a temperatura rondara valores próximos dos 25 °C, mas para garantir realmente que o controlador esteja abaixo dos 25 °C nos dias mais quentes, utilizasse um dissipador de calor. Os dissipadores de alhetas são considerados melhores do que placas planas. Utilizou-se assim um dissipador de alhetas com 300 x 216 x 76 mm de dimensão como podemos ver na figura 52. O desempenho de refrigeração é afetado pelo nivelamento da superfície de montagem e da transferência térmica entre o dissipador e o GEN4-80. Uma forma de garantir uma transferência térmica eficaz consiste na aplicação de massa térmica de modo a que esta fique colocada de forma uniforme entre ambas as superfícies.



Figura 52 - Dissipador de calor do controlador

Capítulo 5 - Preparação do Veículo

A preparação do veículo começou com a desmontagem da carcaça exterior e de seguida a retirada do motor de combustão, escape e filtro de ar.

Na figura 53 podemos observar a moto antes da desmontagem.



Figura 53 - Moto antes das alterações

Na figura 54 esta ilustrada a moto depois de retirar o motor e componentes desnecessários.



Figura 54 - Moto depois de retirar o motor de combustão

5.1 Suporte de fixação do PMS 156W e acoplamento ao veículo

O motor foi montado no lugar do original mas foi necessário fabricar os suportes para conseguir fixá-lo nos mesmos apoios do original.

O suporte do motor foi projetado utilizando chapas de alumínio da série 7000. Para o suporte do motor foi necessário adquirir duas chapas de alumínio (305x130x25 mm e 215x255x25 mm).

De modo a transmitir o movimento para o veio traseiro foi adquirida uma corrente de transmissão (figura 55).

A transmissão por correntes consiste basicamente de um par de rodas dentadas e uma corrente. Esta transmissão apresenta algumas vantagens tais como:

- não patinam, portanto mantêm a relação de transmissão;
- garantem rendimento de 96% a 98%;
- podem transmitir potência em locais de difícil acesso;
- permitem montagens com grandes distâncias entre centros;
- permitem o acionamento simultâneo de vários eixos;
- em geral, não necessitam de tensores;
- podem ser usados em locais poeirentos, com temperaturas elevadas e locais húmidos.

É importante que seja garantida a lubrificação do conjunto. Uma boa lubrificação é condição essencial para um funcionamento suave e duradouro.

É, ainda, de muita utilidade para transmissões entre eixos próximos, que é o nosso caso, substituindo assim trens de engrenagens intermediárias.

Para a montagem do sistema de transmissão foi necessário projetar e fabricar um veio para encaixar no motor e fixar a roda cremalheira motora. Também foi necessário adquirir um veio (Drive Shaft) da Honda, figura 56, para ser alterado, e fixa nele a outra roda cremalheira para receber o movimento do motor, este veio como iria ficar solto foi necessário fabricar uma chumaceira que foi fixada ao suporte do motor.

Nessa chumaceira foram colocados dois rolamentos radiais SKF 6301-2RSH, (podem ser visualizadas as suas dimensões e características no anexo C) a escolha destes rolamentos deve-se ao facto de ficarem próximos do chão e sendo assim pode haver contacto com água e poeiras que danificariam o rolamento, como a referência indica (2RSH), são rolamentos vedados (blindados a borracha) dos dois lados, e como são vedados também apresentam a vantagem de não ser preciso lubrificá-los pois possuem uma lubrificação por graxa na quantidade adequada sendo suficiente para a vida do rolamento.

Para a montagem dos vários componentes foi necessário seleccionar e adquirir algumas peças tais como freios, chavetas e parafusos e projetar e fabricar algumas peças para o efeito.

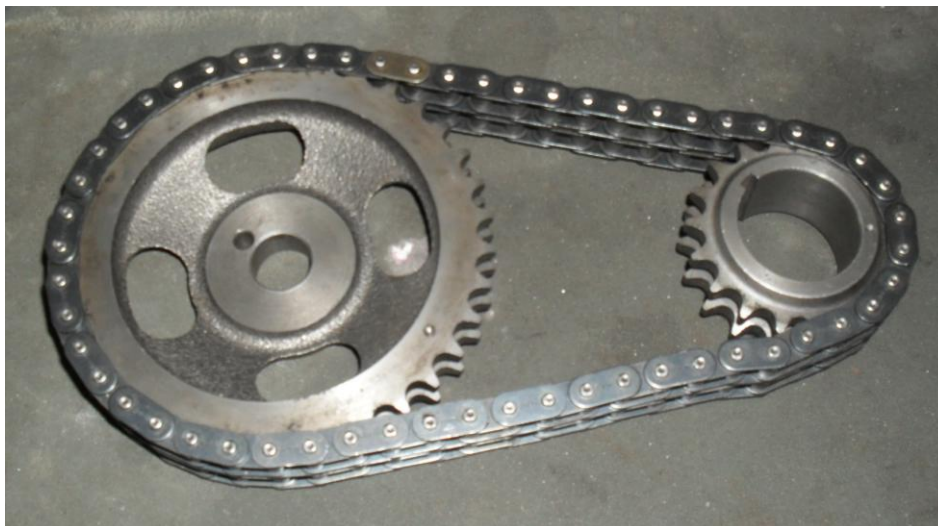


Figura 55 - Corrente de transmissão



Figura 56 - Veio de transmissão adquirido antes das alterações

Nas seguintes figuras são apresentadas varias peças fabricadas e sua montagem.

Na figura 57 encontra-se o veio que vai receber o movimento do motor através da corrente e transmiti-lo as rodas. Na montagem seguinte encontra-se duas peças fabricadas, uma das rodas, o veio alterado, dois rolamentos, dois pinos, dois parafusos, um anel elástico e uma chaveta 5x5x20 mm.



Figura 57 - Montagem do veio alterado

Na figura 58 podemos ver a roda cremalheira motora, anel elástico $\varnothing 32$ mm, chaveta 5x5x25 mm e a peça que vai acoplar no motor para receber o movimento e transmiti-lo ao veio traseiro através da corrente de transmissão.

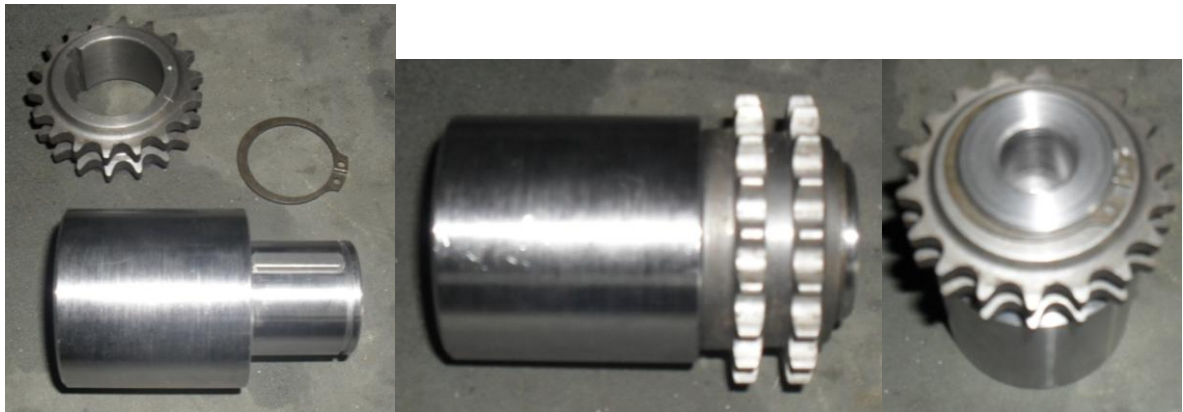


Figura 58 - Peça auxiliar para acoplar no motor

Na figura 59, podemos ver as placas projetadas e fabricadas com as furações necessárias para montagem, sua montagem e montagem do veio as placas.

