



HENRIQUE DE JESUS PINTO MARQUES

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE AUTOMÓVEL ELÉTRICO

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Universidade NOVA de Lisboa
⟨Setembro⟩, ⟨2022⟩

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE AUTOMÓVEL ELÉTRICO

HENRIQUE DE JESUS PINTO MARQUES

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Pedro Miguel Ribeiro Pereira

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Fernando José Almeida Vieira do Coito

Professor Associado, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa

Arguente: João Francisco Alves Martins

Professor Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa

Orientador: Pedro Miguel Ribeiro Pereira

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa

Desenvolvimento de um protótipo de automóvel elétrico

Copyright © Henrique de Jesus Pinto Marques, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

-
1. *Discovery consists of seeing what everybody has seen and thinking what nobody else has thought.*

- Albert Szent-Györgyi, 1937

1. *Being second is to be the first of the ones who lose.*

- Ayrton Senna, 1987

RESUMO

A sociedade está cada vez mais consciencializada para as drásticas alterações climáticas que se tem vindo a testemunhar nos últimos tempos, e como tal, já há alguns anos que se tenta contrariar essas tendências que são prejudiciais para o equilíbrio do meio ambiente.

A Indústria Automóvel (IA) tem participado nessa batalha, nomeadamente com a tentativa de reduzir as emissões de Dióxido de Carbono (CO_2), apostando na mobilidade eléctrica, com o objetivo de reduzir o consumo de combustíveis fósseis através da progressiva substituição dos veículos rodoviários com motor a combustão, ainda a maior parte dos veículos em circulação, por Veículos Eléctricos (VE).

Os VE apresentam uma performance superior aos veículos convencionais, nomeadamente no que diz respeito às emissões de CO_2 , a eficiência do motor e a produção de ruído.

Cada vez mais se promovem competições dedicadas aos desportos motorizados eléctricos, o que resulta numa preciosa ajuda para o desenvolvimento dos VE. Actualmente começam já a ser mensuráveis as vantagens desse investimento, com o surgimento de mais engenheiros e estudantes de engenharia aliciados a desenvolver soluções para a mobilidade eléctrica.

Ao longo desta Dissertação de Mestrado fez-se pesquisa, formulação matemática e simulação para o desenvolvimento de um VE, nomeadamente de um *Kart* Eléctrico (KE). Finalizando com a aquisição e modificação de um VE.

Palavras-chave: Veículo Eléctrico, Simulação, Desenvolvimento de Protótipo.

ABSTRACT

Society is getting more and more aware of the drastic climate changes that we have been witnessing these days, and so we have been trying to reverse such harmful tendencies to our environment for several years.

The automotive industry has joined this battle, in what regards the attempt to reduce (CO_2) emissions, by investing on electric mobility, with the objective of reducing consumption of fossil fuels through the progressive replacement of road vehicles with combustion engines, still the largest slice of the circulating vehicles, with electric ones.

Electric vehicles have proved to perform better than conventional vehicles, namely with regard to CO_2 emissions, engine efficiency and noise production.

Several competitions, entirely dedicated to electric motor sports, are being promoted, resulting in, already measurable advantages. One example is the large number of engineers and engineering students being enticed to develop solutions for electric mobility.

Throughout this Master's Thesis did research, mathematical formulation and simulation for the development of an electric vehicle, namely an electric kart. Ending with the acquisition and modification of an electric vehicle.

Keywords: Electric Vehicle, Simulation, Prototype Development.

ÍNDICE

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Acrónimos	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Enquadramento	2
1.3 Objectivos	3
1.4 Contributo	3
1.5 Organização	3
2 Fundamentos dos Veículos Eléctricos	5
2.1 Introdução	5
2.2 Automóveis Eléctricos	5
2.2.1 Uma breve História	5
2.3 Kart Eléctrico	7
2.4 Motor Eléctrico	8
2.4.1 Motor AC de Indução	9
2.4.2 Motor DC de Magnetos Permanentes	11
2.4.2.1 Motor DC de Magnetos Permanentes com Escovas (PMDC)	11
2.4.2.2 Motor DC de Magnetos Permanentes sem Escovas (BLDC)	12
2.5 Baterias	13
2.5.1 Bateria de Ácido-Chumbo (PbO_2)	13
2.5.2 Baterias Alcalinas	14
2.5.2.1 Bateria de Níquel-Cádmio (NiCd)	14
2.5.2.2 Bateria de Níquel-Hidreto Metálico (NiMH)	15
2.5.3 Bateria de Cloreto de Sódio-Níquel ($Na - NiCl_2$)	15
2.5.4 Bateria de Sódio-Enxofre (NaS)	16
2.5.5 Bateria Ião de Lítio (Li-ion)	17
2.6 Análise de Projectos Desenvolvidos	20
2.6.1 Projecto 1	20

2.6.2	Projecto 2	23
2.6.3	Projecto 3	25
2.6.4	Projecto 4	26
2.6.5	Síntese dos Projectos Desenvolvidos	28
3	Formulação Matemática	29
3.1	Introdução	29
3.2	Formulação Matemática	29
3.3	Exemplos de Aplicação	32
3.3.1	Exemplo 1	32
3.3.2	Exemplo 2	33
3.3.3	Exemplo 3	34
3.3.4	Comparação dos Resultados	34
4	Simulação	35
4.1	Introdução	35
4.2	<i>Software</i> de Simulação	35
4.2.1	Bateria	37
4.2.2	Controlador	38
4.2.3	Motor	40
4.2.4	Estrutura do <i>Kart</i>	40
4.3	Especificações dos Componentes para o Projecto do <i>Kart</i>	42
4.3.1	Comparação entre os Projectos Desenvolvidos	42
4.3.2	Especificação do Motor	42
4.3.3	Especificação da Bateria	43
4.3.4	Especificação do Controlador	45
4.3.5	Esquemático da Arquitectura para o Projecto do <i>Kart</i>	45
5	Implementação e Resultados Experimentais	47
5.1	Introdução	47
5.2	Implementação do Veículo Eléctrico	47
5.3	Cálculos Teóricos	54
5.4	Simulação	55
5.5	Resultados Experimentais	57
5.6	Conclusão	59
6	Conclusões e Futuros Trabalhos	61
6.1	Conclusões	61
6.2	Futuros Trabalhos	62
	Bibliografia	65

LISTA DE FIGURAS

2.1	Primeiro carro eléctrico, de <i>Gustave Trouvé</i> [8].	5
2.2	O <i>La Jamais Contente</i> de <i>Camille Jenatzy</i> [9].	6
2.3	GM <i>EV1</i> ¹	6
2.4	<i>Tesla Roadster</i> com motor AC de indução [12].	7
2.5	O primeiro <i>kart</i> [13].	7
2.6	Tipologias de ME.	9
2.7	Motor AC de Indução ¹	10
2.8	Diagrama do Motor AC de Indução [12].	10
2.9	Motores DC de Magnetos Permanentes ²	11
2.10	Diagrama do Motor PMDC [12].	12
2.11	Diagrama do Motor BLDC [12].	12
2.12	Bateria de Ácido-Chumbo [11].	14
2.13	Representação simplificada de uma célula de bateria de NiCad [11].	14
2.14	Bateria NiMH de terceira geração da <i>Toyota</i> [11].	15
2.15	Bateria de Cloreto de Sódio-Níquel ³	15
2.16	Bateria de Sódio-Enxofre [16].	16
2.17	Baterias de Ião de Lítio [11].	17
2.18	Funcionamento básico de uma bateria de Ião de Lítio [11].	18
2.19	Estrutura do <i>kart</i> do projecto 1 [19].	20
2.20	Arquitectura do <i>kart</i> do projecto 1 [19].	21
2.21	<i>Kart</i> do projecto 1 equipado com todos os componentes [19].	22
2.22	<i>Kart</i> do projecto 2 [20].	23
2.23	Motor usado no <i>kart</i> do projecto 2 [20].	23
2.24	Baterias usadas no <i>kart</i> do projecto 2 [20].	24
2.25	Esquema do controlador do <i>kart</i> do projecto 2 [20].	24
2.26	Controlador <i>Kelly</i>	24
2.27	Arquitectura do <i>kart</i> do projecto 2 [20].	24
2.28	<i>Kart</i> do projecto 3 [21].	25
2.29	Motor usado no <i>kart</i> do projecto 3 [21].	25
2.30	Baterias usadas no <i>kart</i> do projecto 3 [21].	25
2.31	Módulo dos ultracondensadores usados no <i>kart</i> do projecto 3 [21].	25
2.32	Controlador do <i>kart</i> do projecto 3 [21].	25

2.33	Arquitectura do <i>kart</i> do projecto 3 [21].	26
2.34	Arquitectura do <i>kart</i> do projecto 4.	26
2.35	Controlador do <i>kart</i> do projecto 4 [22].	27
2.36	Fusível de 250A usado no projecto 4.	28
2.37	Solenóide usado no projecto 4.	28
2.38	Fusível de 5A usado no projecto 4.	28
2.39	Interruptor usado no projecto 4.	28
3.1	Desenho ilustrativo que representa o <i>kart</i> e algumas das diferentes forças aplicadas no corpo [23].	30
3.2	Imagem frontal de um <i>kart</i> , exemplo genérico com incógnitas ⁴	31
3.3	Imagem frontal de um <i>kart</i> , as dimensões do desenho são exemplificativas e não correspondem à realidade ⁵	32
4.1	Esquemático geral do <i>kart</i> no <i>software</i> de simulação.	36
4.2	Gráfico que representa o resultado geral da simulação por um período de 70 segundos.	36
4.3	A parte da bateria do <i>kart</i>	37
4.4	Gráfico que indica o ECB após uma simulação por um período de 70 segundos.	38
4.5	A parte de controlo do <i>kart</i>	38
4.6	Motor do <i>kart</i>	40
4.7	Módulo da estrutura do <i>kart</i>	41
4.8	Gráfico de cada roda que representa a força (N) associada ao deslizamento relativo entre o pneu e o piso, por um período de 70 segundos.	41
4.9	Motor DC de Magnetos Permanentes com Escovas (PMDC).	43
4.10	Bateria de Ião de Lítio.	44
4.11	Bateria de Ácido-Chumbo.	44
4.12	Gráfico comparativo da Potência Específica em relação à Energia Específica, para os diferentes tipos de armazenamento de energia ⁶	44
4.13	Controlador da <i>Alltrax</i> [22].	45
4.14	Controlador da <i>Alltrax</i>	46
5.1	VE inicial, sem modificações.	47
5.2	KE desmontado, sem as estruturas de fibra de vidro.	48
5.3	Posição original do volante.	48
5.4	Posição final do volante.	48
5.5	Articulações da coluna de direção.	49
5.6	Pedais originais.	49
5.7	Pedais após as modificações.	49
5.8	Posição original do conjunto das baterias.	49
5.9	Posição original do conjunto das baterias, vista de outro ângulo.	50
5.10	Reorganização da posição do conjunto das baterias.	50

5.11	Proteções do KE.	51
5.12	Proteções das baterias que estão nas laterais do assento do piloto.	51
5.13	Proteções traseira do <i>kart</i>	51
5.14	Assinalado a verde está a posição original da tomada de carregamento.	52
5.15	Nova localização da tomada de carregamento.	52
5.16	Assinalado a verde está a posição original do botão andar/rebocar.	52
5.17	Nova localização do botão andar/rebocar.	52
5.18	Assinalado a verde está a posição original do botão frente/trás.	52
5.19	Nova localização do botão frente/trás.	52
5.20	Motor DC, controlador, selenoide, entre outros componentes.	53
5.21	Apresentação final da parte de controlo e do motor DC	53
5.22	Esquemático do motor DC, imagem retirada do manual de fábrica [24].	53
5.23	Apresentação final do KE.	54
5.24	Gráfico que representa o resultado geral da simulação por um período de 70 segundos.	55
5.25	Gráfico que representa o resultado geral da simulação por um período de 70 segundos.	56
5.26	Gráfico que indica o ECB após uma simulação por um período de 70 segundos.	56
5.27	Gráfico de cada roda que representa a força (N) associada ao deslizamento relativo entre o pneu e o piso, por um período de 70 segundos.	57
5.28	Proteções traseira do <i>kart</i>	58
5.29	Gráfico que representa o resultado geral da simulação por um período de 70 segundos.	60

LISTA DE TABELAS

2.1	Vantagens de ambos os motores, motores DC e motores AC ⁷	8
2.2	Comparação entre os diferentes tipos de baterias de Lítio, em relação à energia específica e à densidade de energia [17].	19
2.3	Síntese dos vários projectos que foram analisados previamente.	28
3.1	Tabela de comparação dos resultados dos cálculos estudados	34
4.1	Comparação entre os vários projectos que foram analisados previamente. . .	42
4.2	Comparação entre as baterias que foram estudadas [11].	43
5.1	Testes cronometrados até atingir a VM e metade da VM, numa estrada plana	58
5.2	Testes cronometrados até atingir a VM e metade da VM, num plano inclinado no sentido ascendente	59
5.3	Testes cronometrados até atingir a VM e metade da VM, num plano inclinado no sentido descendente	59

ACRÓNIMOS

AC *Alternating Current.*

AE Automóvel(is) Eléctrico(s).

AH Automóvel(is) Híbrido(s).

BLDC Motor DC Magnetos Permanentes sem Escovas.

DC *Direct Current.*

ECB Estado de Carga da Bateria.

EUA Estado Unidos da América.

F1 *Formula 1.*

FIA Federação Internacional de Automobilismo.

GM *General Motors.*

IA Indústria Automóvel.

KE *Kart(s)* Eléctrico(s).

ME Motor Eléctrico.

MI Motor de Indução.

MIT *Massachusetts Institute of Technology.*

MOSFET *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.*

OPEP Organização dos Países Exportadores de Petróleo.

PM Motores DC de Magnetos Permanente.

PMDC Motor DC Magnetos Permanentes com Escovas.

PWM *Pulse-Width Modulation.*

SUV *Sport Utility Vehicle(s).*

ACRÓNIMOS

UE União Europeia.

USB *Universal Serial Bus*.

VE Veículo(s) Eléctrico(s).

VM Velocidade Máxima.

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Nos últimos anos a humanidade tem vindo a alterar as suas prioridades no que diz respeito à inovação e tecnologia, havendo espaço para maiores preocupações com as questões ambientais, nomeadamente com as emissões de CO_2 e radicais livres, e o seu efeito nefasto na atmosfera, seja a destruição da camada de ozono, seja o aumento dos gases com efeito de estufa.

Segundo diversos estudos, o sector dos transportes é um dos principais causadores de emissões de CO_2 , correspondendo a 30% das emissões de CO_2 produzidas na União Europeia (UE), dos quais 72% dessa mesma fatia são provenientes dos transportes rodoviários.

A Europa dá sinais de mudança em relação aos automóveis, foram registados mais carros com sistemas de propulsão eléctrica (onde incluem veículos 100% eléctricos e veículos híbridos) do que automóveis com motor a diesel [1].

A motivação para realização desta Dissertação é essa mesma crescente de responsabilidade para os impactos ambientais provenientes dos automóveis convencionais, e toda a responsabilidade mundial para tentar mudar esse paradigma assim, umas das soluções passa pelo desenvolvimento dos VE, pois são directamente livres de emissões de gases de efeito estufa.

Por outro lado, o interesse em desportos motorizados, mais concretamente o desporto automobilístico, e com o objectivo do enriquecimento dos conhecimentos na área dos VE, tal como os métodos de armazenamento de energia, os motores eléctricos *Direct Current* (DC) e *Alternating Current* (AC)) e toda a parte de gestão e controlo de energia de um KE.

1.2 Enquadramento

A Europa está em processo de irradicação dos automóveis que utilizam 100% da sua energia gerada proveniente de um combustível fóssil, principalmente os motores movidos a gasóleo mas também os carros a gasolina. Como se pode observar pelo exemplo do Reino Unido, em que o seu primeiro-ministro anunciou a proibição da venda de automóveis que utilizam como fonte de locomoção a energia fóssil, nomeadamente o gasóleo e a gasolina [2].

Dada a situação crítica que vivemos actualmente devido à pandemia, todo o comércio global diminuiu e o sector dos transportes não foi excepção. A venda de automóveis caiu drasticamente no ano de 2020, porém as vendas de Automóveis Eléctricos (AE) duplicaram (aumentaram 216,9%) e as vendas de Automóveis Híbridos (AH) triplicaram (aumentaram 331%). Estes aumentos verificaram-se em 2020 em comparação com as vendas de 2019, que só por si já tinha sido o melhor ano de vendas de AE e AH [3].

Não é só o comércio automóvel que tem apostado cada vez mais em VE mas também os desportos motorizados tem apostado muito no sector dos eléctricos, aliás a maior inovação dos últimos 10 anos por parte dos desportos motorizados foi a implementação de campeonatos dedicados totalmente aos automóveis de competição 100% eléctricos. Em 2014/2015 estrearam-se as grandes competições automobilísticas com a *Formula E*, prova em que o vencedor do campeonato 2019/2020 foi o português António Félix da Costa [4]. Em 2019 surgiu a *MotoE*, com motos movidas 100% a energia eléctrica. Em 2021 estreou uma nova competição dedicada aos VE, de nome *Extreme E* que conta com a presença de *Sport Utility Vehicles* (SUV) eléctricos e tem como cenário corridas de resistência todo-terreno (*endurance off-road*) [5]. Inclusivamente, o *Rally Dakar 2021* teve algumas etapas adaptadas para promover e testar o desempenho do protótipo de SUV eléctrico. Quem sabe no futuro o próprio *Rally Dakar* tenha uma categoria dedicada exclusivamente a veículos 100% eléctricos.

Associados a um desporto motorizado, os *karts* fazem parte do início da carreira de qualquer piloto e como tal, o avanço tecnológico que envolve os AE tinha que passar também pelos *karts*. Certamente haverá provas dedicadas exclusivamente aos KE, porém a nível mundial não há nenhum campeonato de KE oficializado pela Federação Internacional do Automóvel (FIA).

Importa lembrar que a FIA lançou uma campanha para se tornar neutra em emissões de carbono, até 2030 [6]. Essa reestruturação aborda todas áreas da competição, desde a logística, aos escritórios, as fábricas e até mesmo o tipo de combustível utilizado. Em dezembro de 2020 a FIA alegou ter desenvolvido um combustível 100% sustentável, uma espécie de gasolina sintética [7].

Inicialmente a *Formula 1* (F1) ponderou em passar os seu motores para eléctricos, mas tal não é possível pois a FIA já tem a *Formula E* que é uma categoria dedicada exclusivamente aos AE. Dada essa exclusividade, a F1 não pode usar motores 100% eléctricos [4].

Esta progressão no avanço tecnológico do desenvolvimento de soluções mais ecológicas para os desportos motorizados vai influenciar todo o mercado automóvel e por sua vez vai reduzir os efeitos colaterais ao meio ambiente e os seus ecossistemas.

1.3 Objectivos

O objectivo desta Dissertação passa por fazer um estudo sobre AE para posterior desenvolvimento de um KE.

Para tal, primeiramente serão estudados os componentes constituintes do AE, nomeadamente toda a parte de controlo utilizada na gestão energética, assim como os vários tipos de motores elétricos (tanto os de AC bem como os de DC) e os diferentes equipamentos de armazenamento de energia, tal como as baterias.

Numa segunda fase será realizada uma simulação para verificar o seu desempenho, de forma a obter os componentes mais adequados para o KE, de acordo com as especificações do projecto.

A última fase será o momento da execução propriamente dita, fazer a adaptação do KE, tendo em conta vários factores como: equilíbrio, centro de gravidade, aerodinâmica, entre outros.

1.4 Contributo

No âmbito desta Dissertação desenvolveu-se um modelo de simulação para um VE, num *software* de simulação, de forma a obter mais informação sobre o comportamento de um VE genérico. Neste caso o modelo de simulação foi configurado com os dados de um KE.

No seguimento desenvolveu-se um KE de forma a satisfazer as necessidades da proposta inicial do projecto, usando um VE como base para execução do protótipo.

1.5 Organização

A Dissertação está dividida em 6 capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada a introdução, que refere as motivações que levaram à escolha deste tema, o enquadramento da presente Dissertação com o tema escolhido, o objectivo desta Dissertação, o meu contributo e por fim uma resumida organização da estrutura da Dissertação.

No segundo capítulo são descritos os “Fundamentos dos Veículos Eléctricos”, sendo apresentado um breve estudo sobre os AE desde os primórdios até aos tempos actuais, passando pelos os vários tipos de motores, os sistemas de controlo e gestão de energia e os diferentes equipamentos de armazenamento de energia. Neste capítulo também foram enumeradas alguns projectos semelhantes a esta Dissertação.