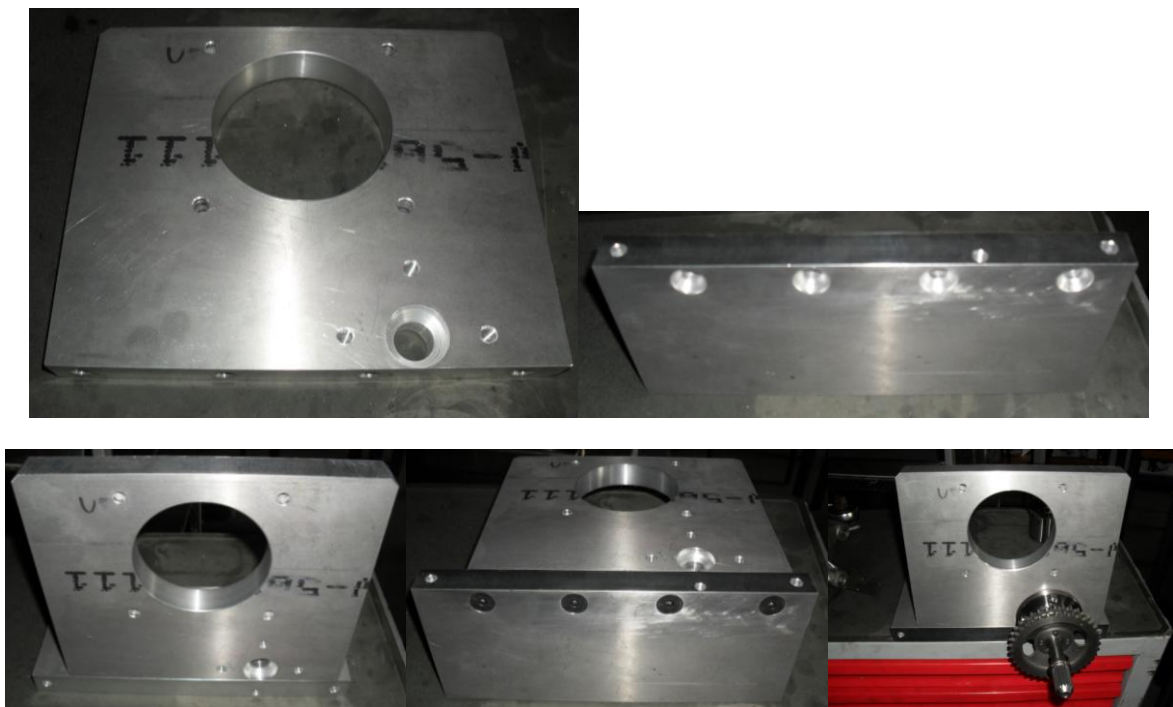


Figura 59 - Suporte do motor

Na figura 60, podemos observar a fixação do suporte ao quadro da moto, no lugar do motor de combustão.

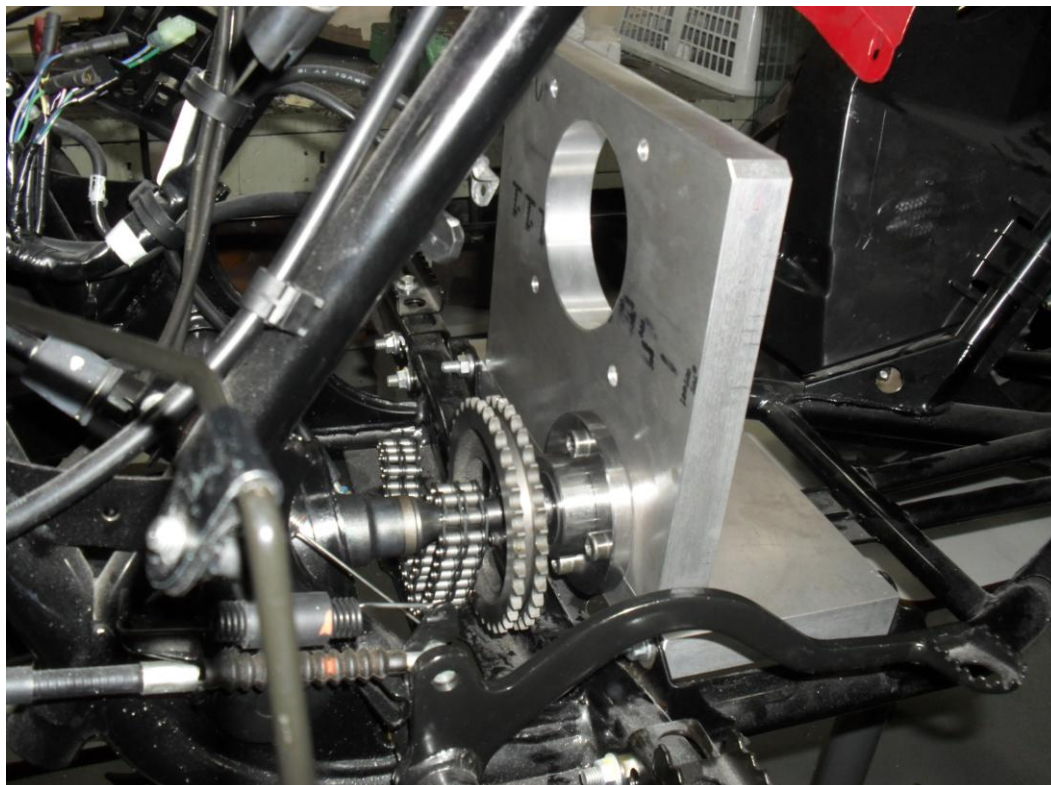


Figura 60 - Suporte do motor fixo nos apoios da moto

Na figura 61, está representada a fixação do motor elétrico, no suporte.

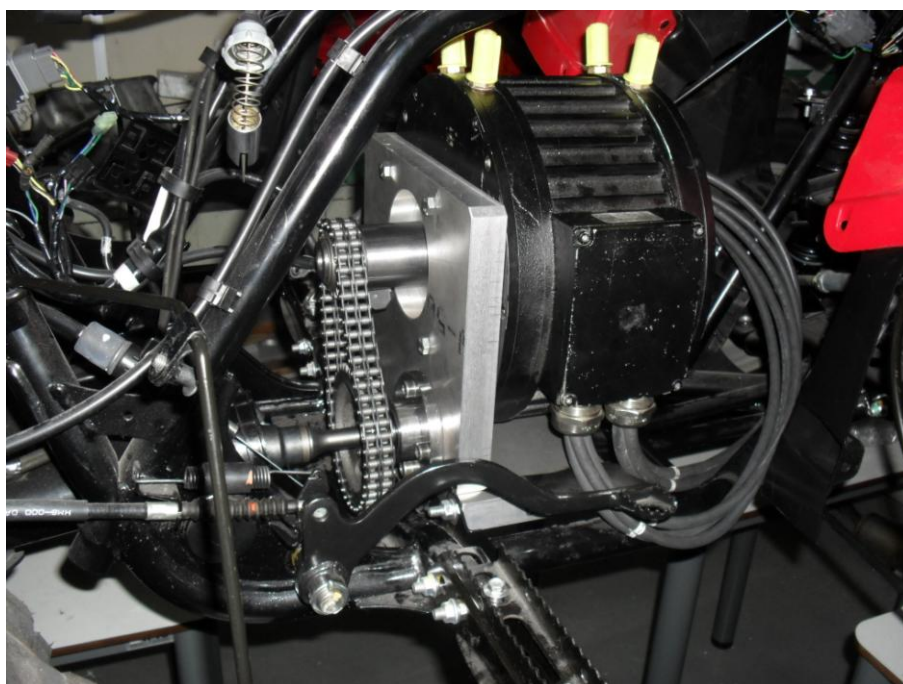


Figura 61 - Acoplamento do motor no suporte

5.2 Acoplamento da bomba de água, ventoinha e permutador de calor

O permutador de calor de água (radiador) para arrefecimento do motor elétrico foi fixado no suporte do permutador de calor original do óleo, que o motor de combustão continha, e para o seu acoplamento foi utilizado um suporte fabricado para o efeito como podemos ver na figura 62, a ventoinha ficou fixa por trás do permutador.

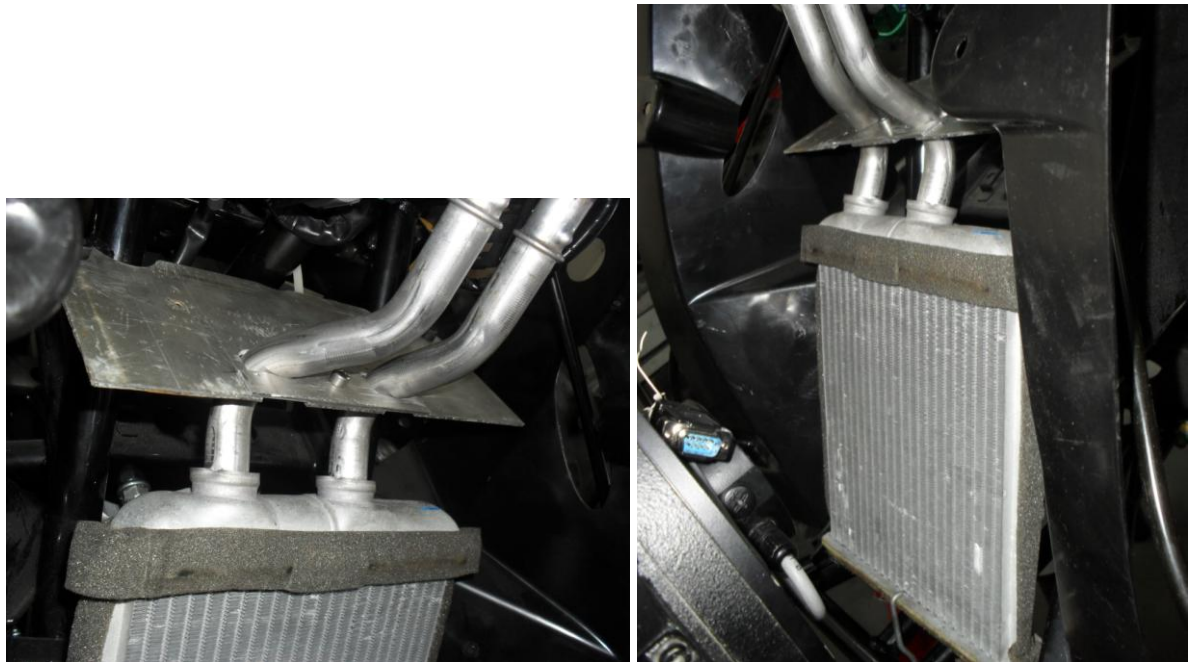


Figura 62 - Acoplamento do permutador de calor (radiador)

De seguida fizeram-se as ligações do permutador de calor ao depósito, ao motor e à bomba de água como podemos observar na figura 63.



Figura 63 - Ligação do circuito de refrigeração

5.3 Fixação do controlador no veículo

O controlador foi fixado ao dissipador de calor e colocado na parte da frente por baixo da carenagem da moto. Para o efeito foram feitos uns apoios de modo a fixa-los à estrutura da moto como podemos ver na figura 64.



Figura 64 - Controlador e dissipador acoplado na moto

5.4 Fixação das baterias

O pack de baterias foi colocado na grelha da parte de trás da moto e fixado à grelha de maneira a distribuir o peso da melhor forma.

Capítulo 6

6.1 Conclusões

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

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

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

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

Neste trabalho foi projetado e implementado um sistema de propulsão elétrica de uma moto de quatro rodas da marca Honda. O projeto encontra-se em fase de implementação do sistema de controlo do motor elétrico.

6.2 Trabalhos futuros

Estando este projeto ainda numa fase embrionária pode-se garantir que a plataforma de trabalho é de grande qualidade, permitindo evoluir e melhorar a componente elétrica e mecânica. Em relação a parte mecânica futuramente deveria ser acoplado um alternador para recarregar a bateria de 12V, e também deveria ser aperfeiçoado o sistema de refrigeração do motor bem como o sistema de aceleração.