No terceiro capítulo é apresentada a formulação matemática em que consiste nos conceitos teóricos para avaliação de desempenho do veículo e posteriormente a realização dos cálculos com recurso a alguns exemplos demonstrativos.

No quarto capítulo é elaborado o modelo de simulação, num *software* apropriado, para um VE genérico.

No quinto capítulo é efectuada a implementação do VE e são aferidos os respectivos resultados experimentais.

Para terminar, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões extraídas do estudo realizado para a execução desta Tese, bem como serão citados futuros trabalhos que podem ser desenvolvidos com base nesta Dissertação.

FUNDAMENTOS DOS VEÍCULOS ELÉCTRICOS

2.1 Introdução

Neste capítulo será abordado um pouco da história e de como surgiram os AE. Será feita a caracterização de alguns motores, nomeadamente os que são utilizados pelos AE. O mesmo trabalho será feito para o estudo de diversas baterias. Por fim será feito uma breve abordagem de projectos semelhantes já desenvolvidos.

2.2 Automóveis Eléctricos

2.2.1 Uma breve História

Os VE surgiram por volta dos anos 30 do século XIX. Mas só em 1881, o francês *Gustave Trouvé* inventou o que é considerado o primeiro carro eléctrico, que era nada mais nada menos que um triciclo movido por um motor DC com 0,1hp [8].



Figura 2.1: Primeiro carro eléctrico, de *Gustave Trouvé* [8].

A 29 de Abril de 1899 na cidade de Paris, testemunha-se o primeiro automóvel eléctrico a ultrapassar a barreira dos 100 km/h, o *La Jamais Contente* que fixou o record da época em 105,85km/h (+/- 65mph). Este carro, bastante conhecido pela sua aerodinâmica única em forma de torpedo, foi projectado pelo belga *Camille Jenatzy*.



Figura 2.2: O *La Jamais Contente* de *Camille Jenatzy* [9].

Embora os AE demonstrassem ser uma boa solução por terem um bom desempenho e serem óptimos para o meio ambiente, apresentavam algumas fragilidades, como o custo da tecnologia, tempo de carga da bateria assim como a sua autonomia. Por esses motivos, bem como o baixo preço do petróleo, a IA abandonou por umas décadas as soluções rodoviárias eléctricas.

Em 1973, os AE surgem de novo na equação aquando do embargo que os países da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) fizeram sobre o petróleo aos Estados Unidos da América (EUA) e à Europa. Ainda assim, isto não foi suficiente para dar destaque aos AE.

Só a partir dos anos 90 é que se começaram a promover os AE, com mais entusiasmo, em 1996 a *General Motors* (GM) lançou o GM EV1, mas o projecto não foi bem sucedido, sendo que até 2004 foram todos retirados de circulação¹.



Figura 2.3: GM EV1¹.

¹Segundo o documentário "Who Killed the Electric Car?" do realizador *Chris Paine*, estreado em 2006

A *Tesla*, a empresa que atualmente domina o mercado automóvel dos eléctricos, surge em 2003 [10] e [11]. Em 2008 é lançado o *Tesla Roadster*, um pioneiro no mundo dos carros eléctricos desportivos, capaz de ir dos 0-100 km/h em pouco mais de 3,85s [12]. Desde então, este gigante do sector, já produziu vários automóveis 100% eléctricos, como são o *Model S*, o *Model X*, entre outros.



Figura 2.4: *Tesla Roadster* com motor AC de indução [12].

Entretanto já outras marcas aumentaram as suas apostas nos AE, tal como a *Nissan*, *Toyota*, *Mitsubishi*, *Renault*, *Honda*, entre outras. Os AE são o tipo de veículos cada vez mais desejados.

2.3 *Kart* Eléctrico

O primeiro *kart* surgiu em Agosto de 1956 na Califórnia, EUA, construído pelos os amigos *Art Ingels* e *Lou Borelli* apenas para fins lúdicos.



Figura 2.5: O primeiro *kart* [13].

Logo no início do ano seguinte, em Março de 1957, começaram a surgir os primeiros fabricantes de *karts*. Inicialmente para pequenas corridas entre amigos, mas logo no final desse ano foi realizada o que é considerada como a primeira prova oficial da história do *karting* [13].

Este é um desporto muito promissor para as camadas mais jovens do universo automobilístico, e que acaba por ser o ponto de partida para qualquer carreira de piloto.

Em Portugal existe o *EcoKart Portugal*, um projecto dedicado aos KE, tendo uma componente solidária junto de instituições do sector social e ainda, uma vertente ambiental, fazendo acções de sensibilização e utilizando energia 100% eléctrica nos seus *karts*.

2.4 Motor Eléctrico

O Motor Eléctrico (ME) é o equipamento principal de um VE, pois é ele que vai gerar o movimento necessário para o deslocamento do veículo, através da energia eléctrica. A função deste tipo de motor é converter a energia eléctrica em energia mecânica de forma a gerar um movimento de tração no veículo, porém os ME têm a possibilidade de fazer o processo inverso, ou seja transformar a energia mecânica em energia eléctrica. Neste caso é a energia cinética proveniente do movimento do automóvel que na desaceleração vai ser transformada em energia eléctrica, sendo que posteriormente será armazenada nas baterias [8].

Analisando as diferenças entre os motores AC e os motores DC, as principais vantagens dos motores AC são a redução da fricção nos componentes, pois este motor tem a capacidade de iniciar o seu movimento em baixa potência; a possibilidade de variar a frequência para alterar a velocidade; a sua alta durabilidade e a sua maior longevidade comparativamente aos motores DC.

Relativamente a esta segunda tipologia de motores, as principais vantagens são a sua alta potência inicial e o seu alto binário instantâneo, dependendo da finalidade do motor pode ser essencial ter essas características e também o facto de se encontrar disponível em várias tensões já padronizadas.

Motores AC que são alimentados por corrente alternada	Motores DC que são alimentados por corrente contínua
 Exigem uma baixa potência para inicializar, o que também protege os seus componentes.	 Instalação e manutenção mais simplificada.
 Controlo dos vários níveis potência e aceleração.	 Alta potência de inicialização e com um bom binário.
 Inversor de frequência que pode controlar a velocidade e o binário em diferentes estágios de uso.	 Tempos rápidos de resposta para iniciar, parar e acelerar.
 Alta durabilidade e maior longevidade.	 Disponibilidade em várias tensões padrão.

Tabela 2.1: Vantagens de ambos os motores, motores DC e motores AC².

²Retirado do site <https://www.gainesvilleindustrial.com/blog/ac-dc-motors/>, acedido no dia 07/02/2021

Porém falar apenas em motores DC e motores AC é redutor, pois em cada classe temos vários tipos de motores.

Os ME podem ser categorizados com base em diversos critérios a partir de vários princípios: sincronicidade, comutação, tipo de corrente, número de fases, etc. Este trabalho contrapõe os motores DC e AC, que por sua vez estes são divididos em motores síncronos ou motores assíncronos.

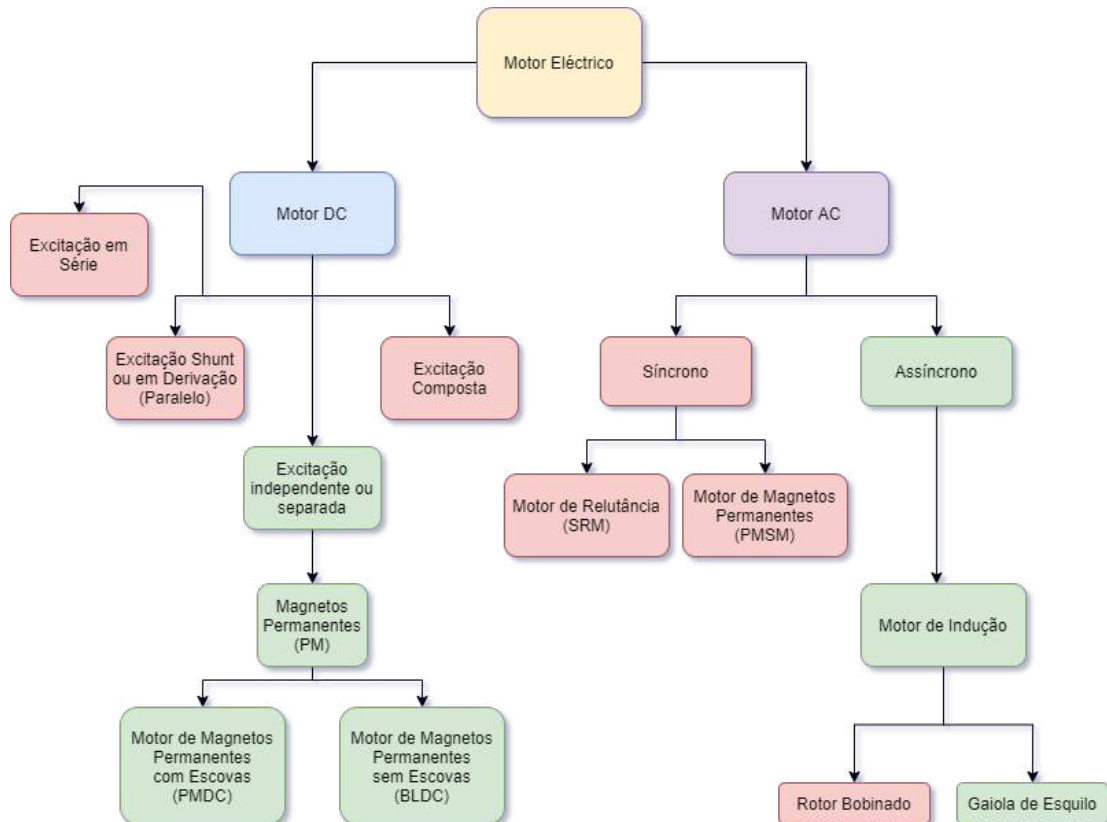
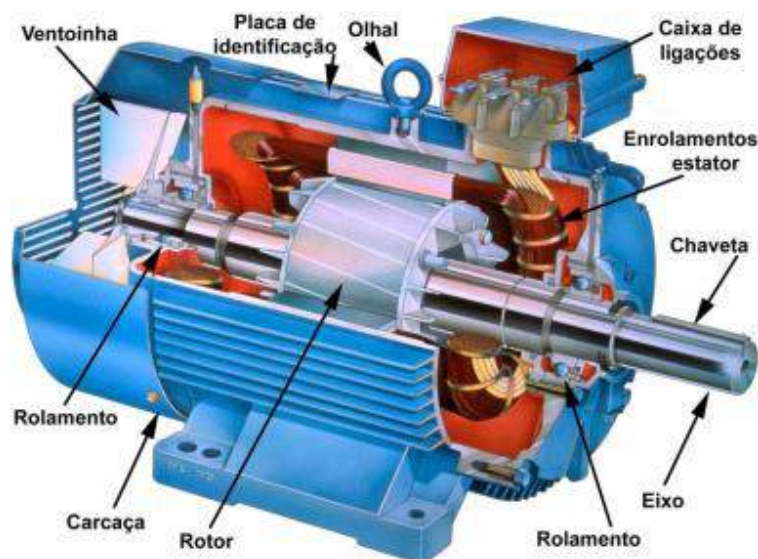


Figura 2.6: Tipologias de ME.

Na figura 2.6 detalha as tipologias de ME existentes. A sombreado verde estão os motores que serão abordados nesta Dissertação, por se considerarem os mais relevantes para este estudo, nomeadamente por serem os motores mais usados nos AE.

2.4.1 Motor AC de Indução

Com o surgimento de novos desenvolvimentos tecnológicos, ficaram em evidência os motores eléctricos sem comutador, como por exemplo o Motor de Indução (MI). As vantagens deste motor incluem maior eficiência energética, maior densidade de potência e sendo este mais resistente a impactos mecânicos ou vibrações. Ao contrário dos motores DC, os motores AC não necessitam da substituição das escovas pois estes não têm comutador, o que demonstra ser uma vantagem no custo operacional para os motores AC.

Figura 2.7: Motor AC de Indução³.

Existem dois tipos de MI, os motores com rotor bobinado e os motores com rotor em gaiola de esquilo. Os MI com rotor bobinado são menos interessantes que os seus equivalentes os MI com rotor em gaiola de esquilo, uma vez que apresentam maior custo e maior necessidade de manutenção, especialmente aplicado à mobilidade eléctrica. Portanto, quando se utiliza o termo MI está-se na realidade a referir ao MI com rotor em gaiola de esquilo [8].

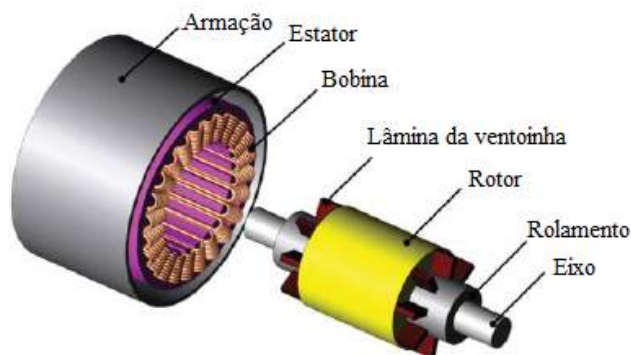


Figura 2.8: Diagrama do Motor AC de Indução [12].

Este é um motor relativamente caro em comparação com os motores DC usados pelos AE, devido à sua complexidade de fabrico, porém são feitos de materiais comuns e relativamente baratos como ferro, cobre e alumínio. Isto leva a que eles sejam amplamente utilizados na indústria, bombas eléctricas, guindastes, tapetes rolantes, elevadores, frigoríficos, unidades de tração, etc. Na verdade, 90% dos motores industriais são MIs [14].

³Retirado do site <https://www.portaleletricista.com.br/motor-de-inducao-funcionalidade-significado-dicas-passo-a-passo/>, acedido no dia 14/04/2021

Na IA é um motor muito utilizado pela *Tesla*, que tem todos os seus modelos equipados com Motores AC de Indução com rotor em gaiola de esquilo [15].

2.4.2 Motor DC de Magnetos Permanentes

Embora os motores DC sejam alimentados por uma corrente DC, eles geram uma corrente AC na bobina da armadura por meio de uma comutação mecânica feita entre a escova e o comutador. Os motores DC são populares porque a parte do controlo é mais simples e o seu custo é menor do que o custo dos motores AC. Eles ainda são amplamente utilizados em várias áreas, como em sistemas de tração, acionamentos de moinhos, *robots*, impressoras, utensílios eléctricos de limpeza, vidros eléctricos, entre outros exemplos. No entanto, os motores DC são inferiores aos motores AC em questão de densidade de potência e eficiência energética.



Figura 2.9: Motores DC de Magnetos Permanentes⁴.

Com o aumento da potência do motor DC, também a dimensão do comutador precisa de ser aumentada para fornecer uma corrente maior, bem como o isolamento de tensão tem que ser mais eficiente entre os componentes vizinhos do comutador. Isto faz com que a dimensão do comutador seja uma limitação para a velocidade máxima e a potência nominal do motor DC.

Os Motores DC de Magnetos Permanentes (PM) podem ser categorizados em Motor DC de Magnetos Permanentes com Escovas (PMDC) e em Motor DC de Magnetos Permanentes sem Escovas (BLDC) [14].

2.4.2.1 Motor DC de Magnetos Permanentes com Escovas (PMDC)

No geral, os motores DC precisam de comutadores e escovas para alimentar a armadura, tornando-se menos confiáveis, são inadequados para as altas velocidades e ainda

⁴Retirado do site <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/> , acedido no dia 25/02/2022

requerem a manutenção da substituição das escovas quando necessário. Além disso, são motores DC demasiado pesados, logo têm uma baixa densidade de potência. No entanto, por causa da sua tecnologia amadurecida e um sistema de controlo simples, o motor DC têm sido proeminentes em sistemas de propulsão eléctrica [8].

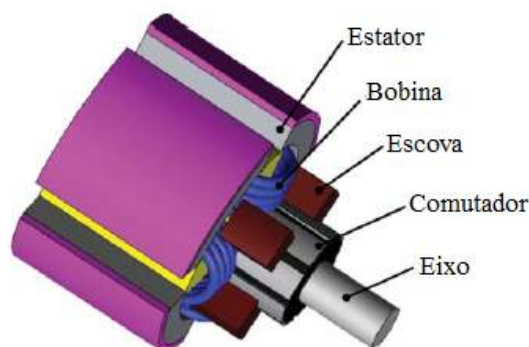


Figura 2.10: Diagrama do Motor PMDC [12].

Um exemplo de um AE que usa os motores PMDC é o *Nissan Leaf EV* [15].

2.4.2.2 Motor DC de Magnetos Permanentes sem Escovas (BLDC)

A vantagem mais óbvia destes motores é a remoção das escovas, o que possibilita uma fácil manutenção. A configuração sem escovas permite mais área de contacto da secção transversal com os enrolamentos da armadura, como a condução de calor através da estrutura é melhor, gera-se um aumento na carga eléctrica o que resulta numa maior densidade de potência. Os motores BLDC geralmente operam com sensores de posição do eixo mas mais recentemente foram desenvolvidas tecnologias que não necessitam destes sensores [8].

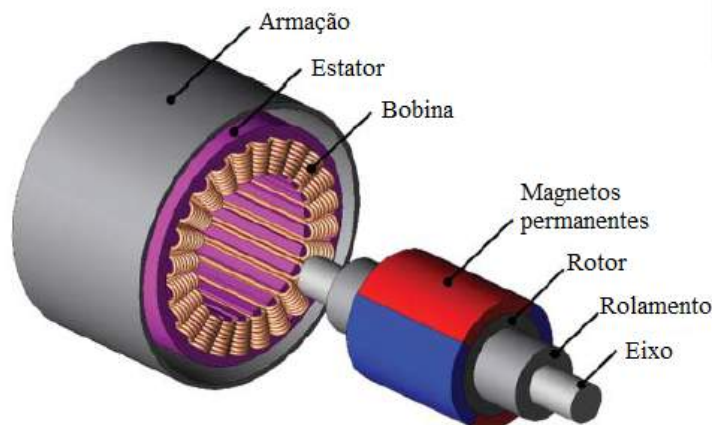


Figura 2.11: Diagrama do Motor BLDC [12].

Entre os AE este tipo de motor é um dos mais utilizados como por exemplo é instalado no *Chevrolet Bolt EV* [15].

2.5 Baterias

Neste subcapítulo serão abordados os diferentes tipos de baterias [11]. Há várias possibilidades de escolha no tipo de bateria, como por exemplo: Ácido-Chumbo, Níquel-Cádmio, Níquel-Hidreto Metálico, Cloreto de Sódio-Níquel, Sódio-Enxofre, Ião de Lítio, entre outras. Para além das baterias também há como sistemas de armazenamento de energia: o volante de inércia e os ultracondensadores, ambos utilizados na travagem regenerativa, sendo este um mecanismo em que durante o processo de travagem se recupera a energia.

A bateria é um componente que, por meio de uma reação química, proporciona a troca de eletrões entre o terminal positivo (cátodo) e o terminal negativo (ânodo), resultando numa libertação de energia, posteriormente transformada em corrente eléctrica disponível.

O tempo de descarga de uma bateria é condicionado por diversos factores como são os ciclos de vida, potência consumida e a temperatura ambiente, sendo que as baterias têm eficiência máxima em temperaturas moderadas. Os fabricantes geralmente consideram o fim de vida de uma bateria quando a capacidade da bateria cai para 80% de sua capacidade nominal.

2.5.1 Bateria de Ácido-Chumbo (PbO_2)

A bateria de Ácido-Chumbo foi inventada pelo físico francês *Gaston Planté* em 1859. Mesmo após cerca de 150 anos de desenvolvimento e muitas pesquisas promissoras em outras técnicas de armazenamento de energia, a bateria de Ácido-Chumbo é ainda a melhor escolha para uso em veículos motorizados de baixa tensão. Isto é particularmente verdade quando o custo e a densidade de energia são levados em conta.

No entanto, as baterias de Ácido-Chumbo não são adequadas para descargas acima de 20% da sua capacidade nominal, logo não são susceptíveis a ciclos completos.

Ao longo dos anos foram feitas mudanças nesta bateria. Actualmente é muito utilizada pois permite que o produto final tenha um preço muito acessível ao cliente.

A estrutura da bateria de Ácido-Chumbo mais comum é a de 12V de tensão nominal que consiste em seis células ligadas em série. Cada célula produz cerca de 2V de tensão e está alojada num compartimento individual dentro de uma caixa de polipropileno ou material similar.