Capítulo 7 - Referências e Bibliografia

- [1]-Vogel Carl - Build Your Own Electric Motorcycle, McGraw-Hill.
- [3]-Dhameja Sandeep - ELECTRIC VEHICLE BATTERY SYSTEMS, Newnes Boston.
- [4]-Reddy Thomas B. , Linden David – HANDBOOK OF BATTERIES 3ª Edição, McGraw-Hill.
- [5]-<http://www.mgmojo.com/corbinmotors/chapter2.html>
- [6]-<http://www.mgmojo.com/corbinmotors/chapter3.html>
- [7]-<http://www.electricmotorbike.org/index.php?page=photos>
- [8]-Y. G. Mehrdad Ehsani, Ali Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles* Second Edition ed.
- [9]-C. C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the Ieee*, vol. 90, pp. 247-275, Feb 2002.
- [10]-C. C. Chan, "The state of the art of electric vehicles," *Proceedings of the World Engineers' Convention 2004, Vol F-B, Power and Energy*, pp. 511-518
626, 2004.
- [11]-C. C. Chan and Y. S. Wong, "The state of the art of electric vehicles technology," *Ipemc 2004: The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, Vols 1-3, Conference Proceedings*, pp. 46-57
1818, 2004.
- [12]-C. C. Chan, "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proceedings of the Ieee*, vol. 95, pp. 704-718, Apr 2007.
- [13]-M. H. Westbrook, *The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars* vol. 38, 2001.
- [14]-M. Zeraouila, *et al.*, "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study," in *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference*, 2005, p. 8 pp.
- [15]-MotorInducao. Available: <http://paginas.fe.up.pt/~ee02060/MIT.html>
- [16]-F. Zidani, *et al.*, "Fuzzy efficient-optimization controller for induction motor drives," *Power Engineering Review, IEEE*, vol. 20, pp. 43-44, 2000.
- [17]-F. Zidani, *et al.*, "Fuzzy optimal Volts/Hertz control method for an induction motor," *Iemdc 2001: Ieee International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 377-381
1004, 2001.

- [18]-MotorRelutanciaComutado. Available:
<http://www.deetc.isel.ipl.pt/jetc05/CCTE02/papers/finais/fortes/22.pdf>
- [19]-M. Zeraoulia, *et al.*, "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study," *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 280-287
 837, 2005.
- [20]-R. Krishnan, *Electric motor drives : modeling, analysis, and control*, 2001.
- [21]-F. A. P. Lopes, "Estudo e Comparação de Diferentes Métodos de Controlo de Motores Síncronos com Ímanes Permanentes," FEUP, 2008.
- [22]-Bansal, R. C. (2005). *Electric Vehicles. Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*, B. I. o. T. a. Science. Pilani, Taylor & Francis Group, LLC: 10,11,12,13,14.
- [23]-H.L. Chan, D. S. (2000) *A New Battery Model for use with Battery Energy Storage Systems and Electric Vehicles Power Systems*. 470 - 475
- [24]-J. Moreno, *et al.*, "Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks," *Ieee Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, pp. 614-623, Apr 2006.
- [25]-S. A. M. Granadeiro, "Controlo de Motor Assíncrono Aplicado a Veículos Eléctricos," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [26]-J. G. W. West, "DC, induction, reluctance and PM motors for electric vehicles," in *Motors and Drives for Battery Powered Propulsion, IEE Colloquium on*, 1993, pp. 1/1-111.
- [27]-Gao, L.J., S.Y. Liu, and R.A. Dougal, *Dynamic lithium-ion battery model for system simulation*. *Ieee Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2002. **25**(3): p. 495-505.
- [28]-Abu-Sharkh, S. and D. Doerffel, *Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries*. *Journal of Power Sources*, 2004. **130**(1-2): p. 266-274.
- [29]-Windarko, N.A., C. Jaeho, and C. Gyo-Bum. *Improvement of electrical modeling of NiMH battery for application of Microgrid System*. in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*. 2010.
- [30]-Schweighofer, B., K.M. Raab, and G. Brasseur, *Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system*. *Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003. **52**(4): p. 1087-1091.
- [31]-Kroeze, R.C. and P.T. Krein, *Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations*. 2008 *Ieee Power Electronics Specialists Conference*, Vols 1-10, 2008: p. 1336-1342.
- [32]-Tese de Tiago Manuel Silva Ramos
<http://paginas.fe.up.pt/~ee06254/tiagoramos/dissertacao2.html>
- [33]-Tese de Tiago Alberto Correia da Rocha
<http://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=tese+tiago+rocha+feup&source=web&cd=4&ved=0CFQQFjAD&url=https%3A%2F%2Fredmine.fe.up.pt%2Fattachments%2Fdownload%2F902>

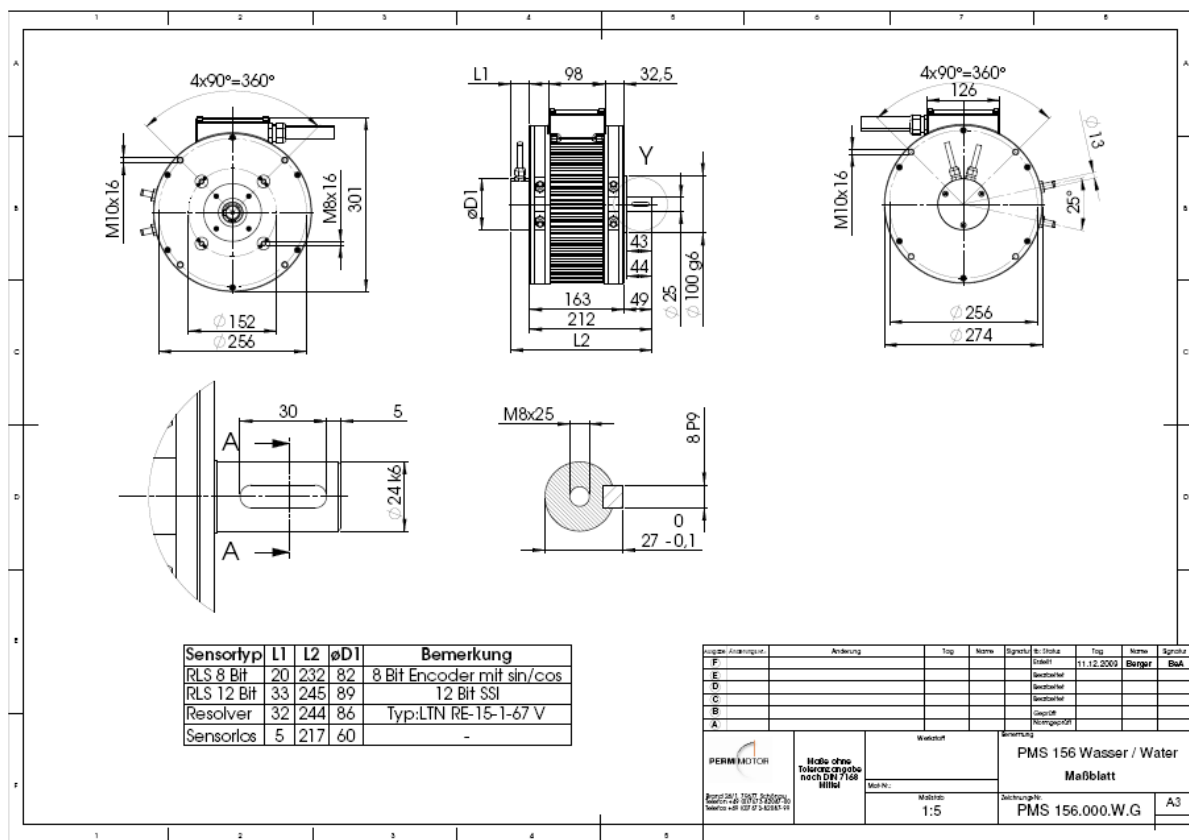
%2FVec_dissertacao_BMS.PDF&ei=T5PYT4aMJOyM0wWvrMWbBA&usg=AFQjCNHC2cAFmearac6DwcAco7oAHBL0ZA&cad=rja