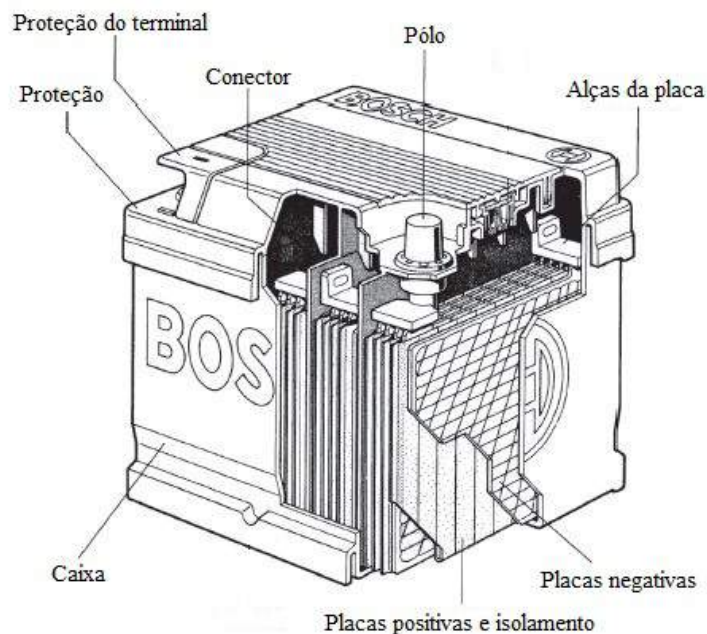


Figura 2.12: Bateria de Ácido-Chumbo [11].

2.5.2 Baterias Alcalinas

2.5.2.1 Bateria de Níquel-Cádmio (NiCd)

O processo de carregamento deste tipo de bateria envolve oxigénio que passa da placa electricamente negativa que contém cádmio (Cd) para a placa positiva que contém hidrato de níquel (NiOOH). Na utilização da bateria acontece o processo inverso, ou seja, a descarga de energia.

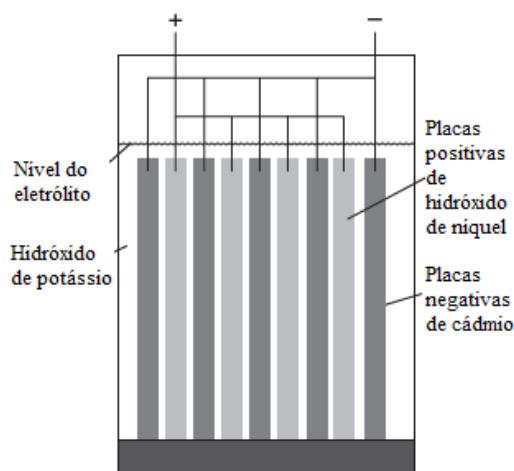


Figura 2.13: Representação simplificada de uma célula de bateria de NiCad [11].

As baterias NiCad não são passíveis de sobrecargar, uma vez que havendo a conversão de óxido de cádmio em cádmio, não é possível que ocorra nenhuma reação.

2.5.2.2 Bateria de Níquel-Hidreto Metálico (NiMH)

As baterias de Níquel-Hidreto Metálico são utilizadas por alguns AE. A *Toyota* em particular foi quem desenvolveu, em 1997, a bateria NiMH cilíndrica que alimentava os seus AE. Desde então, a *Toyota* tem melhorado continuamente as suas baterias de NiMH, reduzindo o seu tamanho, melhorando a densidade de energia, diminuindo o peso, melhorando o isolamento e reduzindo custos.



Figura 2.14: Bateria NiMH de terceira geração da *Toyota* [11].

Os componentes das baterias de NiMH incluem um cátodo de hidróxido de níquel, um ânodo de um metal alcalino que absorva o hidrogénio e um eletrólito que é o hidróxido de potássio (KOH). A densidade de energia do NiMH é mais do dobro da densidade da bateria de ácido-chumbo, mas menor do que a da bateria de ião-lítio.

2.5.3 Bateria de Cloreto de Sódio-Níquel ($Na - NiCl_2$)

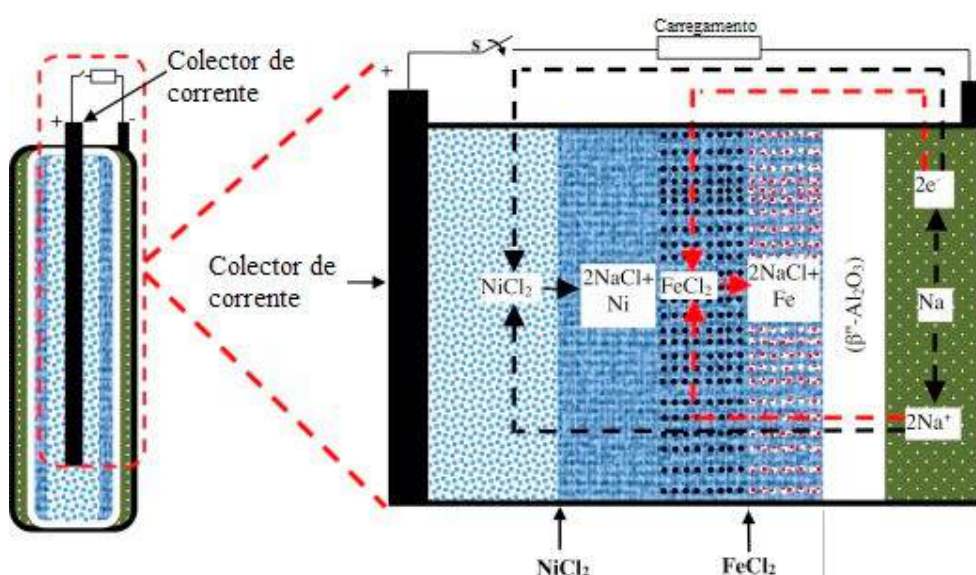


Figura 2.15: Bateria de Cloreto de Sódio-Níquel⁵.

⁵S. D. Sessa, G. Crugnola, M. Todeschini e S. Zin, R. Benato, Sodium nickel chloride battery steady-state regime model for stationary electrical energy storage, *Journal of Energy Storage*, Volume 6, 2016, pp. 105-115, DOI: 10.1016/j.est.2016.03.005.

As baterias de Cloreto de Sódio-Níquel são da classe de baterias que usam sais fundidos como eletrólito, e oferecem alta densidade de energia e alta densidade de potência. A sua capacidade de alta potência é devida à condutividade iónica também alta do sal fundido, que é três vezes maior do que a do ácido sulfúrico presente numa bateria de ácido-chumbo.

Houve um desenvolvimento significativo em relação às baterias recarregáveis usando sódio (Na) para os eléctrodos negativos. O sódio é uma opção interessante devido ao seu alto potencial de energia, baixo peso, abundância relativa, disponibilidade imediata, baixo custo e é um material que não polui.

As baterias recarregáveis de Cloreto de Sódio-Níquel não são apenas usadas em AE, mas também para o armazenamento de energia na rede de distribuição de eletricidade, para estabilizar o fluxo de energia fornecido por fontes de energia renováveis intermitentes, como painéis solares e turbinas eólicas. Estas baterias podem ser armazenadas no seu estado sólido à temperatura ambiente por longos períodos de tempo (por mais de 50 anos), antes de serem ativadas por um processo de aquecimento.

2.5.4 Bateria de Sódio-Enxofre (NaS)

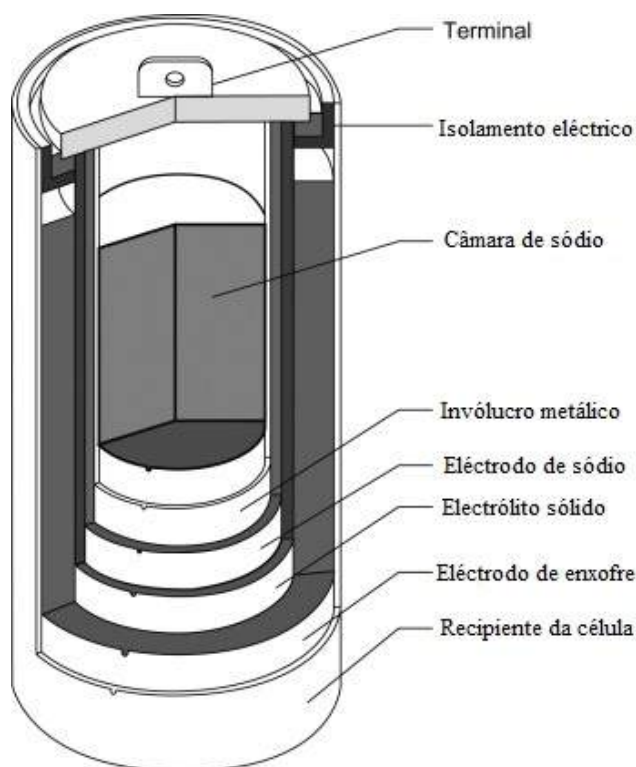


Figura 2.16: Bateria de Sódio-Enxofre [16].

A bateria de Sódio-Enxofre ou NaS consiste num cátodo de sódio líquido no qual é colocado um eléctrodo sólido de alumínio (numa forma de óxido de alumínio), que está em contacto com o ânodo, um eléctrodo de enxofre que envolve todo o conjunto.

O principal problema com este sistema é que a temperatura de funcionamento precisa ser de 300–350°C. Um aquecedor com algumas centenas de *watts* de potência faz parte do circuito de carga, isso mantém a temperatura da bateria constante, quando o veículo não está em funcionamento. Durante o uso a temperatura da bateria mantém-se constante graças à corrente que flui através da resistência da bateria.

Cada célula desta bateria é muito pequena, usando apenas cerca de 15 g de sódio. Este recurso é mais seguro em caso de dano estrutural à célula, o enxofre reagirá com o sódio havendo a formação de polissulfetos, químico comparativamente mais inofensivos. As células pequenas também têm a vantagem de poderem ser distribuídas pelo automóvel. A capacidade de cada célula é de cerca de 10 Ah.

Estas células falham numa condição de circuito aberto e, portanto, isso deve ser levado em consideração, pois toda a cadeia de células usada para criar a tensão necessária seria inutilizada. A tensão de saída de cada célula é de cerca de 2V.

2.5.5 Bateria Ião de Lítio (Li-ion)



Figura 2.17: Baterias de Ião de Lítio [11].

A tecnologia de Ião de Lítio está-se a tornar a bateria mais utilizada, mas ainda tem muito potencial para evoluir. As baterias de hoje têm uma densidade de energia de até 140 Wh / kg ou mais em alguns casos, mas têm potencial para chegar aos 280 Wh / kg. Estão a ser feitas muitas pesquisas para otimizar as células de forma a criar uma bateria com uma densidade de energia mais alta e com maior alcance.

A bateria de *Li-ion* tem a seguinte constituição, um ânodo que é uma folha de grafite, um cátodo que é um óxido metálico de lítio em camadas e entre essas camadas está um eletrólito, que funciona como um ião impermeável. O número de iões determina a densidade de energia da bateria. Quando a bateria está a descarregar, os Iões de Lítio movem-se do ânodo para o cátodo numa reação que liberta electrões. O trabalho útil é executado quando os electrões fluem através de um circuito externo fechado.

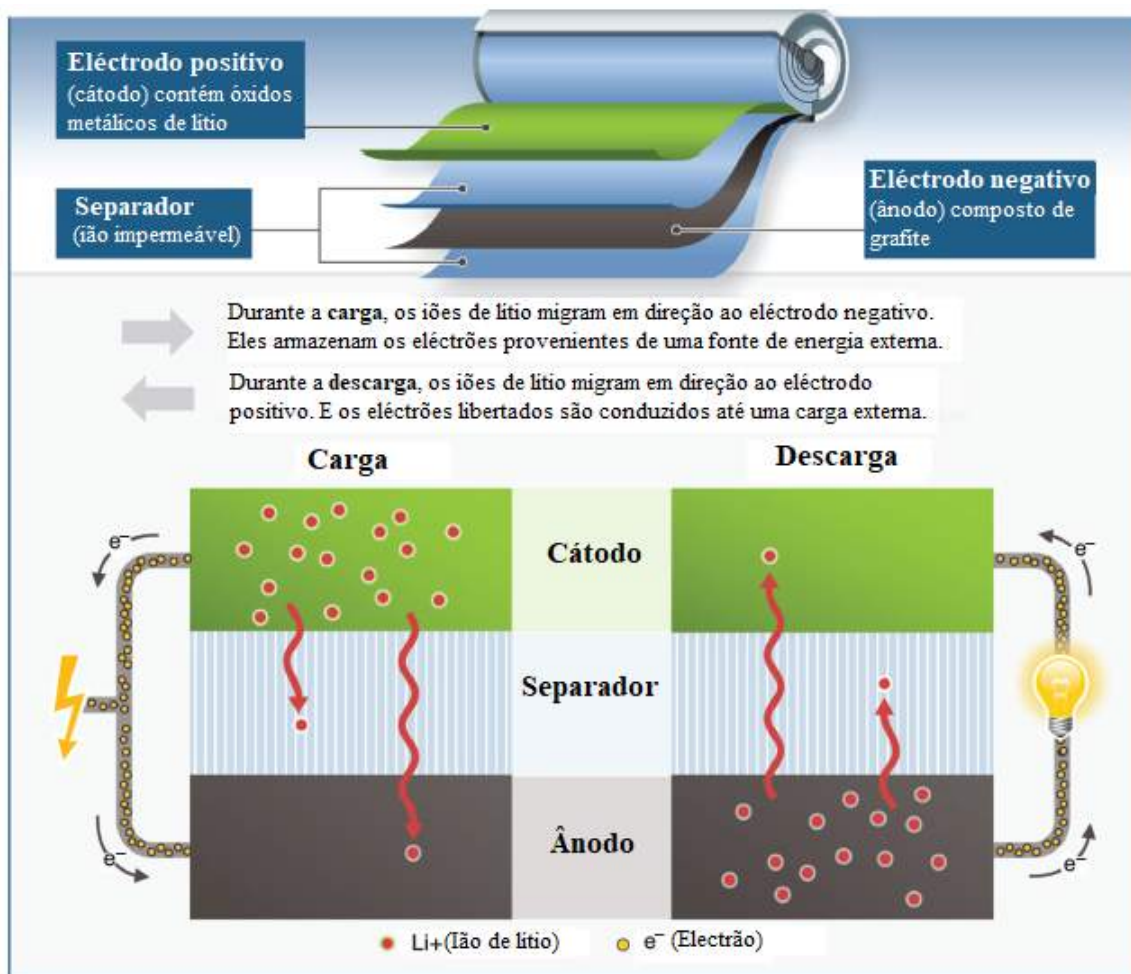


Figura 2.18: Funcionamento básico de uma bateria de Íão de Lítio [11].

Um problema com este tipo de bateria é o facto de em condições frias, o movimento dos Íões de Lítio é mais lento durante o processo de carregamento. Isso tende a fazer com que os íões alcancem apenas os electrões da superfície do ânodo, e não os que estão dentro dele. Os desenvolvimentos mais recentes relatam como possível solução o aquecimento da bateria antes da sua carga. Um outro problema desta bateria é que a utilização de correntes de carga muito altas cria o elemento lítio. Esse lítio pode ser depositado no topo do ânodo cobrindo a sua superfície e selando a passagem de electrões, esse fenómeno é conhecido como revestimento de lítio.

A *Bosch*, multinacional do sector da eletrónica, está a trabalhar numa nova geração de baterias de Íão de Lítio, como as que são feitas usam enxofre de lítio, e promete maior densidade e capacidade de energia.

Existem várias maneiras de melhorar o desempenho da bateria. Por exemplo, o material usado para o ânodo e o cátodo desempenha um papel importante na química da célula. A maioria dos cátodos de hoje têm na sua constituição níquel-cobalto-manganês (NCM) e níquel-carboxianidridos (NCA), enquanto os ânodos são feitos de grafite, carbetto de silício (SiC), carbono macio ou carbono duro.

Os eletrólitos de alta tensão podem aumentar ainda mais o desempenho da bateria, aumentando a tensão dentro da célula de 4,5V para 5V. O desafio técnico está em garantir segurança e longevidade, melhorando o seu desempenho. Uma gestão mais eficiente da bateria pode aumentar a autonomia de um automóvel até 10%.

Principalmente, existem quatro diferentes tipos de baterias de Lítio. A grande diferença está na sua composição química, que passa unicamente pelo óxido metálico que usam no seu cátodo.

Material Catódico	LiCoO ₂	LiNiO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄
Wh kg ⁻¹	510	640	420	578
Wh l ⁻¹	2600	3000	1700	2000

Tabela 2.2: Comparação entre os diferentes tipos de baterias de Lítio, em relação à energia específica e à densidade de energia [17].

O Fosfato de Ferro-Lítio (*LiFePO₄*) tem uma energia específica muito próxima da energia específica teórica prevista para o Nitrato de Lítio (*LiNiO₂*) e é maior do que a energia específica do Óxido de Lítio-Cobalto (*LiCoO₂*) e do Óxido de Lítio-Manganês (*LiMn₂O₄*). No entanto, a densidade energética do *LiFePO₄* é inferior à densidade de energia do *LiCoO₂* e do *LiNiO₂*, mas é maior do que a densidade de energia do *LiMn₂O₄* [17].

O *LiFePO₄* é o material mais indicado para as baterias recarregáveis de Lítio.

A bateria de *LiFePO₄* foi submetida a uma melhoria, passou a incluir Ítrio (Y) no cátodo das células, bateria de *LiFeYPO₄*. Esta evolução permite acelerar a transferência de electrões, tendo especial bom desempenho em temperaturas frias.

As baterias de *LiFeYPO₄* são mais seguras, permitem uma redução significativa do peso, têm um maior período de vida útil, até 10 anos, e possibilitam um aumento das correntes de carga e descarga.

Existem projectos já desenvolvidos com a tecnologia de *LiFeYPO₄*, onde foi verificada uma capacidade específica na ordem dos 6,7 Ah/kg, uma clara diferença para os valores da bateria de *LiFePO₄* que podem rondar os 1,6 Ah/kg [18].

2.6 Análise de Projectos Desenvolvidos

Existem projectos de KE já desenvolvidos que se pode extrair uma vasta informação dos mesmos, tal como as ligações dos diversos componentes periféricos como a bateria, o motor, o módulo controlador, entre outros.

Neste segmento serão estudados e apresentados alguns projectos de KE.

2.6.1 Projecto 1

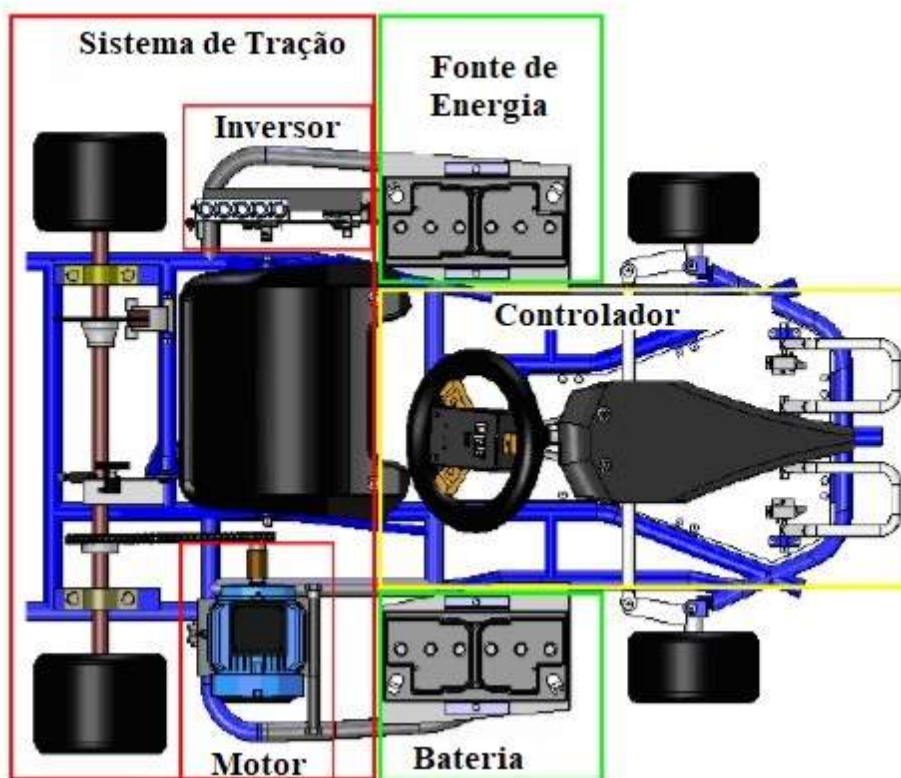


Figura 2.19: Estrutura do *kart* do projecto 1 [19].

Para este projecto [19], figura 2.19, foi apresentado um Motor AC de Indução e como tal necessitou-se de instalar um inversor de potência de AC-DC, pois as baterias só funcionam em DC. Utilizou-se duas baterias de Ácido-Chumbo com 12V de tensão nominal para fornecer ao sistema 24V e uma capacidade máxima de carga de 400A. Em relação ao controlador optou-se por desenvolver o próprio controlador numa placa de circuito impresso com os devidos componentes electrónicos, como se pode constatar pela figura 2.20.

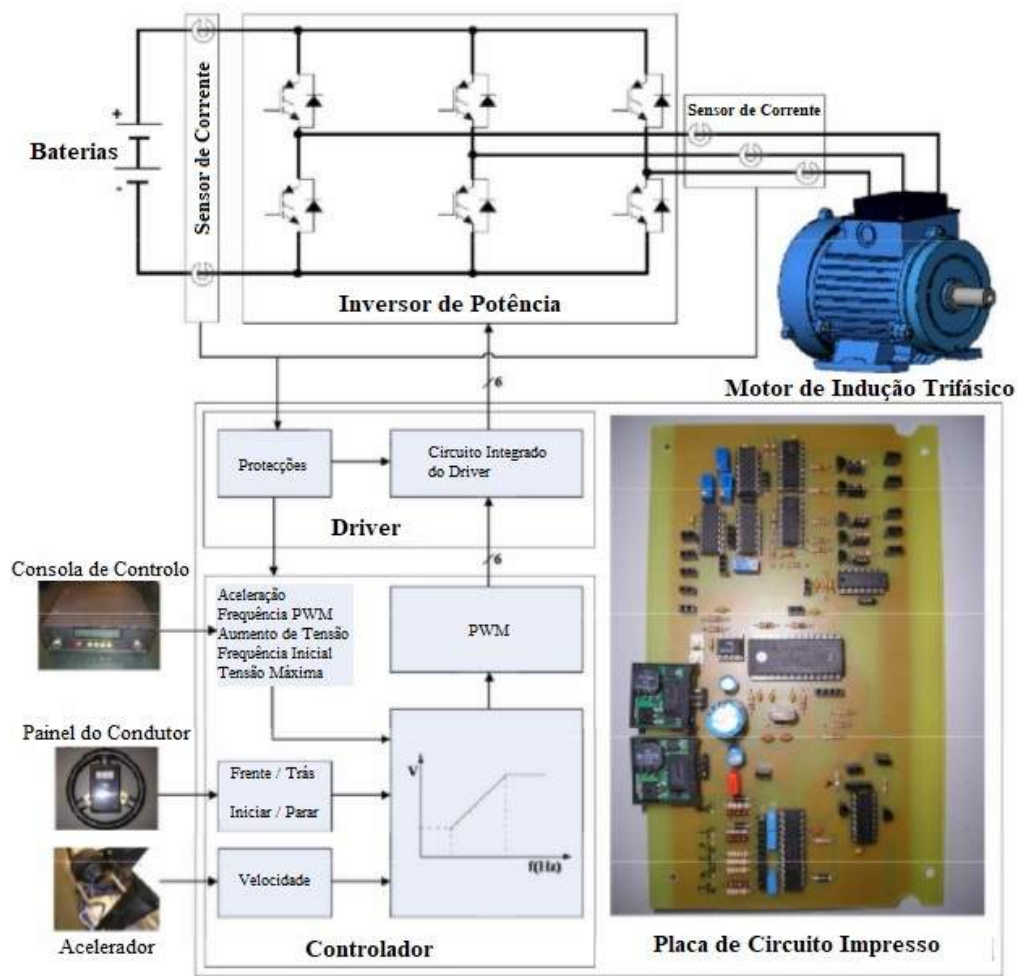


Figura 2.20: Arquitectura do *kart* do projecto 1 [19].

A unidade de controlo digital é composta por uma placa de controlo e o driver dos MOSFETs. A placa de controlo tem como base um microcontrolador que tem as capacidades gerais dos veículos elétricos leves, como comandos de iniciar/parar, frente/trás e velocidade.

O princípio básico da operação é ilustrado na figura 2.20. A parte de controlo de velocidade consiste num gerador que produz um sinal de referência de velocidade a partir do pedal do acelerador, essa referência de velocidade determina diretamente a frequência do inversor, após passar por um módulo tensão/frequência.

No centro da placa de controlo está um módulo PWM projectado para atender aos exigentes requisitos do iniciar do MI. Este módulo gera seis sinais centrais alinhados com os sinais PWM que podem ser ligados diretamente aos circuitos do driver.

O sentido de frente/trás é dado pelo botão que só pode ser mudado quando o driver está desligado. Desta forma, uma alteração acidental no botão de sentido do veículo não é possível.

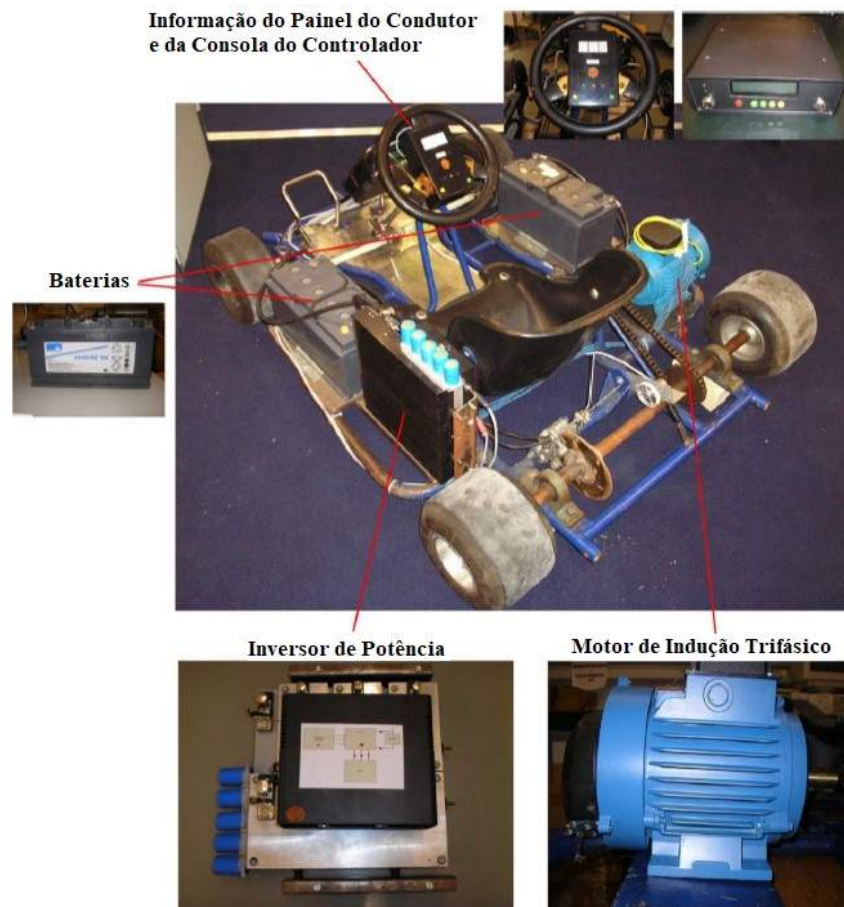


Figura 2.21: *Kart* do projecto 1 equipado com todos os componentes [19].

Foi elaborado um inversor de potência para o projecto, com recurso a três pontes de dois MOSFETs de potência em paralelo. Cada ponte com uma saída para a sua respectiva fase, perfazendo no total as três fases exigidas pelo MI. Foi usado alumínio na sua construção para dissipar o calor de forma eficiente. A alimentação do inversor foi projectada para suportar as correntes de protecção, isto é obtido através de cinco sensores de efeito hall que fornecem os dados para a placa de controlo gerir a protecção contra as sobrecorrentes.

O painel do condutor e a consola do controlador tem como objectivo fornecer informações sobre os parâmetros de operação do veículo que devem ser de fácil análise durante o tempo de condução. Para controlar os sinais de entrada do *kart* foi colocado um codificador de incremento sobre o eixo das rodas de tração, o eixo que mede a velocidade do veículo. As posições do pedal do acelerador e do pedal do travão são medidas com potenciômetros. No painel do condutor que fica no volante, também é possível verificar o estado da bateria. A consola do controlador permite ao condutor visualizar e alterar alguns parâmetros como o tempo de aceleração, a frequência PWM, aumentar a tensão, frequência inicial e a tensão máxima.

2.6.2 Projecto 2



Figura 2.22: *Kart* do projecto 2 [20].

Neste projecto [20], figura 2.22, escolheram um Motor DC de Magnetos Permanentes com Escovas, figura 2.23, com as seguintes características: 48V de tensão; 4,8kW de potência; 100A de corrente contínua; 300A corrente máxima; 85% de eficiência; 3200 rpm de velocidade; 13,1Nm de binário nominal; 38Nm de binário de pico; 13kg de peso e 0,37 kW/kg de potência específica.



Figura 2.23: Motor usado no *kart* do projecto 2 [20].

Em relação às baterias recorreram a uma empresa que disponibiliza diversas opções de baterias padrão ao cliente bem como baterias personalizáveis, em que o comprador pode idealizar a bateria de acordo com as suas necessidades.

No projecto estudado usaram células individuais de bateria de Ião de Lítio ($LiFePO_4$), como se pode verificar na figura 2.24, com 3,2V e 10Ah de capacidade, cada uma. A bateria completa é composta por 30 células de bateria de $LiFePO_4$, 15 das quais estão ligadas em série para atingir os 48V pretendidos para o projecto, e em paralelo estão outras 15 células individuais para aumentar a capacidade do conjunto final de 10Ah para 20Ah, como ilustrado na figura 2.24.



Figura 2.24: Baterias usadas no *kart* do projecto 2 [20].

Respeitante ao controlador, optaram por um desenvolvido pela empresa *Kelly*, figura 2.26, e adicionaram mais alguns componentes para protecção do projecto e sua eficiente gestão energética, tal como: fusível, ventoinha de arrefecimento, interruptor de alimentação e interruptor de inversão do sentido de rotação do motor. Para testarem a parte de controlo recorreram a um multímetro para detectar algum eventual problema e a um transformador usado, proveniente de uma impressora antiga.

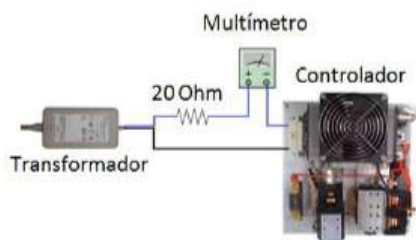


Figura 2.25: Esquema do controlador do *kart* do projecto 2 [20].



Figura 2.26: Controlador *Kelly*.

Antes de colocar os componentes no *kart*, fez-se uma simulação numa maquete, demonstrada na figura 2.27. A maquete incluía: motor, baterias, multímetros, cabos, controlador descrito anteriormente, implementação de um pedal com a função de potenciómetro, volante com display e informações luminosas em led.



Figura 2.27: Arquitectura do *kart* do projecto 2 [20].

2.6.3 Projecto 3



Figura 2.28: Kart do projecto 3 [21].

Neste projecto [21], desenvolvido e realizado pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), figura 2.28, enquadra-se um Motor DC de Magnetos Permanentes com Escovas, figura 2.29. Para as baterias optaram por baterias de Ião de Lítio (LiFeYPO_4), figura 2.30, com: 39,6V de tensão; 40Ah de capacidade; 4kW de potência contínua; 8kW de potência de pico e 19kg. Para complemento energético usaram ultracondensadores, figura 2.31, com: 110F de capacitância, 16V de tensão e armazenam 14kJ de energia.



Figura 2.29: Motor usado no *kart* do projecto 3 [21].



Figura 2.30: Baterias usadas no *kart* do projecto 3 [21].



Figura 2.31: Módulo dos ultracondensadores usados no *kart* do projecto 3 [21].



Figura 2.32: Controlador do *kart* do projecto 3 [21].

Em relação ao controlador, figura 2.32, decidiu-se desenvolver o seu próprio num placa de circuito impresso com os devidos componentes electrónicos, tal como, módulo dos ultracondensadores, MOSFETs e conversor de alta potência DC-DC. Controlador esse que tem 300A de corrente de pico.



Figura 2.33: Arquitectura do *kart* do projecto 3 [21].

2.6.4 Projecto 4

Neste projecto foi utilizado um Motor DC de Magnetos Permanentes com Escovas e 2 baterias de Ácido-Chumbo com 12V de tensão nominal cada uma, totalizando assim 24V de tensão nominal, como ilustrado na figura 2.34.

No que respeita ao controlador optou-se por um desenvolvido pela empresa *Alltrax*.

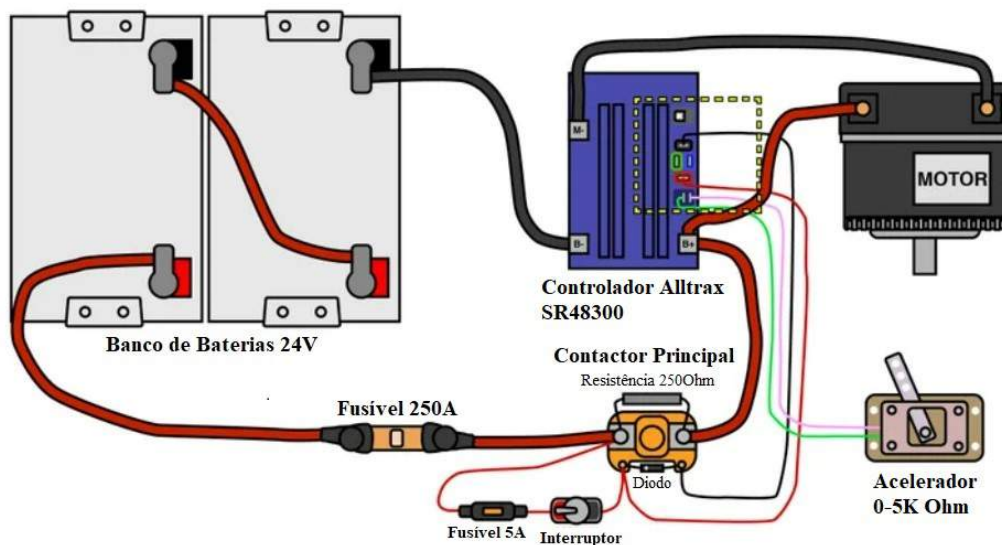


Figura 2.34: Arquitectura do *kart* do projecto 4.

A principal função do controlador é fazer a gestão e regulação da quantidade de energia que vai alimentar o motor. Essa energia provém das baterias e é controlada de acordo com os dados que são recolhidos do acelerador.

Este controlador está capacitado para trabalhar até 300A em corrente contínua e 350A em corrente máxima de picos repentinos. Também tem uma vasta linha de configurações, dependendo do tipo de acelerador, motor, bateria, etc.

Com este controlador é possível inverter o sentido do motor. Ele está equipado com uma placa de circuito impresso *HI-performance 32bit CPU*, está preparado para funcionar com *Windows 10* e é bastante intuitivo para o utilizador, com terminações coloridas e identificadas [22].

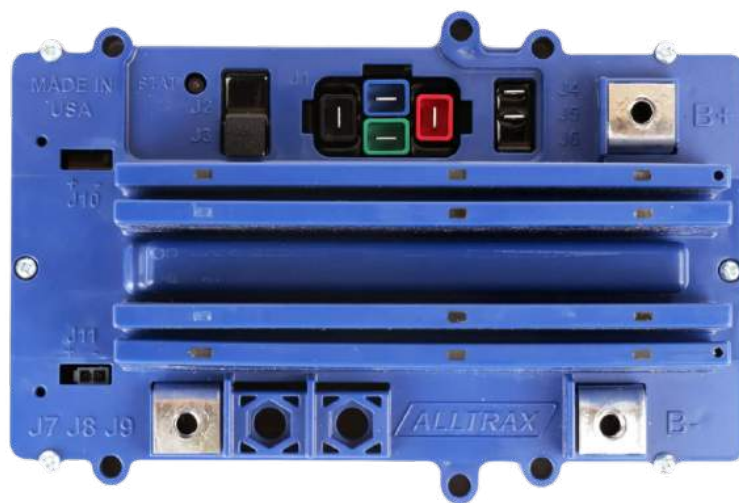


Figura 2.35: Controlador do *kart* do projecto 4 [22].

Legenda de algumas das entradas do controlador:

- **B+** terminal positivo da bateria e do motor;
- **B-** terminal negativo da bateria;
- **J9** terminal negativo do motor;
- **Vermelho** terminal positivo do contactor principal e interruptor;
- **Preto** negativo do contactor principal.
- **J4 e J5** entradas dos dados provenientes do acelerador;
- **J3** porta USB para configuração do controlador, usando o programa *Alltrax Toolkit*.

Adicionaram mais alguns componentes para protecção e boa gestão energética de toda a arquitectura do projecto.



Figura 2.36: Fusível de 250A usado no projecto 4.



Figura 2.37: Solenoide usado no projecto 4.



Figura 2.38: Fusível de 5A usado no projecto 4.



Figura 2.39: Interruptor usado no projecto 4.

O contactor/solenoide, ilustrado na figura 2.37, é um relé que tem como função controlar o ligar/desligar do circuito. É constituído por um electroíman dentro de uma solenoide. Ao ligar o interruptor, o fluxo magnético que é gerado na solenoide vai movimentar o electroíman e permitir que este disponibilize a corrente contínua para o motor. Quando a solenoide não está electrificada, o electroíman retrai e a eletricidade não consegue fluir para o motor.

2.6.5 Síntese dos Projectos Desenvolvidos

Na tabela 2.3 é apresentado um resumo dos vários projectos de *kart* que foram analisados. Para esta síntese teve-se em consideração o motor, as baterias e o controlador de cada um deles, pois são os componentes cruciais e mais importantes para o funcionamento de um AE genérico.

<i>Kart</i>	Motor	Baterias	Controlador
Projecto 1	Motor AC de Indução	Ácido-Chumbo	Desenvolveram o próprio Controlador
Projecto 2	PMDC	Ião de Lítio ($LiFePO_4$)	<i>Kelly</i>
Projecto 3	PMDC	Ião de Lítio ($LiFeYPO_4$)	Desenvolveram o próprio Controlador
Projecto 4	PMDC	Ácido-Chumbo	<i>Alltrax</i>

Tabela 2.3: Síntese dos vários projectos que foram analisados previamente.

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado a formulação matemática, baseada em [23]. Que traduz-se nos conceitos teóricos para avaliação do desempenho do AE e posteriormente a realização dos cálculos com recurso a alguns exemplos demonstrativos.

3.2 Formulação Matemática

Qualquer corpo é sujeito a diversas forças que nele atuam. Para entender o comportamento desse corpo é preciso saber que movimento o corpo terá e que forças são aplicadas nele para a reprodução de uma determinada acção. Essas forças podem ser forças favoráveis ou contra o movimento do corpo.

Neste caso as forças a ter em conta que atuam contra o movimento do KE são: peso, vento e resistência aerodinâmica. A favor do movimento do corpo tem-se em conta a velocidade do *kart* (V_{kart}), que provém do binário debitado pelo ME.

Poderão ser analisadas outras forças como por exemplo: força de sustentação aerodinâmica, força de aceleração linear, força de aceleração angular, entre outras. Porém para a essência deste projecto não é necessário porque não se trata da produção de um veículo de corrida, nesse caso fazia sentido aprofundar os estudos das forças que atuam no corpo.

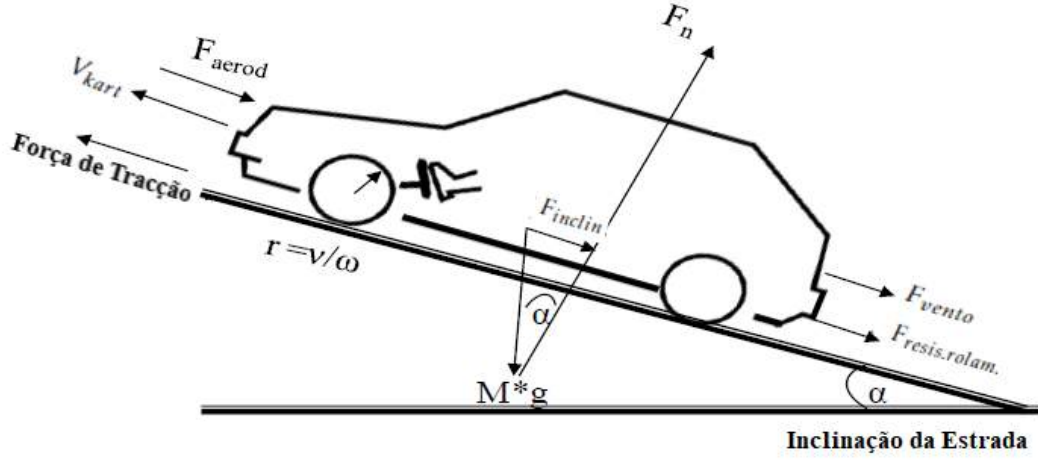


Figura 3.1: Desenho ilustrativo que representa o *kart* e algumas das diferentes forças aplicadas no corpo [23].