- <https://sites.google.com/site/eautprojectomoto4hondafourtrax/>
- <https://sites.google.com/site/moto4hondahibridaserie/>
- <https://sites.google.com/site/eletriaut/>
- <http://moto4hibridaparalelo.blogspot.pt/>
- <https://sites.google.com/site/electronicaautomovel/>
- <https://sites.google.com/site/eaut2011projetomoto4/>
- <https://sites.google.com/site/veiculohibridoparalelo/>
- <https://redmine.fe.up.pt/projects/mq/files>
- <http://www.automotor.xl.pt/Not%C3%ADcias/DetalheNoticia/tabid/118/itemId/6257/Default.aspx>
- HistoriaEV. Available from:
<http://inventors.about.com/library/weekly/aacarselectrica.htm>
- <http://www.apve.pt/content01.asp?treeID=07&categoriaID=6&newsID=94>
- <http://fe.up.pt/tre>
- <http://cripplerooster.blogspot.com/2011/08/uma-reflexao-sobre-os-sistemas-de.html>
- <http://br.librosintinta.in/biblioteca/ver-pdf/www.ufrgs.br/ldtm/publicacoes/05%252004.pdf.htx>
- <http://www.cpmotors.eu/index.php?id=7&L=1>
- <http://www.perm-motor.de/en/products/synchronous-motors>
- <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Motores-Eletricos/Industriais/Wmagnet-Drive-System#>
- <http://www.perm-motor.de/en/products/synchronous-motor-controllers>
- <http://www.sevcon.com/products.aspx>
- Chow, H. Z. a. M.-Y. (2010) Comprehensive Dynamic Battery Modeling PHEV Applications.
- Doctors, R. (1995) A SYSTEMS APPROACH TO BATTERY POWERED VEHICLES. 117 - 123
- Husain, I. (2005). Electric and Hybrid Vehicles. Design Fundamentals. C. PRESS. New York Washington, D.C., Taylor & Francis e-Library.
- Lee, I. S. a. S.-H. Battery Energy Storage. Large Energy Storage Systems Handbook.
- Lorenzo Serrao, Z. C., Yann Guezennec, Giorgio Rizzoni (2005) An Aging Model of Ni-MH Batteries for Hybrid Electric Vehicles. 78 - 85
- Martin Coleman, C. K. L., Chunbo Zhu, and William Gerard Hurley (2007). "State-of-Charge Determination From EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage, and Current for Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries." IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS VOL. 54: 2550-2557.

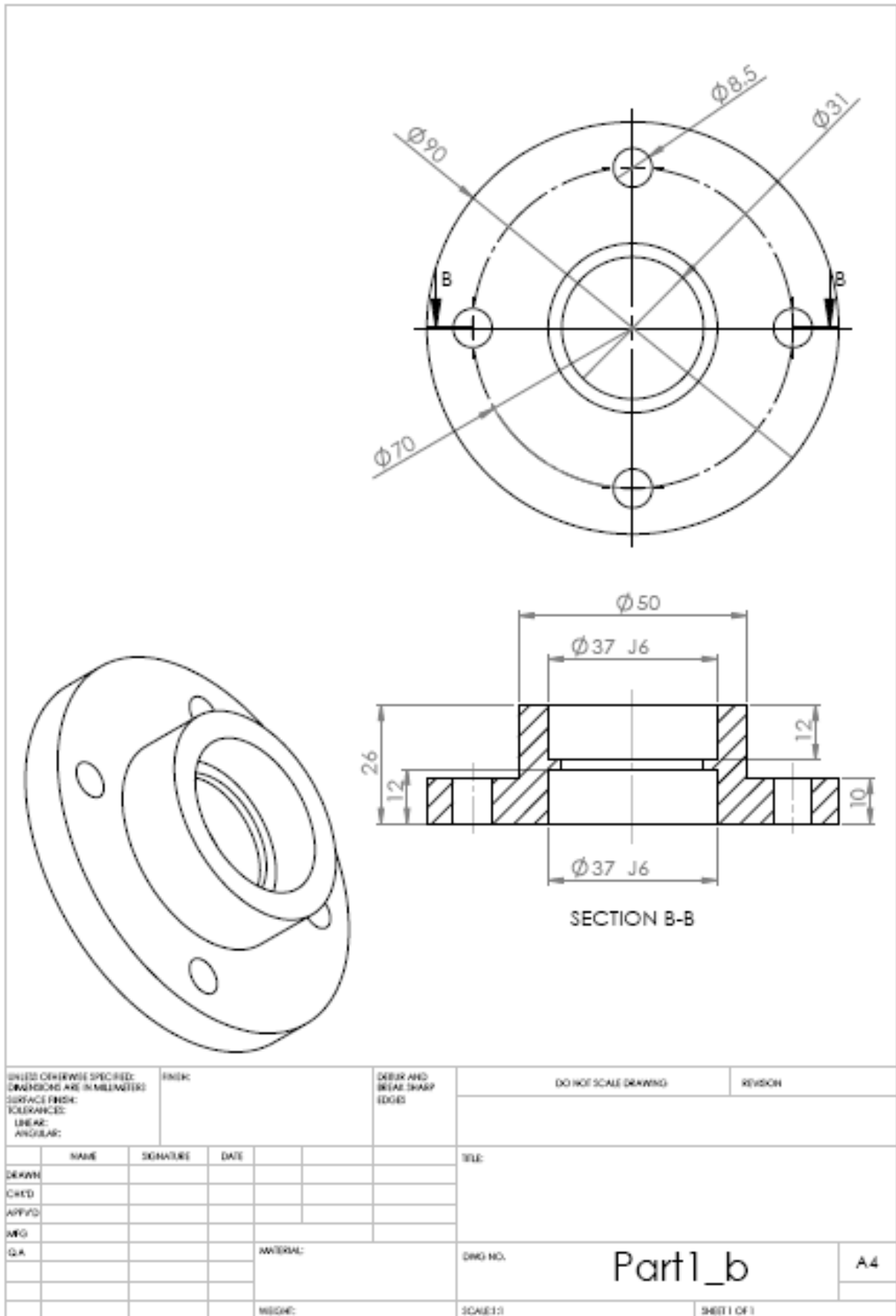
- Ryan C. Kroeze, P. T. K. (2008) Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations. 1336-1343
- Robert W. Erickson. *DC-DC Power Converters. Article in Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.*
- Electric Vehicle. http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle
(Consultada em 2011/10/04);
- Sonya Gargies. *Isolated Bidirectional DC-DC Converter for Hybrid Electric: Vehicle Applications.*
- Iqbal Husain. *Electric and Hybrid Vehicles. Design Fundamentals.* CRC press.
- Mohan, Ned; Undeland, Tore M.; Robbins, William P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design.* John Willey & Son Inc.
- Power electronics. http://en.wikipedia.org/wiki/Power_electronics.