$P \rightarrow$ peso do corpo, que refere ao peso do *kart* + piloto. Para os cálculos será considerado uma gravidade de $9,81 \text{ m/s}^2$. Pode ser definido da seguinte forma:

$$P = M * g = M * 9,81 \quad (3.1)$$

$F_{resis.rolam.} \rightarrow$ força de resistência do rolamento, é a força produzida pelo pneu na superfície de contacto, que neste caso é o asfalto, tendo em conta também a velocidade do corpo. Esta força é proporcional ao peso do corpo e pode ser apresentada da seguinte forma:

$$F_{resis.rolam.} = P * Crr * \cos(x) \quad (3.2)$$

Em que o $\cos(x)$ é a inclinação do piso, que para uma superfície plana é $x=0$ e que por sua vez $\cos(0)=1$.

$Crr \rightarrow$ coeficiente de resistência do rolamento, é um coeficiente variável e adimensional que depende da velocidade do corpo, logo não é constante ao longo do tempo e vem na seguinte forma:

$$Crr = 0,01 \left(1 + \frac{3,6}{100} * V_{kart} \right) \quad (3.3)$$

Em que V_{kart} é a velocidade do *kart* e esta é variável.

$F_{aerod} \rightarrow$ força de arrasto aerodinâmico, resulta de uma força contrária ao movimento do *kart* devido ao atrito que o ar provoca no corpo e que varia consoante a velocidade do *kart*. Para os cálculos será considerado uma densidade atmosférica de $\rho = 1,18 \text{ kg/m}^3$ que é a densidade padrão usada no *software* de simulação; C_{aerod} é a constante aerodinâmica de um corpo, é adimensional e varia consoante o tipo de material e a rugosidade do corpo, como é difícil de saber com exatidão o valor da C_{aerod} então para o estudo será considerado o cenário intermédio, que se trata de um corpo com curvas em que $C_{aerod} = 0,47$; A_{kart} é a área frontal do *kart*, a superfície de contacto do *kart* que faz resistência com o ar.

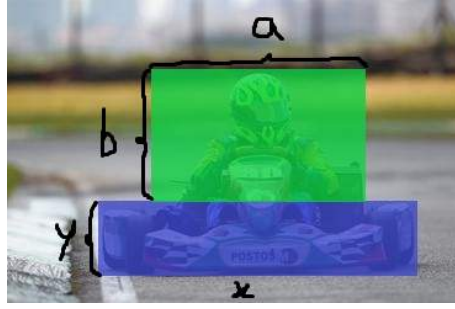


Figura 3.2: Imagem frontal de um *kart*, exemplo genérico com incógnitas¹.

$$A_{azul} = x * y \quad (3.4)$$

$$A_{verde} = a * b \quad (3.5)$$

Com isto a formula da F_{aerod} é dada por:

$$\begin{aligned} F_{aerod} &= \frac{1}{2} * \rho * A_{kart} * C_{aerod} * V_{kart}^2 \\ &= \frac{1}{2} * 1,18 * A_{kart} * 0,47 * V_{kart}^2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

F_{vento} → força do vento, que varia consoante a V_{vento} e é dada pela seguinte formula que é muito semelhante com a formula da F_{aerod} , mas tendo em conta a V_{vento} :

$$\begin{aligned} F_{vento} &= \frac{1}{2} * \rho * A_{kart} * C_{aerod} * (V_{kart} + V_{vento})^2 \\ &= \frac{1}{2} * 1,18 * A_{kart} * 0,47 * (V_{kart} + V_{vento})^2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Se considerar que $V_{vento}=0$, então nesse caso basta calcular a F_{aerod} .

F_{inclin} → força de gravítica ou resistência que é gerada pela inclinação do piso, pode ser a favor do movimento se tratar de um veículo a descer ou pode ser uma resistência provocada pelo movimento de subida de um veículo. E é expressa da seguinte forma:

$$F_{inclin} = P * \sin(x) \quad (3.8)$$

Em que o $\sin(x)$ é a inclinação do piso, que para uma superfície plana é $x=0$ e por sua vez $\sin(0)=0$. Logo nesse caso a F_{inclin} vai ser nula.

F_{total} → força total, é o somatório de todas as forças que resulta na força que o carro necessita para atingir uma determinada velocidade, nas condições atmosféricas estudadas.

$$F_{total} = F_{resis.rolam.} + F_{aerod} + F_{inclin} \quad (3.9)$$

¹Retirado do site <https://mastermidia.pressroom.com.br/1252752fef/automobilismo-guastamacchia-enfrentou-problemas-na-copa-sao-paulo-light-de-kart.html> , acedido no dia 25/02/2022

No caso em que se considere a velocidade do vento nas condições atmosféricas estudadas, substituir o F_{aerod} por F_{vento} .

Bin.F $\rightarrow$ binário de uma determinada força que se pretende calcular, em que o binário é igual ao produto da Força com o $r_r = 0,13m$ (raio da roda).

$$Bin.F = F * r_r \quad (3.10)$$

3.3 Exemplos de Aplicação

Para o cálculo do peso do corpo será considerada uma massa (kart e piloto) aproximada de 250kg.

$$P = M * g = 250 * 9,81 = 2452,5N \quad (3.11)$$

Que considerando a força da gravidade equivale a um peso de 2452,5N.

Para os cálculos da área frontal do kart.

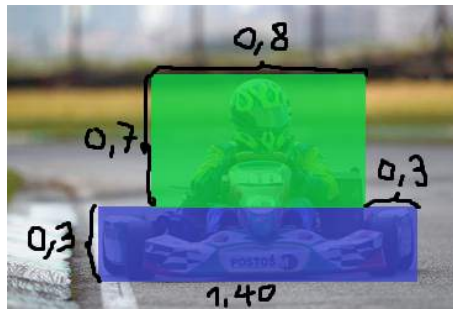


Figura 3.3: Imagem frontal de um kart, as dimensões do desenho são exemplificativas e não correspondem à realidade².

$$A_{azul} = 1,4 * 0,3 = 0,42m^2 \quad (3.12)$$

$$A_{verde} = 0,8 * 0,7 = 0,56m^2 \quad (3.13)$$

$$A_{kart} = 0,42 + 0,56 = 0,98m^2 \approx 1m^2 \quad (3.14)$$

Para o cálculo da força de arrasto aerodinâmico.

$$F_{aerod} = \frac{1}{2} * \rho * A_{kart} * C_{aerod} * V_{kart}^2 \Leftrightarrow F_{aerod} = \frac{1}{2} * 1,18 * 1 * 0,47 * V_{kart}^2 \quad (3.15)$$

3.3.1 Exemplo 1

Condições iniciais para efectuar os cálculos teóricos: $V_{kart} = 10m/s$; $V_{vento} = 0m/s$ e inclinação do piso = 0° , ou seja, $x=0$.

²Retirado do site <https://mastermidia.pressroom.com.br/1252752fef/automobilismo-guastamacchia-enfrentou-problemas-na-copa-sao-paulo-light-de-kart.html>, acessado no dia 25/02/2022

Cálculo do coeficiente de resistência do rolamento.

$$C_{rr} = 0,01 \left(1 + \frac{3,6}{100} * V_{kart} \right) = 0,01 \left(1 + \frac{3,6}{100} * 10 \right) = 0,0136 \quad (3.16)$$

Cálculo da força de resistência do rolamento.

$$F_{resis.rolam.} = P * C_{rr} * \cos(x) = 2452,5 * 0,0136 * \cos(0) = 33,35N \quad (3.17)$$

Cálculo da força de arrasto aerodinâmico.

$$F_{aerod} = \frac{1}{2} * \rho * A_{kart} * C_{aerod} * V_{kart}^2 = \frac{1}{2} * 1,18 * 1 * 0,47 * 10^2 = 27,73N \quad (3.18)$$

Cálculo da força total.

$$F_{total} = F_{resis.rolam.} + F_{aerod} = 33,35 + 27,73 = 61,08N \quad (3.19)$$

Cálculo do binário da força total.

$$Bin.F_{total} = F_{total} * r_r = 61,08 * 0,13 = 7,94N.m \quad (3.20)$$

Para as condições estudadas, o *kart* necessita de uma força de 61,08N com um binário de 7,94N.m, para atingir uma velocidade de 10m/s, o que equivale a 36km/h.

3.3.2 Exemplo 2

Condições iniciais para efectuar os cálculos teóricos: $V_{kart} = 10m/s$; $V_{vento} = 0m/s$ e inclinação do piso = 10° , ou seja $x=10$.

Cálculo do coeficiente de resistência do rolamento.

$$C_{rr} = 0,01 \left(1 + \frac{3,6}{100} * V_{kart} \right) = 0,01 \left(1 + \frac{3,6}{100} * 10 \right) = 0,0136 \quad (3.21)$$

Cálculo da força de resistência do rolamento.

$$F_{resis.rolam.} = P * C_{rr} * \cos(x) = 2452,5 * 0,0136 * \cos(10) = 32,85N \quad (3.22)$$

Cálculo da força de arrasto aerodinâmico.

$$F_{aerod} = \frac{1}{2} * \rho * A_{kart} * C_{aerod} * V_{kart}^2 = \frac{1}{2} * 1,18 * 1 * 0,47 * 10^2 = 27,73N \quad (3.23)$$

Cálculo da força gerada pela inclinação do piso.

$$F_{inclin} = P * \sin(x) = 2452,5 * \sin(10) = 425,87N \quad (3.24)$$

Cálculo da força total.

$$F_{total} = F_{resis.rolam.} + F_{aerod} + F_{inclin} = 32,85 + 27,73 + 425,87 = 486,45N \quad (3.25)$$

Cálculo do binário da força total.

$$Bin.F_{total} = F_{total} * r_r = 486,45 * 0,13 = 63,24N.m \quad (3.26)$$

Para as condições estudadas e com uma inclinação do piso de 10° , o *kart* necessita de uma força de 486,45N com um binário de 63,24N.m, para atingir uma velocidade de 10m/s, o que equivale a 36km/h.

3.3.3 Exemplo 3

Condições iniciais para efectuar os cálculos teóricos: $V_{kart} = 6m/s$; $V_{vento} = 0m/s$ e inclinação do piso = 0° , ou seja $x=0$.

Cálculo do coeficiente de resistência do rolamento.

$$Crr = 0,01 \left(1 + \frac{3,6}{100} * V_{kart} \right) = 0,01 \left(1 + \frac{3,6}{100} * 6 \right) = 0,01216 \quad (3.27)$$

Cálculo da força de resistência do rolamento.

$$F_{resis.rolam.} = P * Crr * \cos(x) = 2452,5 * 0,01216 * \cos(0) = 29,82N \quad (3.28)$$

Cálculo da força de arrasto aerodinâmico.

$$F_{aerod} = \frac{1}{2} * \rho * A_{kart} * C_{aerod} * V_{kart}^2 = \frac{1}{2} * 1,18 * 1 * 0,47 * 6^2 = 9,98N \quad (3.29)$$

Cálculo da força total.

$$F_{total} = F_{resis.rolam.} + F_{aerod} = 29,82 + 9,98 = 39,8N \quad (3.30)$$

Cálculo do binário da força total.

$$Bin.F_{total} = F_{total} * r_r = 39,8 * 0,13 = 5,17N.m \quad (3.31)$$

Para as condições estudadas, o *kart* necessita de uma força de 39,8N com um binário de 5,17N.m, para atingir uma velocidade de 6m/s, o que equivale a 21,6km/h.

3.3.4 Comparação dos Resultados

	$V_{vento} = 0m/s$		
	Inclinação = 0°		Inclinação = 10°
	$V_{kart} = 6m/s$	$V_{kart} = 10m/s$	$V_{kart} = 10m/s$
Força (N)	39,8	61,08	486,45
Binário (N.m)	5,17	7,94	63,24

Tabela 3.1: Tabela de comparação dos resultados dos cálculos estudados

SIMULAÇÃO

4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a simulação para um modelo genérico de VE. Com a utilização de um recurso de simulação de um *software* apropriado é possível reduzir os custos de produção, ao invés do que acontece na estratégia de tentativa e erro, cada vez que erra tem que se construir fisicamente um protótipo novo de raiz ou quase de raiz.

Para a simulação foi determinado que o KE era constituído por: uma massa (*kart* e piloto) de 25kg, que considerando a força da gravidade equivale a um peso de 245N; um conjunto de baterias com 48V de tensão; um motor com uma potência de 3hp $\approx 2,24\text{kW}$ e tensão nominal de alimentação de 48V.

Também serão comentadas as respectivas especificações dos componentes constituintes do *kart*.

4.2 *Software* de Simulação

Antecedentemente aos conteúdos práticos, será feita uma simulação para aferir quais os equipamentos mais adequados para este projecto. Para esta simulação foi elaborada a estrutura que está representada na figura 4.1.

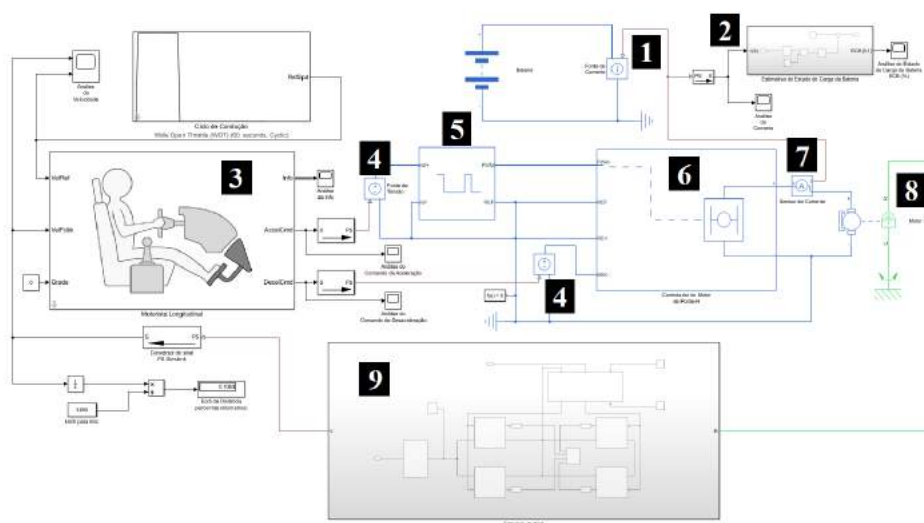


Figura 4.1: Esquemático geral do *kart* no *software* de simulação.

Com o resultado geral da simulação obteve-se o gráfico da figura 4.2, que representa a velocidade do *kart* em m/s, com um valor máximo de 10,28m/s que corresponde a 37km/h. A azul o impulso do pedal do acelerador, pedal esse que faz acionar o controlador motor.

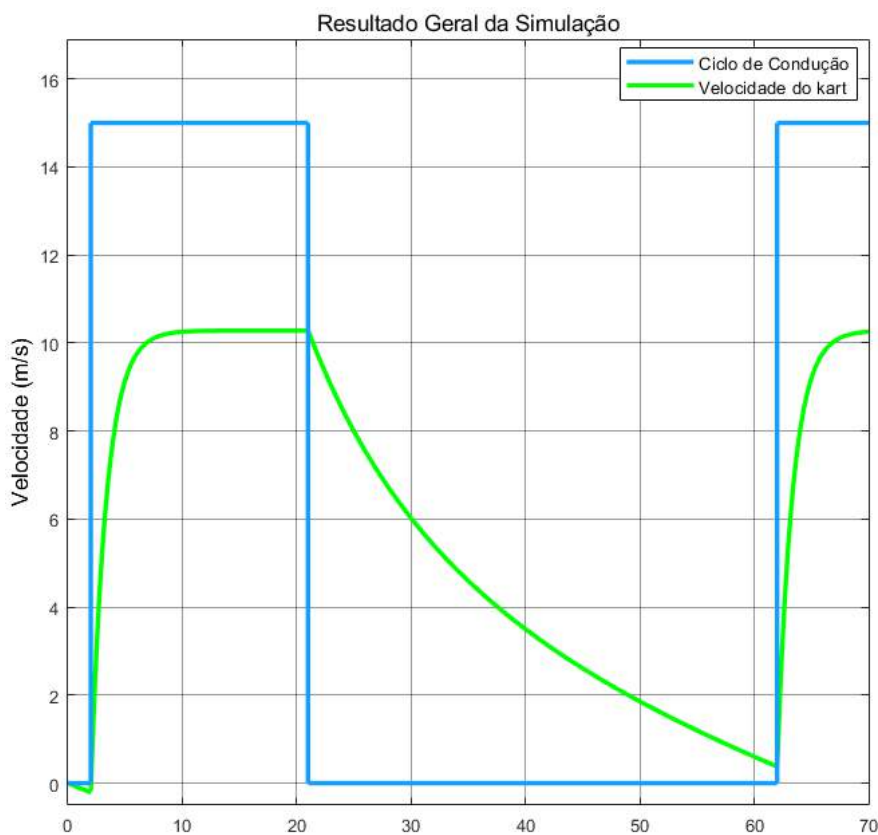


Figura 4.2: Gráfico que representa o resultado geral da simulação por um período de 70 segundos.

4.2.1 Bateria

Este é o módulo da bateria que consiste num conjunto de baterias que no total fazem 48V de tensão, com resistência interna de 0,2 Ohm e um indicador do Estado de Carga da Bateria (ECB) que vem em percentagem (%).

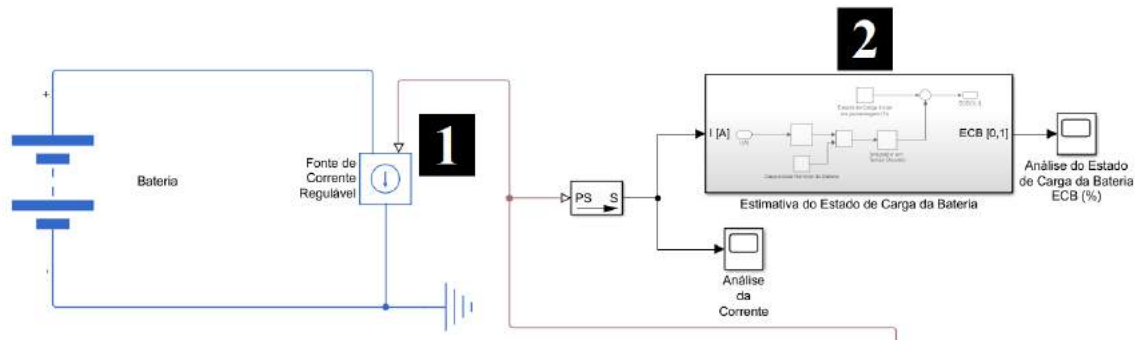


Figura 4.3: A parte da bateria do *kart*.

Legenda de alguns dos componentes utilizados no módulo:

- 1 Fonte de Corrente Regulável

O bloco representa uma fonte de corrente ideal que é poderosa o suficiente para manter a corrente específica de saída, independentemente da tensão que passa por ele. A corrente de saída é $I = I_s$, onde I_s é o valor numérico apresentado na porta física do sinal.

- 2 Estimativa do Estado de Carga da Bateria

Módulo criado para fazer os cálculos matemáticos relacionados ao ECB, o resultado gerado é apresentado em percentagem no indicador do ECB

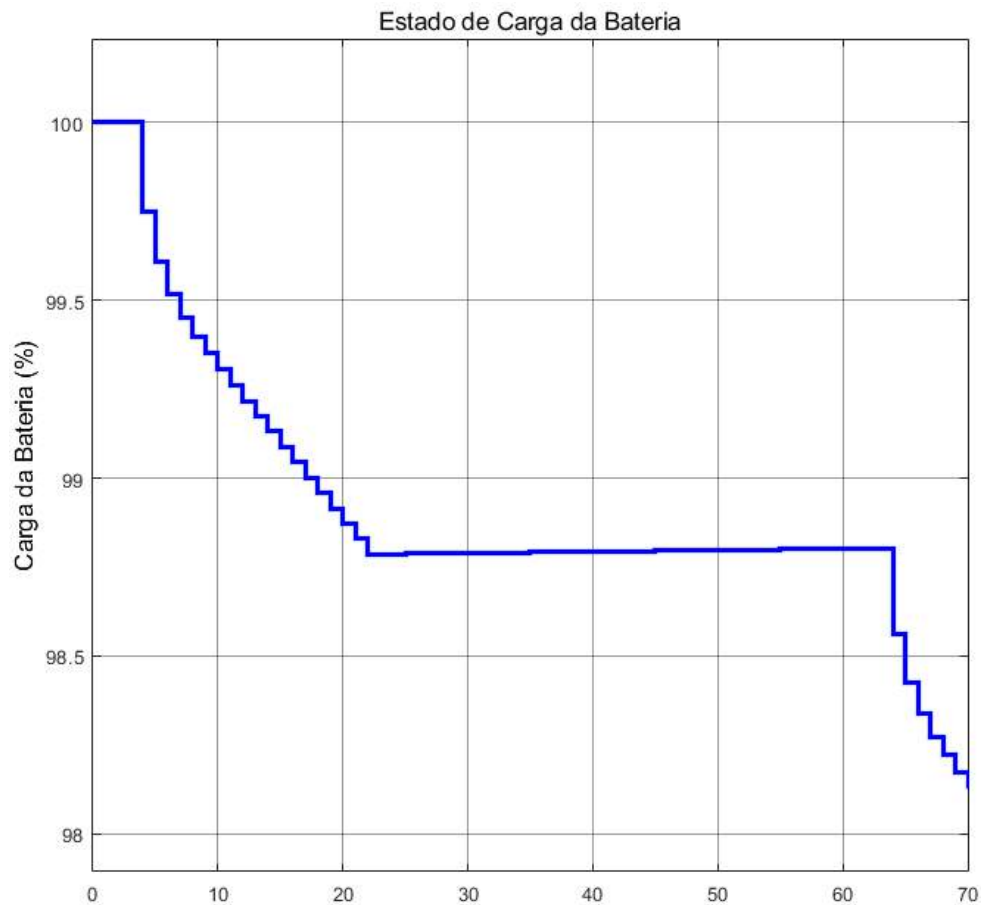


Figura 4.4: Gráfico que indica o ECB após uma simulação por um período de 70 segundos.

No gráfico da figura 4.4 é apresentado o ECB, gráfico esse que foi elaborado a partir de valores extraídos do módulo que foi criado para fazer operações matemáticas relativas ao consumo da bateria.

4.2.2 Controlador

No módulo do controlador temos toda a parte de gestão e controlo do *kart* que funciona com um sinal de 5V de tensão e que controla até 100A de corrente.

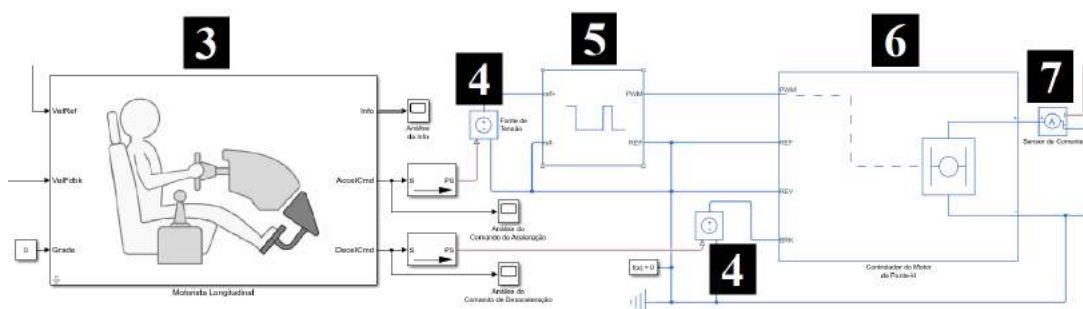


Figura 4.5: A parte de controlo do *kart*.

Legenda de alguns dos componentes utilizados no módulo:

- **3 Controlador do Condutor**

Um controlador com parâmetros longitudinais de velocidade e posição que tem como função gerar comandos naturais de aceleração e travagem, com base nas velocidades de referência e velocidades de feedback.

- **4 Fonte de Tensão Regulável**

O bloco representa uma fonte de tensão ideal que é poderosa o suficiente para manter a tensão específica de saída, independentemente da corrente que passa por ele. A tensão de saída é $V = V_s$, onde V_s é o valor numérico apresentado na porta física do sinal.

- **5 Controlador de Tensão PWM**

A tensão que entra neste bloco sofre uma modulação por largura de pulso e posteriormente é obtida a modulação do sinal das portas PWM e REF. A tensão de saída é zero quando o pulso é baixo e é igual ao parâmetro amplitude da tensão de saída quando o pulso é alto. O ciclo de trabalho é definido pelo valor de entrada.

- **6 Controlador do Motor**

O bloco representa uma unidade de controlo do motor, que por sua vez pode ser controlado pelo Controlador de Tensão PWM, com recurso às ligações PWM e REF.

Se a tensão da porta BRK for maior do que a tensão limite de travagem, os terminais de saída são curto-circuitados. O que faz com que este módulo não deixe passar o sinal de controlo para o motor, o que corresponde à simulação de uma travagem. As tensões nas portas PWM, REV e BRK são definidas em relação à porta REF.

- **7 Sensor de Corrente**

O bloco representa um sensor de corrente ideal, ou seja, um dispositivo que converte a corrente medida de qualquer ligação elétrica em um sinal físico proporcional à corrente.

As ligações + (mais) e – (menos) são destinadas às portas elétricas de entrada e saída do sinal digital, respectivamente, sinal esse que percorre um sensor que mede a sua corrente. A outra ligação é uma porta física do sinal que fornece o valor que é lido no sensor.

4.2.3 Motor

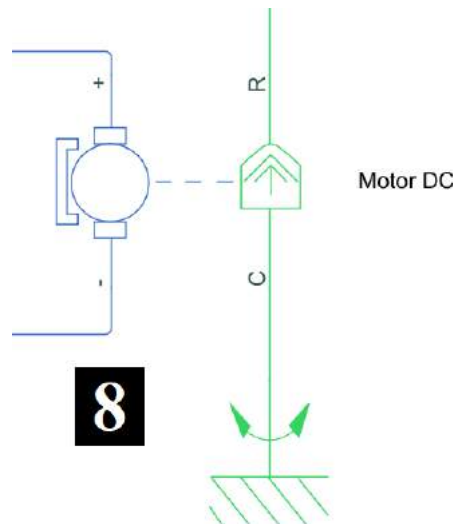


Figura 4.6: Motor do *kart*.

Este bloco representa as características eléctricas e o binário de um motor DC.

Os parâmetros do motor podem ser especificados diretamente ou podem derivar da velocidade sem carga e do binário estático. Se nenhuma informação estiver disponível sobre a indutância da armadura, este parâmetro pode ser definido para algum valor diferente de zero.

O binário do motor é positivo quando por ele flui uma corrente eléctrica positiva, binário esse que tem o sentido positivo da porta mecânica de C para R. A direção do binário do motor pode ser negativa se alterar o sinal da força eletromotriz ou da constante do binário.

Para a simulação deste projecto utilizou-se um motor DC com as seguintes características: potência nominal de carga de $3\text{hp} \approx 2,24\text{kW}$; tensão nominal de alimentação de 48V ; velocidade sem carga de 4000rpm e velocidade nominal com carga de 3654rpm .

4.2.4 Estrutura do *Kart*

Neste módulo tem essencialmente o *chassi*/corpo do *kart*, as 4 rodas e uma embraiagem simples. Tendo as seguintes configurações: massa de 25kg ; gravidade de $9,81\text{ m/s}^2$; área frontal de 1m^2 ; densidade atmosférica de $1,18\text{ kg/m}^3$; as 4 rodas com $0,13\text{m}$ de raio e é de tração traseira. A embraiagem é uma embraiagem simples de velocidade única.

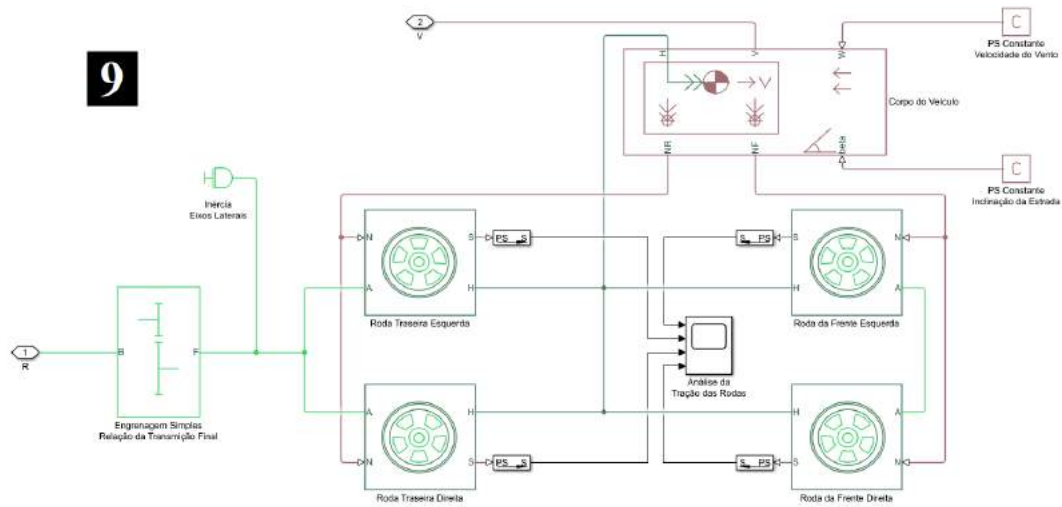


Figura 4.7: Módulo da estrutura do kart.

No gráfico da figura 4.8 é apresentada a força que cada roda faz, associada ao deslizamento relativo entre o pneu e o piso. Força essa que é contrária à força de atrito.

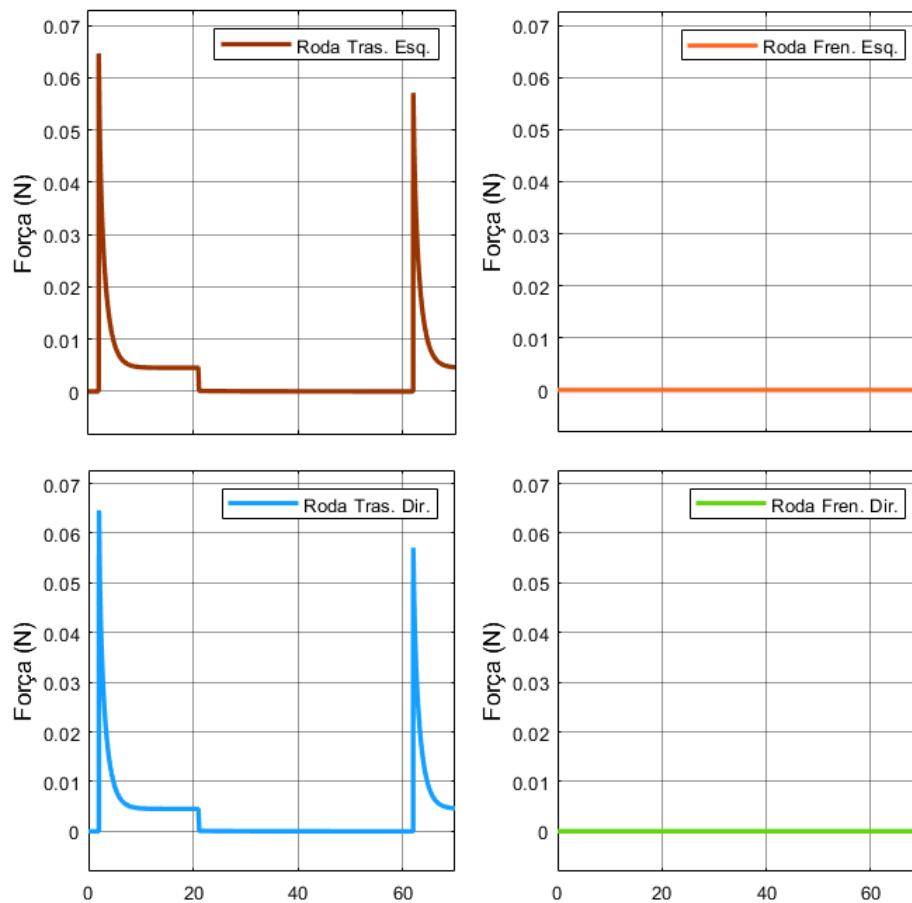


Figura 4.8: Gráfico de cada roda que representa a força (N) associada ao deslizamento relativo entre o pneu e o piso, por um período de 70 segundos.

Sendo o veículo de tração traseira então apenas as rodas traseiras vão descrever um gráfico com oscilações da força que faz entre o pneu e o piso. O mesmo não acontece com as rodas dianteiras que permanecem estáticas em relação à força entre o pneu e o piso, o gráfico até poderá ter algumas pequenas oscilações a uma escala muito mais inferior mas que estas provêm da reação das rodas traseiras.

4.3 Especificações dos Componentes para o Projecto do *Kart*

Neste segmento será descrito os componentes mais indicados para cumprir os requisitos do projecto do *kart*. Tendo em conta os estudos feitos anteriormente e as ofertas disponíveis no mercado, de acordo com o orçamento disponível e a agilidade burocrática.

4.3.1 Comparação entre os Projectos Desenvolvidos

<i>Kart</i>	Motor	Baterias	Controlador
Projecto 1	Motor AC de Indução	Ácido-Chumbo	Desenvolveram o próprio Controlador
Projecto 2	PMDC	Ião de Lítio ($LiFePO_4$)	<i>Kelly</i>
Projecto 3	PMDC	Ião de Lítio ($LiFeYPO_4$)	Desenvolveram o próprio Controlador
Projecto 4	PMDC	Ácido-Chumbo	<i>Alltrax</i>

Tabela 4.1: Comparação entre os vários projectos que foram analisados previamente.

Na tabela 4.1 é feita uma comparação entre os vários projectos que foram analisados. A verde está apresentado os componentes que após um estudo aprofundado são os mais susceptíveis a serem considerados para o projecto do *kart*, tendo em conta as características e dimensões de um *kart*. Ao longo dos próximos subcapítulos será explicado o porquê e a escolha de cada um dos seus componentes.

4.3.2 Especificação do Motor

Depois de analisadas as alternativas de entre os motores apresentados, concluiu-se que o motor mais indicado para este projecto seria o Motor DC de Magnetos Permanentes com Escovas (PMDC), pois tendo em conta que o projecto se trata de um *kart*, e sendo este um veículo com uma arquitectura simples e de dimensões reduzidas faz mais sentido optar por um motor simples, de fácil instalação e utilização.

Este motor trabalha em DC, logo não necessita de um inversor pois as baterias também trabalham em DC. Isto resulta na utilização de menos um componente necessário ao funcionamento do *kart*, ficando o veículo menos pesado. O que lhe dá vantagem num cenário de competição.

4.3. ESPECIFICAÇÕES DOS COMPONENTES PARA O PROJECTO DO KART



Figura 4.9: Motor DC de Magnetos Permanentes com Escovas (PMDC).

Este problema não se equaciona no caso dos AE, pois como são veículos de dimensões superiores, o peso do inversor em nada vai alterar o desempenho de automóvel. Talvez num AE optar-se-ia por um Motor AC de Indução.

4.3.3 Especificação da Bateria

Depois de uma breve análise das opções estudadas e de acordo com a tabela seguinte, verificou-se que alguns tipos de baterias não eram as mais convenientes para este projecto. As baterias desconsideradas foram: a bateria de Níquel-Cádmio porque é a que tem potência específica mais baixa; a bateria de Níquel-Hidreto Metálico porque é a que tem a tensão nominal mais baixa, a bateria de Cloreto de Sódio-Níquel e a bateria de Sódio-Enxofre porque são as que precisam de temperaturas mais altas (300-350 °C) para o seu correcto funcionamento.

Tipo de Bateria	Energia Específica (Wh/Kg)	Densidade de Energia (Wh/L)	Potência Específica (W/Kg)	Tensão Nominal da Célula (V)	Eficiência Ampere-Hora	Resistência Interna (Ohms)	Temperatura de Operação (°C)	Autodescarga (%)	Ciclo de Vida até aos 80% da Capacidade Original	Tempo de Recarga (H)	Custo Relativo (2015)
Ácido-Chumbo	20-35	54-95	250	2.1	80%	0.022	Ambiente	2%	800	8 (1 hora para os 80%)	0.5
Níquel-Cádmio	40-55	70-90	125	1.35	Boa	0.06	-40 a +80	0.5%	1,200	1 (20 min para os 80%)	1.5
Níquel-Hidreto Metálico	65	150	200	1.2	Bastante boa	0.06	Ambiente	5%	1,000	1 (20 min para os 80%)	2.0
Cloreto de Sódio-Níquel	100	150	150	2.5	Muito boa	Muito baixa	300-350	10% / dia	>1,000	8	2.0
Lão de Lítio	140	250-620	300-1,500	3.5	Muito boa	Muito baixa	Ambiente	10% / mês	>1,000	2-3 (1 hora para os 80%)	3.0
Sódio-Enxofre	100	150	200	2	Muito boa	0.06	300-350	Bastante baixa se for mantida quente	1,000	8	

Tabela 4.2: Comparação entres as baterias que foram estudadas [11].

Em comparação com as outras tipologias de baterias, pode-se concluir que a bateria mais indicada para o projecto em causa seria uma das seguintes: Bateria de Ião de Lítio ou Bateria de Ácido-Chumbo.

A bateria de Ião de Lítio é a bateria com melhor energia específica, melhor densidade de energia, melhor potência específica, melhor tensão nominal. Esta tem também boa eficiência e baixa resistência interna. Assim, seria a melhor opção para o projecto. De entre as baterias de Lítio as mais indicadas seriam a $LiFePO_4$ ou a $LiFeYPO_4$.



Figura 4.10: Bateria de Ião de Lítio.



Figura 4.11: Bateria de Ácido-Chumbo.

A bateria de Ácido-Chumbo apresenta menor eficiência, menor energia específica, menor densidade de energia, menor potência específica e menor tensão nominal, em comparação com a bateria de Ião de Lítio. A vantagem da bateria de Ácido-Chumbo é que é uma bateria com um custo de aquisição relativamente baixo.

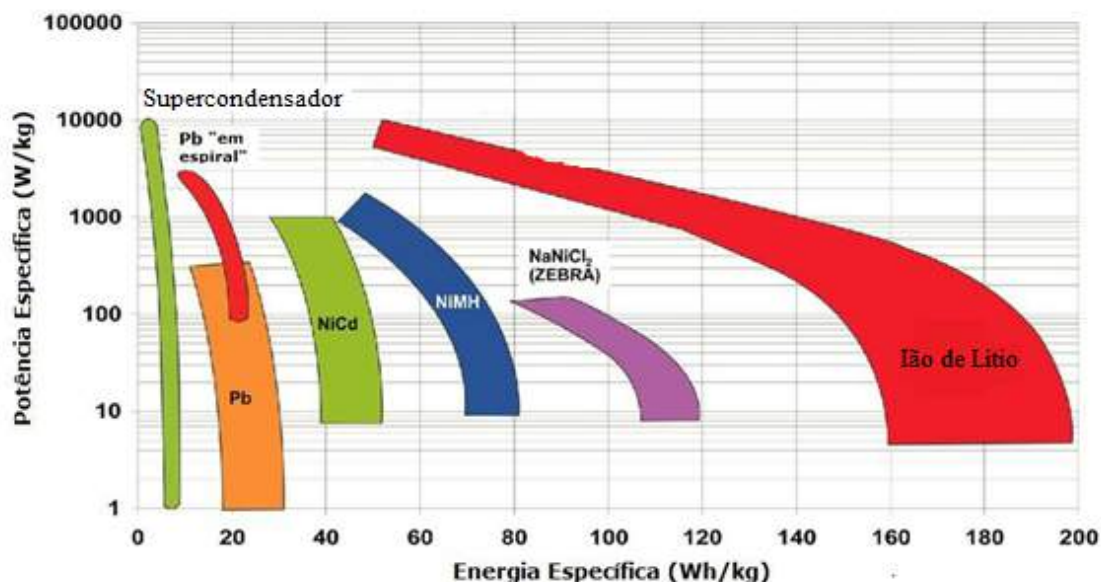


Figura 4.12: Gráfico comparativo da Potência Específica em relação à Energia Específica, para os diferentes tipos de armazenamento de energia¹.

¹Retirado do site https://www.researchgate.net/figure/Ragone-plot-of-various-battery-technologies-with-specification-at-cell-level-for_fig1_258177713, acedido no dia 10/02/2022

4.3. ESPECIFICAÇÕES DOS COMPONENTES PARA O PROJECTO DO KART

Como se pode verificar pela figura 4.12, a bateria de Ião de Lítio talvez seria a melhor opção de bateria para o *kart*, pois é a bateria com melhor potência específica em relação à energia específica.