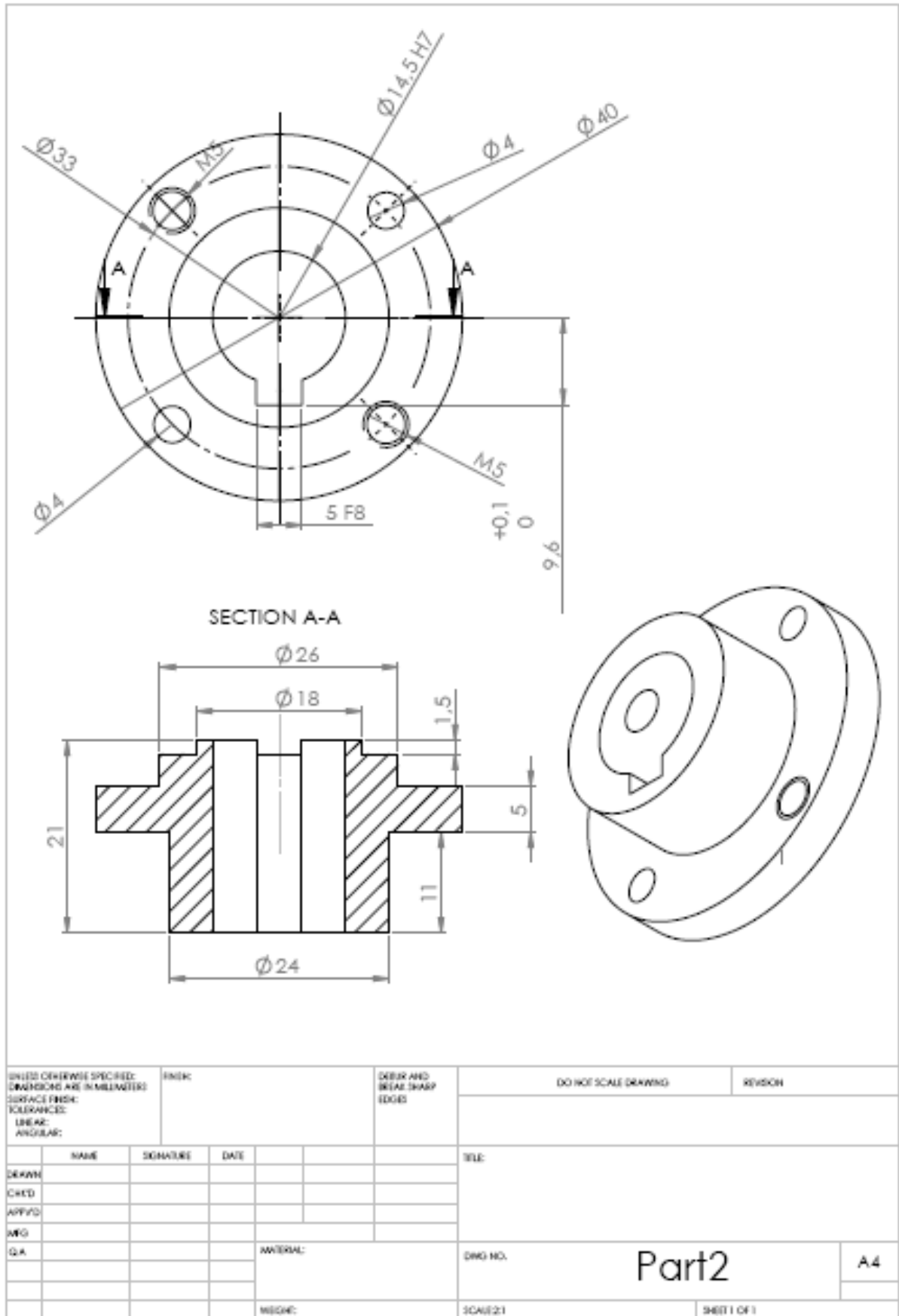
Anexos

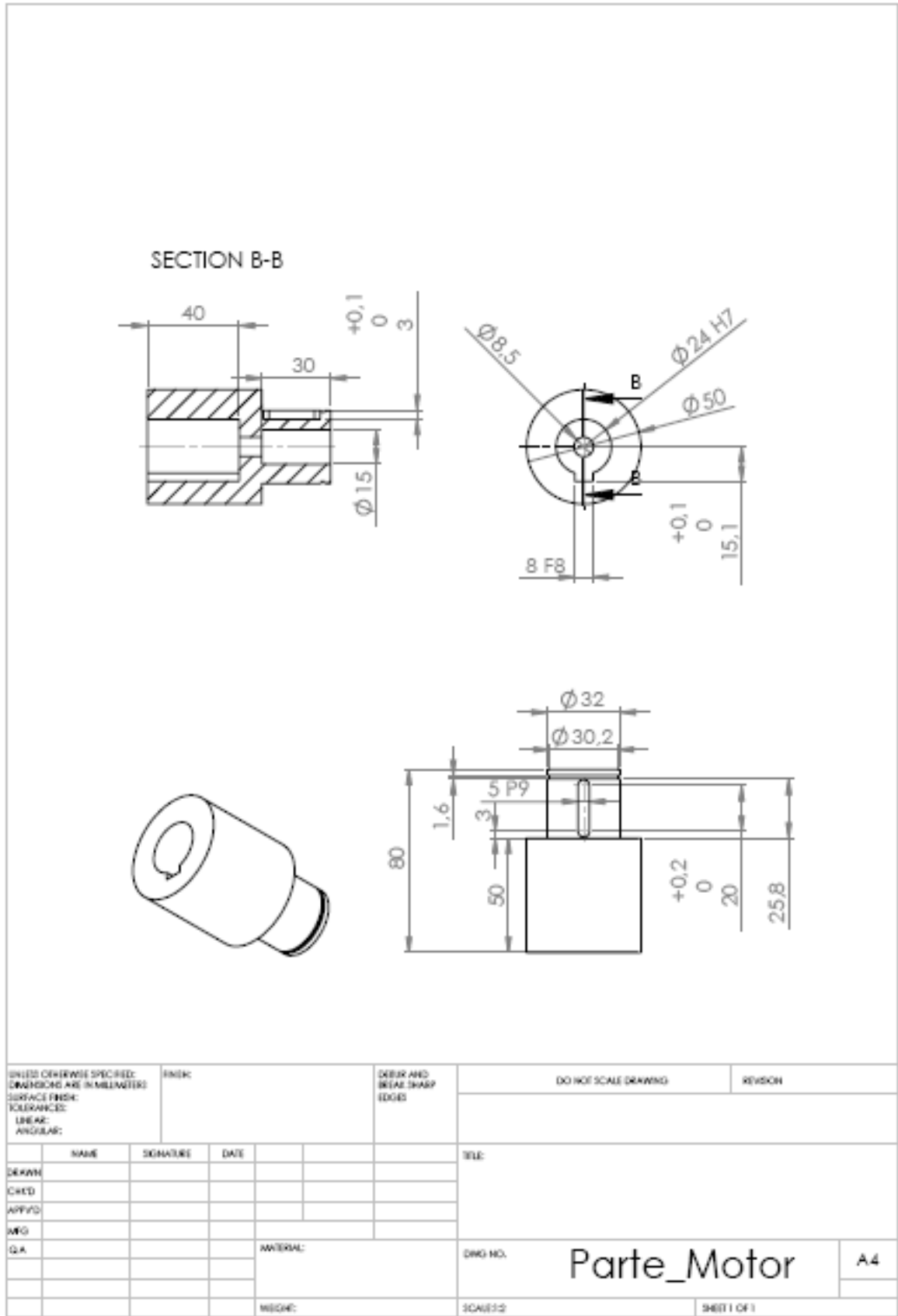
Anexo A - Desenho do motor