4.3.4 Especificação do Controlador

Dos componentes principais apenas falta concluir a escolha do controlador para fazer toda a gestão energética do *kart*. Uma das opções seria desenvolver o próprio controlador, o que seria interessante, porém como já existem equipamentos no mercado que servem essas necessidades, concluiu-se que seria redundante desenvolver um controlador de raiz.

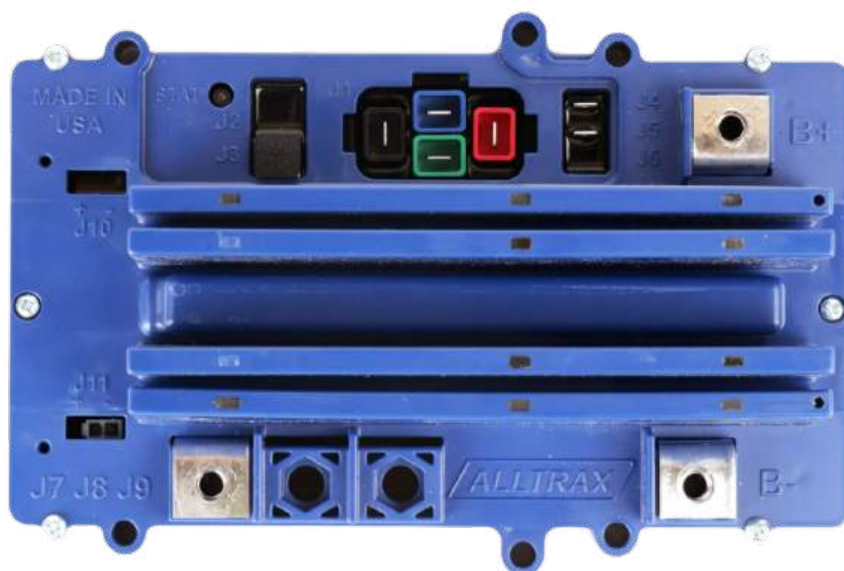


Figura 4.13: Controlador da *Alltrax* [22].

Após pesquisar e analisar as ofertas de controladores disponíveis no mercado verifica-se que a mais adequada seria um controlador da *Alltrax*. Esta empresa tem uma vasta gama de controladores com várias capacidades padrão, que podem ser adquiridas de acordo com as necessidades do projecto.

4.3.5 Esquemático da Arquitectura para o Projecto do *Kart*

Neste segmento é apresentado um possível esquemático de arquitectura para o projecto do *kart*. Esquemático este que foi baseado no Projecto 4 que foi apresentado no capítulo dos Fundamentos dos Veículos Eléctricos, contudo ainda assim sofreu algumas alterações para melhor adequar-se a este projecto.

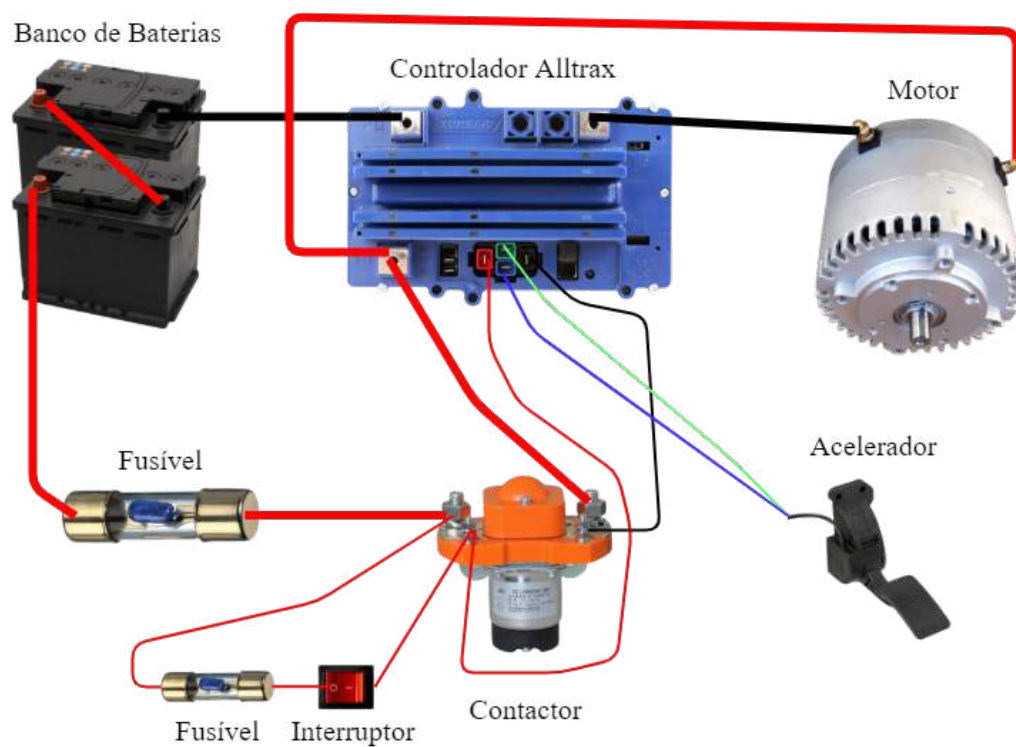


Figura 4.14: Controlador da *Alltrax*.

Em relação aos restantes componentes como os fusíveis, interruptores, cabos, entre outros, que não sendo principais, não deixam de ser igualmente importantes, serão adquiridos conforme sejam necessários.

IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

Neste capítulo será realizada a implementação do VE de acordo com as conclusões que foram recolhidas dos estudos anteriores.

Para o projecto foi modificado um VE existente, melhorando alguns aspectos tais como aerodinâmica, redução de peso, aceleração e de forma a que fique o mais semelhante possível com um *kart*.

Após a implementação do KE, serão feitos novos cálculos teóricos e nova simulação de acordo com as características do projecto implementado. Consequentemente serão feitos alguns testes para obtenção dos resultados experimentais.

5.2 Implementação do Veículo Eléctrico

Para o projecto foi feita a modificação de um VE, com o intuito de deixar o seu aspecto mais semelhante possível com um *kart*.



Figura 5.1: VE inicial, sem modificações.

Iniciou-se o processo de modificação do VE inicial para KE, começou-se por remover a estrutura de fibra de vidro do VE inicial e os componentes que nela estavam inseridos.



Figura 5.2: KE desmontado, sem as estruturas de fibra de vidro.

O volante mudou de posição, a intenção era ele ir mais para baixo e mais para o centro do kart.



Figura 5.3: Posição original do volante.



Figura 5.4: Posição final do volante.

Para tal foi retirada uma das duas articulações da coluna de direção, ficando apenas só com uma delas. Abriu-se um buraco no alumínio para passar a coluna de direção, buraco esse que ficou mais abaixo e mais para o centro do que a posição inicial do volante.



Figura 5.5: Articulações da coluna de direção.

Enquanto o pedal do travão manteve-se inalterado, o mesmo não aconteceu com o pedal do acelerador que sofreu um desvio para a direita da posição original.



Figura 5.6: Pedais originais.

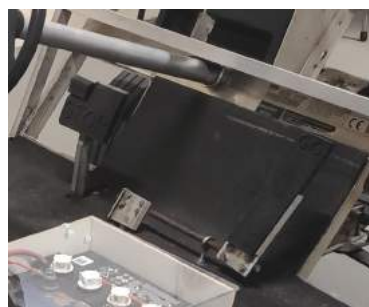


Figura 5.7: Pedais após as modificações.

O carro de VE está equipado com 6 Baterias de Ácido-Chumbo ligadas em série, cada uma com 8V o que perfaz um total de 48V que é a tensão exigida pelo motor DC [24].



Figura 5.8: Posição original do conjunto das baterias.

As Baterias de Ácido-Chumbo foram reorganizadas de maneira a ser possível acomodar o assento do piloto no lugar das baterias centrais. O assento do piloto foi removido do *kart* antigo que estava na faculdade.

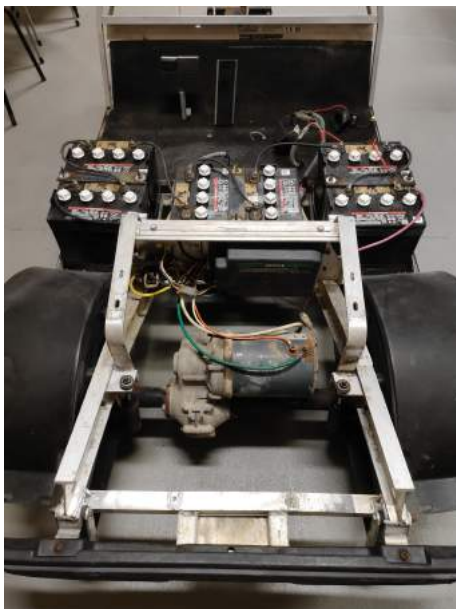


Figura 5.9: Posição original do conjunto das baterias, vista de outro ângulo.

Baterias essas que foram realocadas na parte traseira do *kart* próximo do motor, com recurso a uma cantoneira de apoio.

Para esta alteração foi necessário a aquisição de dois cabos mais longos que os originais para manter as baterias ligadas em série.

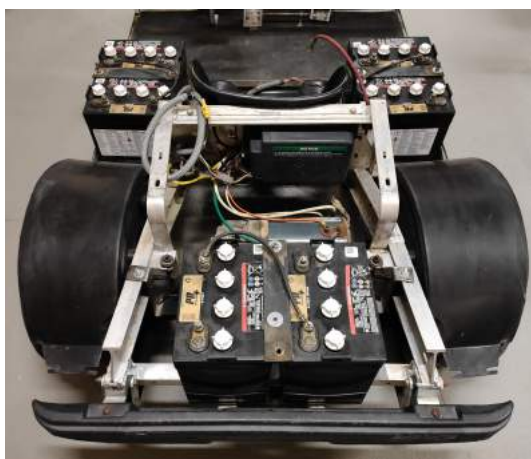


Figura 5.10: Reorganização da posição do conjunto das baterias.

Para proteger todos os componentes e trazer alguma segurança para o piloto, foram projectadas três caixas de madeira nas laterais e de acrílico na parte superior para facilitar a visualização dos componentes que estão no interior.



Figura 5.11: Proteções do KE.

Duas dessas caixas ficam nas laterais do assento do piloto, cada uma tem capacidade para alojar duas baterias.



Figura 5.12: Proteções das baterias que estão nas laterais do assento do piloto.

A terceira caixa localiza-se na traseira do *kart* e aloja o motor, controlador, selenoide, tomada de carregamento, botão andar/rebocar e duas baterias do conjunto de seis baterias.

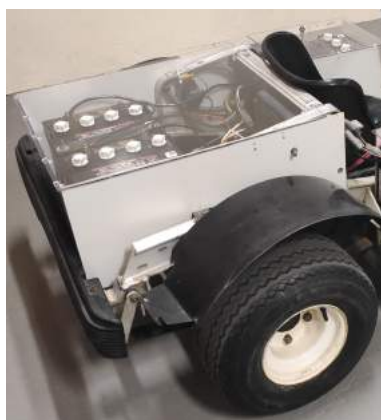


Figura 5.13: Proteções traseira do *kart*.

As localizações da tomada de carregamento, do botão andar/rebocar e do botão frente/trás foram ajustadas de forma a satisfazer as exigências da nova configuração do *kart*. Em suma a localização desses três componentes passou da posição original que se encontravam presos na estrutura de fibra de vidro junto do banco de baterias originais, para ficarem colocados na nova estrutura de proteção que comporta o *kart*.



Figura 5.14: Assinalado a verde está a posição original da tomada de carregamento.



Figura 5.15: Nova localização da tomada de carregamento.



Figura 5.16: Assinalado a verde está a posição original do botão andar/rebocar.



Figura 5.17: Nova localização do botão andar/rebocar.



Figura 5.18: Assinalado a verde está a posição original do botão frente/trás.



Figura 5.19: Nova localização do botão frente/trás.

A tomada de carregamento e o botão andar/rebocar ficaram inseridos nas placas traseiras de madeira, um componente de cada lado. Enquanto que o botão frente/trás ficou preso na proteção superior das baterias do lado direito do piloto, proteção esse que é feita de acrílico.

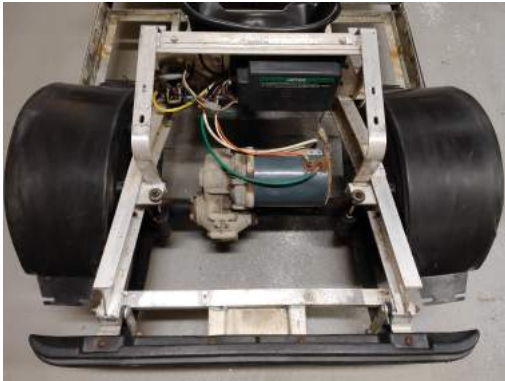


Figura 5.20: Motor DC, controlador, se-lenoide, entre outros componentes.



Figura 5.21: Apresentação final da parte de controlo e do motor DC

O módulo do controlador do *kart* implementado funciona com um sinal de 5V de tensão e este controla até 200A de corrente.

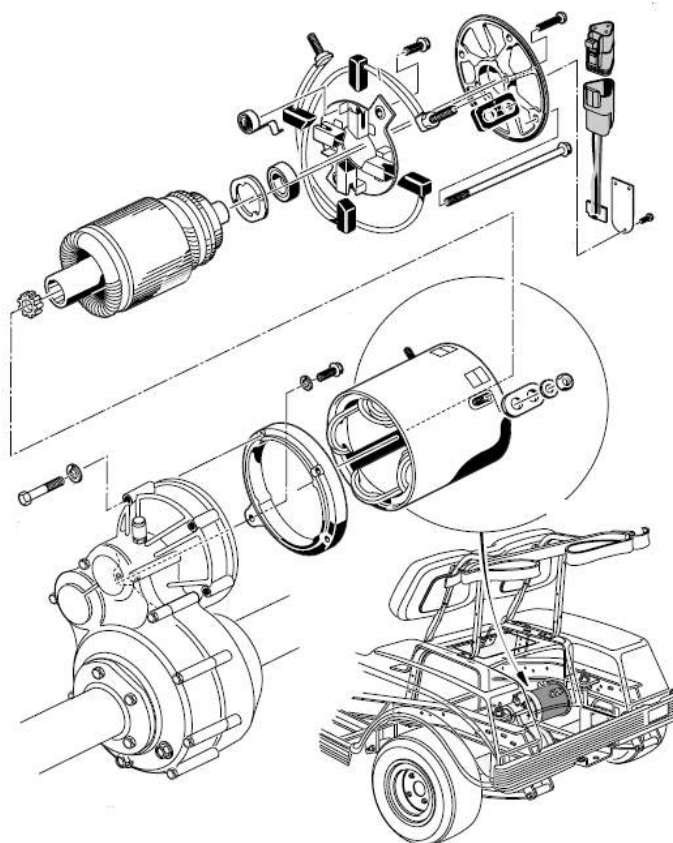


Figura 5.22: Esquemático do motor DC, imagem retirada do manual de fábrica [24].

O motor que se encontra instalado no *kart* é um motor PMDC de 48V com 3,2hp $\approx$ 2,39kW, um binário máximo de 20N.m, velocidade nominal com carga de 3654rpm e velocidade sem carga de 4000rpm [24].



Figura 5.23: Apresentação final do KE.

Certos componentes foram mantidos nas mesmas posições iniciais, nomeadamente o motor DC, o controlador, o selenoide, entre outros componentes.

5.3 Cálculos Teóricos

Condições iniciais para efectuar os cálculos teóricos: $V_{kart} = 6\text{m/s}$; $V_{vento} = 0\text{m/s}$ e inclinação do piso = 0° , ou seja, $x=0$. Considerou-se $V_{kart} = 6\text{m/s}$ porque é a velocidade máxima limitada pelo controlador.

Para o cálculo do peso do corpo será considerada uma massa aproximada de 480kg.

$$P = M * g = 480 * 9,81 = 4708,8\text{N} \quad (5.1)$$

Cálculo do coeficiente de resistência do rolamento.

$$Crr = 0,01 \left(1 + \frac{3,6}{100} * V_{kart} \right) = 0,01 \left(1 + \frac{3,6}{100} * 6 \right) = 0,01216 \quad (5.2)$$

Cálculo da força de resistência do rolamento.

$$F_{resis.rolam.} = P * Crr * \cos(x) = 4708,8 * 0,01216 * \cos(0) = 57,26\text{N} \quad (5.3)$$

Cálculo da força de arrasto aerodinâmico, considerando que $A_{kart} = 1,5\text{m}^2$.

$$F_{aerod} = \frac{1}{2} * \rho * A_{kart} * C_{aerod} * V_{kart}^2 = \frac{1}{2} * 1,18 * 1,5 * 0,47 * 6^2 = 14,97\text{N} \quad (5.4)$$

Cálculo da força total.

$$F_{total} = F_{resis.rolam.} + F_{aerod} = 57,26 + 14,97 = 72,23\text{N} \quad (5.5)$$

Cálculo do binário da força total.

$$Bin.F_{total} = F_{total} * r_r = 72,23 * 0,27 = 19,50N.m \quad (5.6)$$

Para as condições estudadas, o *kart* que foi implementado necessita de uma força de 72,23N com um binário de 19,50N.m, para atingir uma velocidade de 6m/s, o que equivale a 21,6km/h.

5.4 Simulação

Para o *kart* que foi implementado, sem a limitação de velocidade, obteve-se o seguinte resultado geral da simulação, gráfico da figura 5.24, que representa a velocidade do *kart* em m/s, com um valor máximo de 15m/s que corresponde a 54km/h. A azul o impulso do pedal do acelerador, pedal esse que faz acionar o controlador motor.

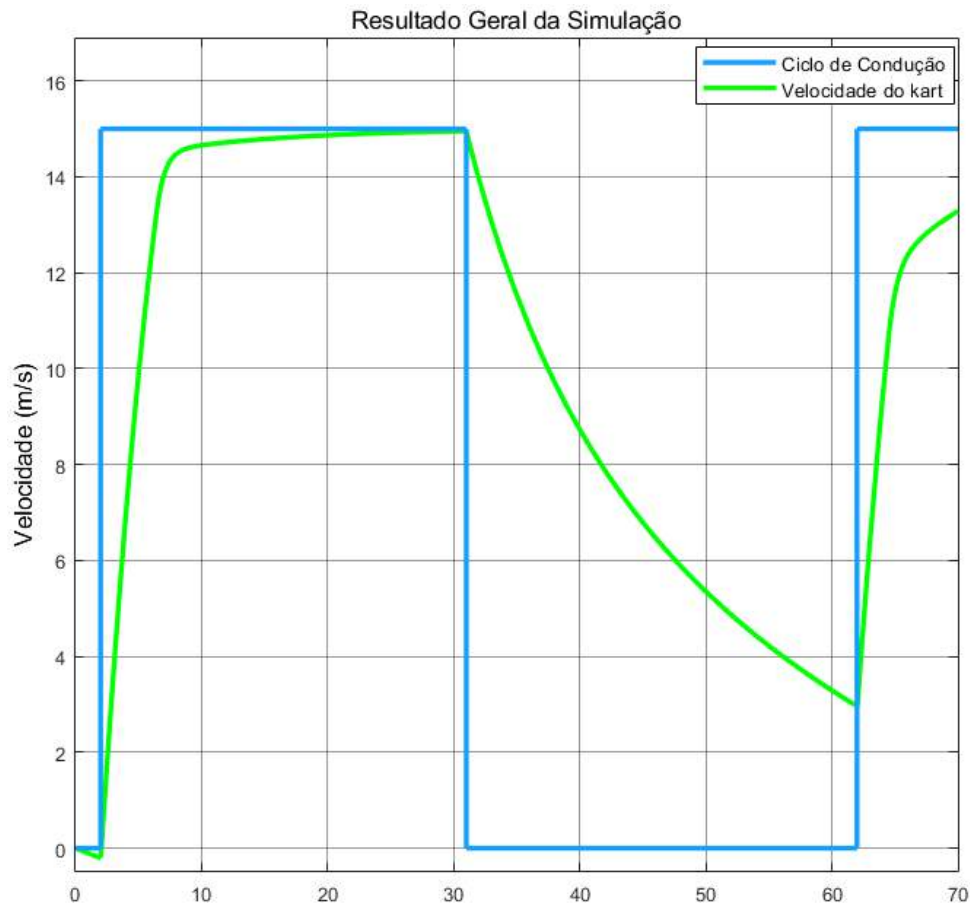


Figura 5.24: Gráfico que representa o resultado geral da simulação por um período de 70 segundos.