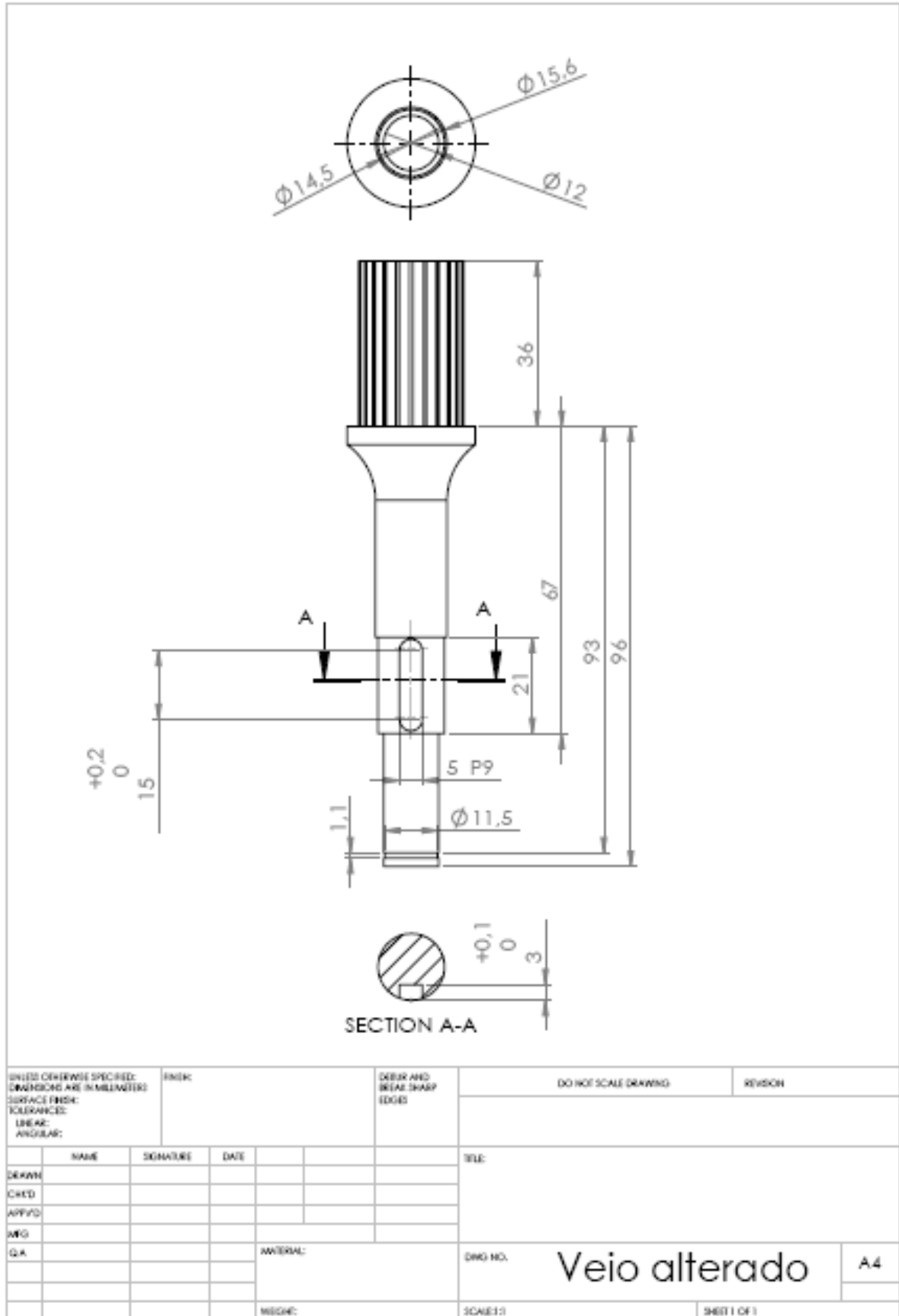


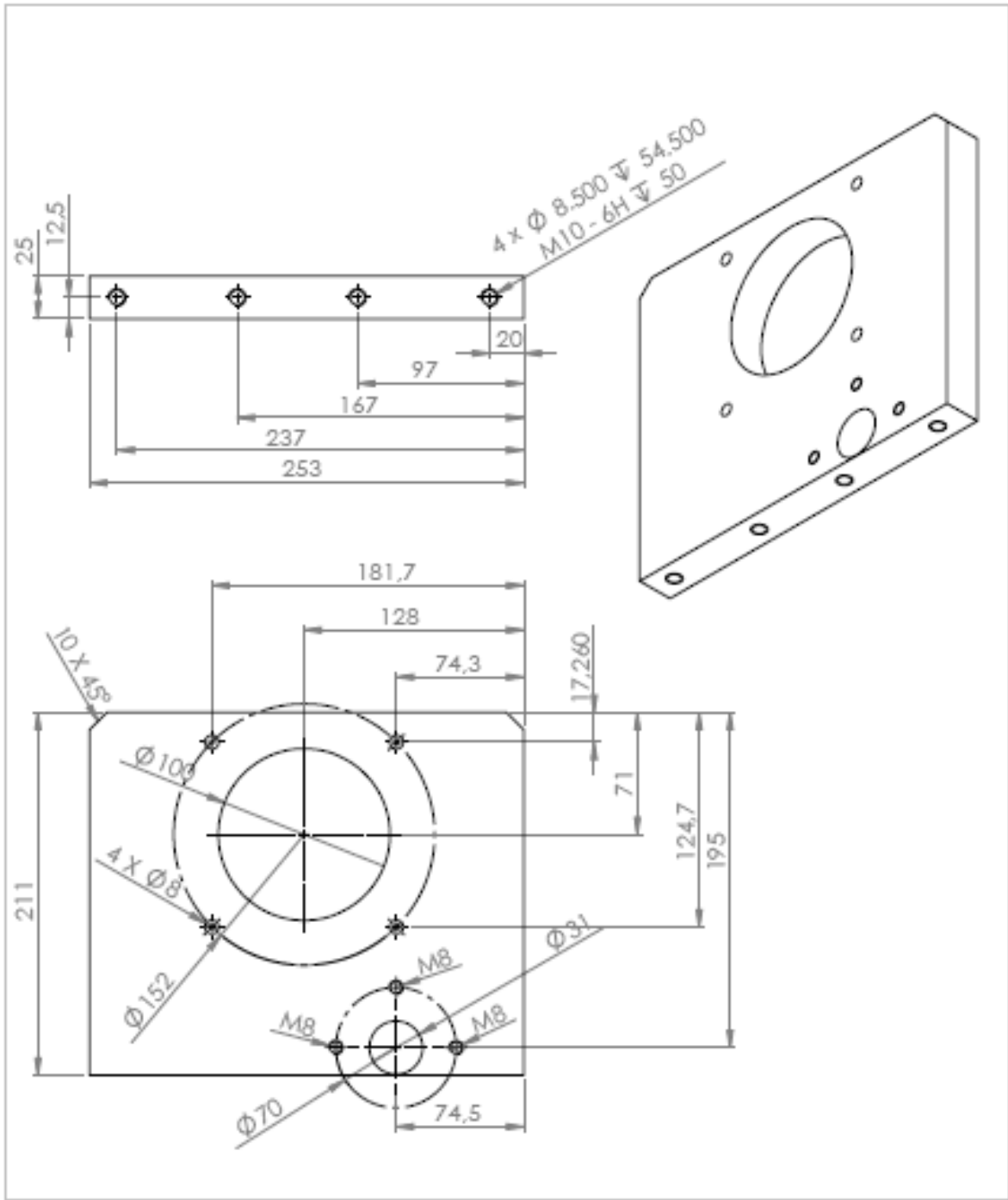
Anexo B - Desenhos de algumas peças fabricadas e alteradas.



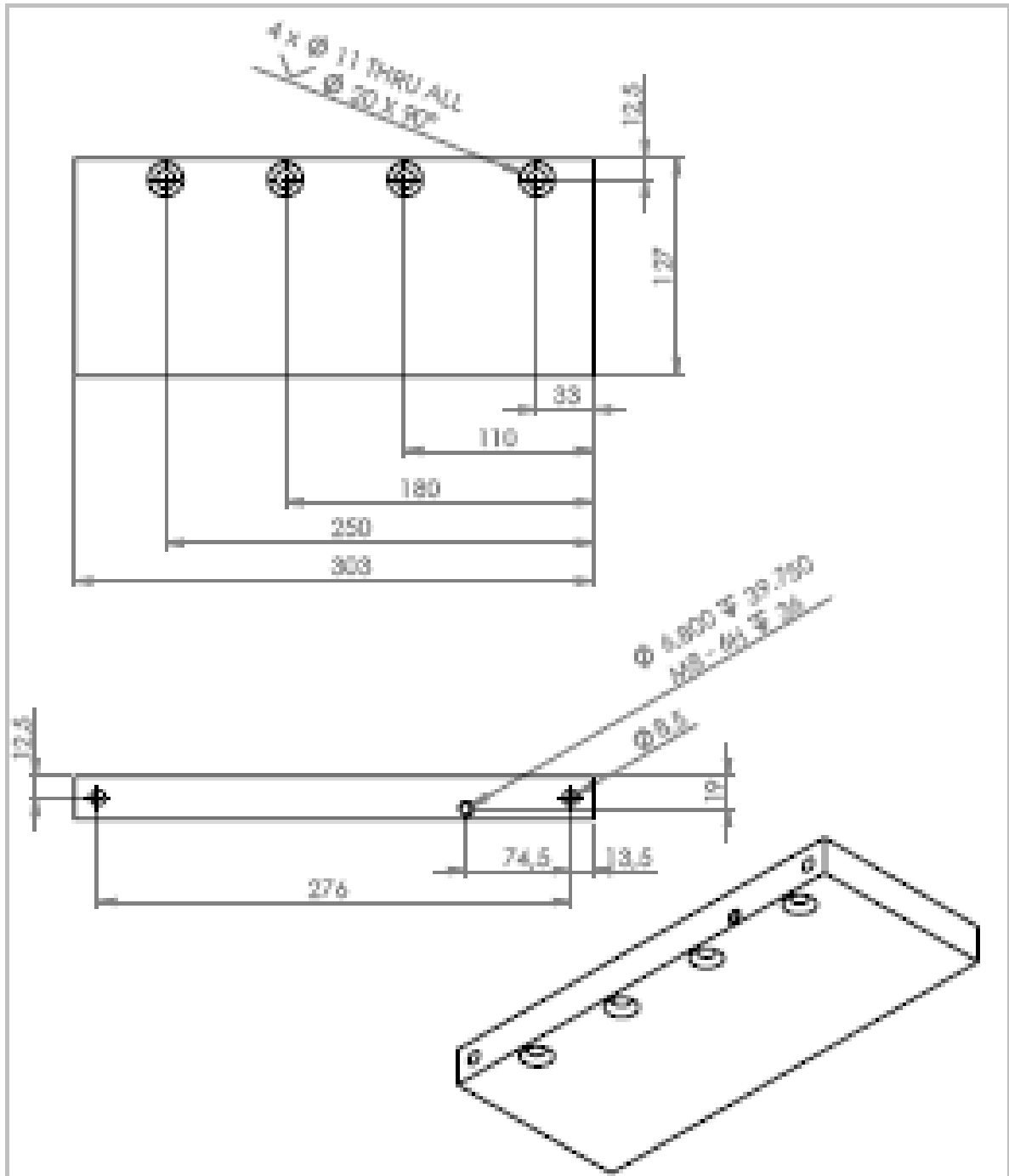








UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		DRESS AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN									
CHECK									
APPROV									
MFG									
QA						MATERIAL:		DWG NO. Suporte_Cima	
								A4	
						WEIGHT:		SCALE: 3:3	
								SHEET 1 OF 1	



PROJETO: [] TÍTULO: [] DATA: []		Nº DO PROJETO: [] Nº DA FOLHA: []		DATA DE CRIAÇÃO: [] DATA DE ATUALIZAÇÃO: []		DATA DE APROVAÇÃO: [] LOCAL: []	
NOME: [] FUNÇÃO: [] ASSINATURA: []		NOME: [] FUNÇÃO: [] ASSINATURA: []		NOME: [] FUNÇÃO: [] ASSINATURA: []		NOME: [] FUNÇÃO: [] ASSINATURA: []	
TÍTULO: Suporte_Baixo		NOME: []		FUNÇÃO: []		ASSINATURA: []	
DATA: []		DATA: []		DATA: []		DATA: []	

Anexo C - Características e dimensões do rolamento 6301-2RSH



Rolamentos rígidos de esferas, uma carreira, vedantes de contato em ambos os lados

Tolerâncias, ver texto também
 Folga interna radial, ver texto também
 Ajustes recomendados
 Tolerâncias do eixo e da caixa

Dimensões principais	Capacidades de carga		Carga limite de fadiga P_u	Velocidades		Velocidade limite	Massa	Designação
	dinâmica	estática		Velocidade de referência				
d	D	B	C	C_0			kg	* - Rolamento SKF Explorer
12	37	12	10,1	4,15	-	14000	0,050	6301-2RSH*