Como o controlador do *kart* implementado está limitado para uma velocidade máxima de 6m/s que corresponde a 21,6km/h. Efectuou-se no modelo de simulação essa determinada limitação e obteve-se o gráfico da figura 5.25.

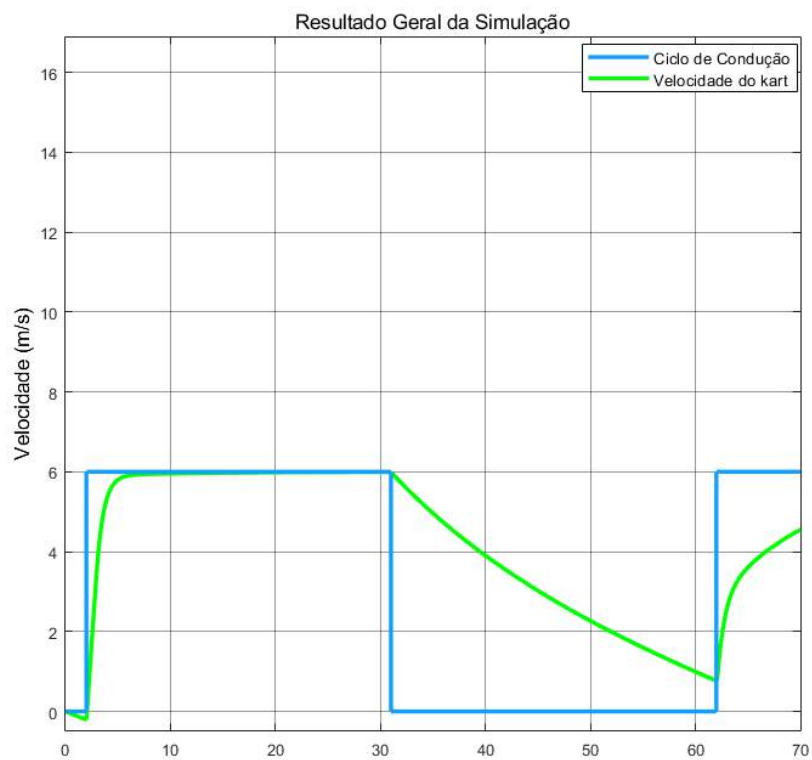


Figura 5.25: Gráfico que representa o resultado geral da simulação por um período de 70 segundos.

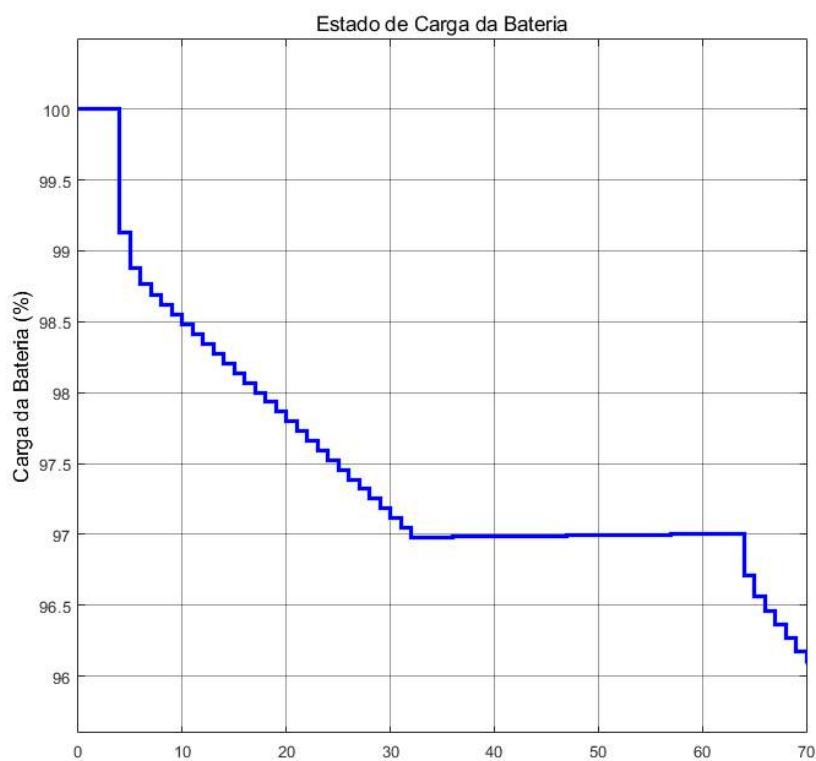


Figura 5.26: Gráfico que indica o ECB após uma simulação por um período de 70 segundos.

Na figura 5.26 está representado o gráfico que indica o ECB do *kart* implementado num determinado período de tempo.

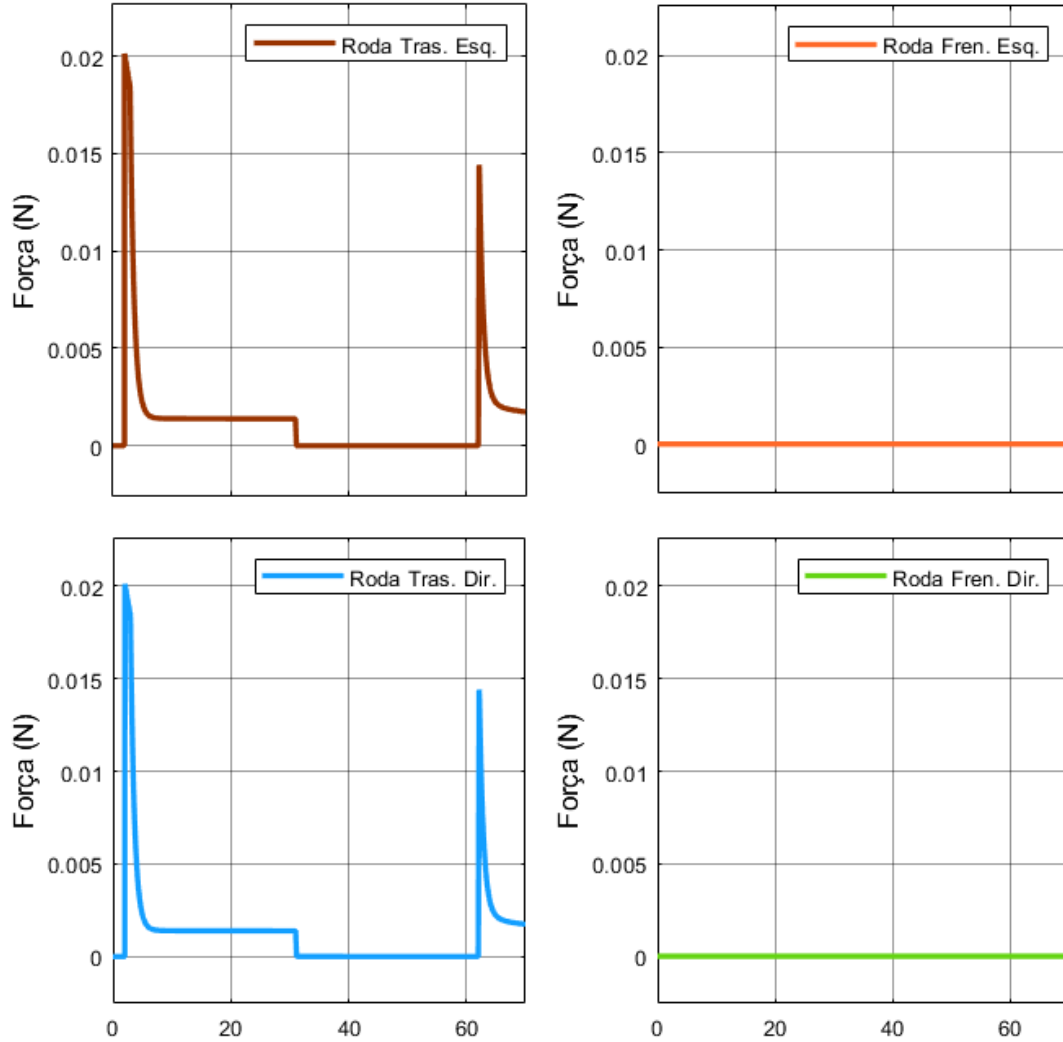


Figura 5.27: Gráfico de cada roda que representa a força (N) associada ao deslizamento relativo entre o pneu e o piso, por um período de 70 segundos.

No gráfico da figura 5.27 é apresentada a força que cada roda faz, associada ao deslizamento relativo entre o pneu e o piso.

5.5 Resultados Experimentais

Depois da implementação concluída fez-se alguns testes de modo a obter alguns resultados experimentais para averiguar e validar os estudos realizados.

Assumindo que a Velocidade Máxima (VM) do KE é de $\approx 6\text{m/s}$ ou 20km/h , devido ao bloqueio que o controlador faz no motor para não exceder essa velocidade.

Os testes tanto foram feitos em estrada plana como em estrada com declive.

Cálculos do plano inclinado:

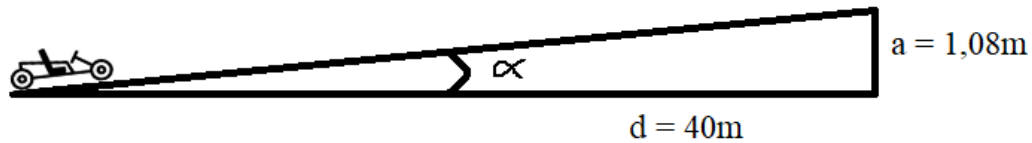


Figura 5.28: Proteções traseira do *kart*.

Cálculo do ângulo da inclinação do plano, em graus($^{\circ}$).

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{1,08}{40} \Leftrightarrow \alpha = \operatorname{tg}^{-1}(0,027) \Leftrightarrow \alpha = 1,55^{\circ} \quad (5.7)$$

O plano inclinado tem um ângulo de $1,55^{\circ}$.

Cálculo da percentagem (%) de inclinação do plano, para tal fez-se uma regra de 3 simples para 100m, pois assim o resultado do x é dado em metros e é convertido directamente para percentagem.

40 - 100

1,08 - x

$$x = \frac{1,08 * 100}{40} = \frac{108}{40} = 2,7m \quad (5.8)$$

O plano inclinado tem uma inclinação de 2,7%.

- **Numa estrada plana**

- Distância de travagem em estrada plana na VM. Resultado: 3 metros.
- Distância de travagem em estrada plana na metade da VM. Resultado: 0,9 metros.

Inclinação	Plano Horizontal	
Velocidade	0 - 10 km/h	0 - 20 km/h
1º teste	1,02 s	3,02 s
2º teste	1,01 s	2,99 s
3º teste	1,03 s	3,05 s
Média	1,02 s	3,02 s

Tabela 5.1: Testes cronometrados até atingir a VM e metade da VM, numa estrada plana

- Tempo de aceleração dos 0km/h até VM. Resultado: 3,02 segundos.
- Tempo de aceleração dos 0km/h até metade da VM. Resultado: 1,02 segundos.

- **Num plano inclinado no sentido ascendente**

- Distância de travagem na VM. Resultado: 2,7 metros.
- Distância de travagem na metade da VM. Resultado: 0,8 metros.

Inclinação	Ascendente	
Velocidade	0 - 10 km/h	0 - 20 km/h
1º teste	1,09 s	4,11 s
2º teste	1,05 s	4,16 s
3º teste	1,07 s	4,10 s
Média	1,07 s	4,123 s

Tabela 5.2: Testes cronometrados até atingir a VM e metade da VM, num plano inclinado no sentido ascendente

- Tempo de aceleração dos 0km/h até VM. Resultado: 4,123 segundos.
- Tempo de aceleração dos 0km/h até metade da VM. Resultado: 1,07 segundos.

- **Num plano inclinado no sentido descendente**

- Distância de travagem na VM. Resultado: 3,6 metros.
- Distância de travagem na metade da VM. Resultado: 1,3 metros.

Inclinação	Descendente	
Velocidade	0 - 10 km/h	0 - 20 km/h
1º teste	0,97 s	2,04 s
2º teste	0,96 s	2,02 s
3º teste	0,99 s	2,01 s
Média	0,973 s	2,023 s

Tabela 5.3: Testes cronometrados até atingir a VM e metade da VM, num plano inclinado no sentido descendente

- Tempo de aceleração dos 0km/h até VM. Resultado: 2,023 segundos.
- Tempo de aceleração dos 0km/h até metade da VM. Resultado: 0,973 segundos.

5.6 Conclusão

Segundo os cálculos teóricos para as condições apresentadas inicialmente verificou-se que o binário do motor de 20N.m é suficiente para o binário calculado que foi de 19,50N.m.

Pela simulação averiguou-se que tempo de aceleração dos 0m/s até aos 6m/s é de 3,2 segundos, como pode ser consultado na figura 5.29. Em que 1 é o ponto de partida com velocidade de 0m/s e o 2 é o ponto de VM com velocidade de 6m/s.

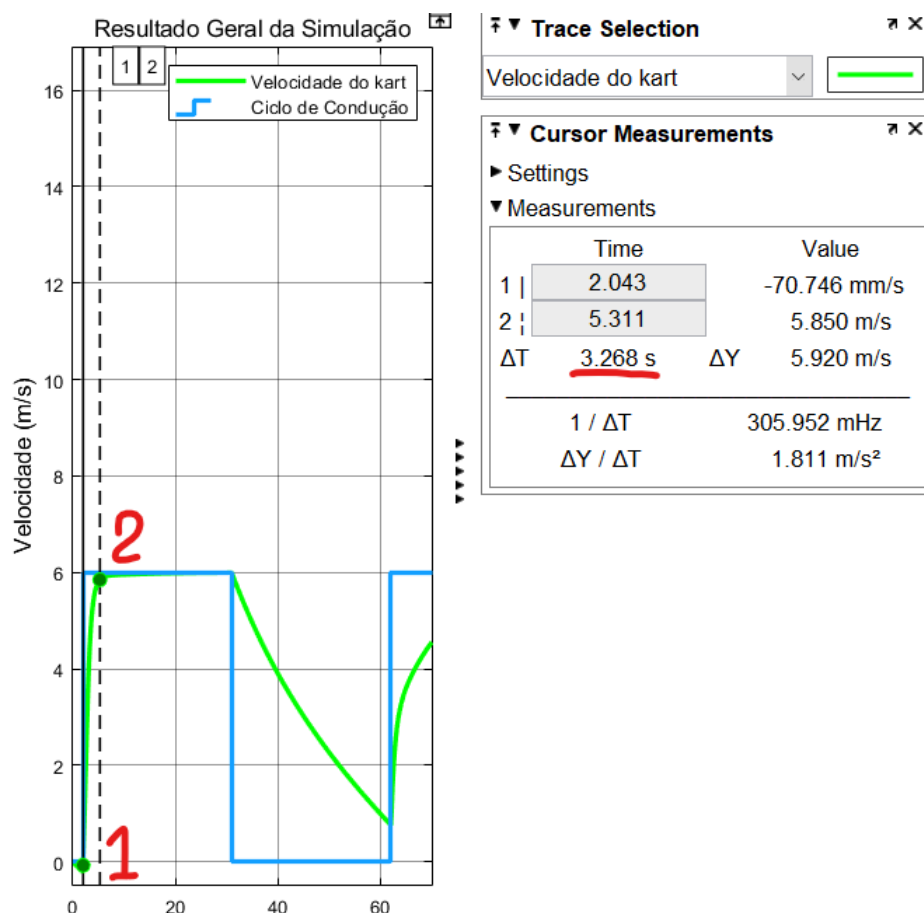


Figura 5.29: Gráfico que representa o resultado geral da simulação por um período de 70 segundos.

Tempo esse que é muito semelhante ao tempo de aceleração obtido nos resultados experimentais para uma estrada plana, com um tempo de aceleração dos 0km/h até aos 20km/h (VM dos testes realizados) de 3,02 segundos.

Com estes resultados e comparando os valores obtidos na parte teórica e na parte prática, podemos concluir que os estudos feitos, os cálculos teóricos, o modelo de simulação e os testes realizados com o *kart* implementado apresentam resultados concordantes entre eles.

CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

6.1 Conclusões

A elaboração desta Dissertação permitiu aprofundar os conhecimentos sobre os AE, nomeadamente a sua evolução histórica desde a sua criação.

Em relação ao KE é possível aferir algumas hipóteses de equipamentos a instalar no *kart*. Nomeadamente o Motor DC de Magnetos Permanentes com Escovas (PMDC), pois tendo em conta que o projecto trata-se de um *kart*, e sendo o *kart* um veículo com uma arquitectura simples e de dimensões reduzidas, faz mais sentido optar por um motor simples, de fácil instalação e utilização.

Porém, é de reconhecer que nos AE o motor mais indicado seria o Motor AC de Indução, pois é um motor com maior eficiência energética, maior densidade de potência e mais resistente a impactos mecânicos ou vibrações. Este tipo de motor também dispensa de uma manutenção muito pormenorizada em comparação com o motor DC, pois este não tem o comutador logo não necessita da substituição das escovas, o que demonstra ser uma vantagem no custo operacional. Com o Motor AC de Indução é necessário um inversor pois as baterias trabalham em DC, que acresce peso ao veículo. Mesmo sendo pouca a diferença de peso, no caso do *kart* faz diferença no seu desempenho em competições.

Em relação à bateria, as mais promissoras no mercado dos AE são as baterias de Ião de Lítio, pois são as baterias que atualmente apresentam maior densidade de energia. Esta tipologia de baterias, considerada a mais segura e com o maior alcance, ainda tem, no entanto, grande potencial evolutivo. Estas características levam a que seja a mais cara do mercado.

Outra opção na escolha da bateria seria a bateria de Ácido-Chumbo, pois ainda é considerada a melhor escolha para automóveis a combustão que requerem da baixa tensão

desta bateria para a ignição do motor, logo não necessita de uma grande tensão para o seu funcionamento. O mesmo acontece no KE idealizado para nesta Dissertação em que o motor a ser utilizado não necessita de uma tensão elevada, logo seria uma boa escolha de bateria para este projecto.

Nos dias de hoje a bateria de Ácido-Chumbo encontra-se bastante optimizada e tem um baixo custo, tornando-se assim bastante acessível.

Em relação à parte da gestão energética do *kart*, uma das opções seria desenvolver o próprio controlador, o que seria interessante, porém como já existem equipamentos no mercado que satisfazem essas necessidades, concluiu-se que não haveria necessidade de desenvolver um controlador de raiz.

Das ofertas que há no mercado relativamente aos controladores, uma das possibilidades seria um controlador da *Alltrax*.

Fez-se os devidos cálculos matemáticos e posteriormente efectuou-se uma simulação num *software* apropriado para aferir as respectivas características dos componentes constituintes do *kart*.

Para a implementação fez-se algumas modificações em um VE, alterações essas de maneira a que assemelha-se com um KE. No seguimento da modificação refez-se os cálculos teóricos e a simulação para posteriormente fazer-se alguns testes experimentais.

6.2 Futuros Trabalhos

No seguimento do desenvolvimento desta Dissertação serão indicadas algumas melhorias que poderão ser implementadas para complementar outras vertentes do KE como:

- medir a velocidade instantânea;
- medir os quilómetros percorridos;
- medir a temperatura do motor;
- medir a pressão dos pneus;
- calcular o consumo de energia;
- calcular a autonomia energética;
- substituir o tipo de bateria, Ácido-Chumbo por Ião de Lítio, que oferece melhorias significativas;
- instalar sensores para medir a tensão e a corrente ao longo de vários pontos cruciais do circuito eléctrico;
- desenvolver e produzir um controlador próprio;
- desenvolver um sistema de controlo remoto para *kart*;

- a aquisição de painéis solares para serem instalados no KE para posteriormente carregarem das baterias. Num cenário utópico, algo como atingir a capacidade de autonomia energética infinita do KE;
- transformar em um KE autónomo com recurso à instalação alguns sensores espalhados pelo *kart* e com o desenvolvimento de um controlador autónomo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] JATO, “In September 2020, for the first time in European history, registrations for electrified vehicles overtook diesel”, *JATO European Volumes Press Release*, 2020.
- [2] R. Katakey, *UK could ban non-electric new car sales by 2030, says Shell*. URL: <https://www.worldoil.com/news/2020/7/17/uk-could-ban-non-electric-new-car-sales-by-2030-says-shell> (acedido em 24/11/2020).
- [3] Agência LUSA, *Venda de carros elétricos na Europa duplicou em 2020*. URL: https://www.lusa.pt/article/MQNB88T_STKuvFdBfzZQrDMSZM5iuSI1/venda-de-carros-el{\'e}tricos-na-europa-duplicou-em-2020 (acedido em 04/02/2021).
- [4] Fia Formula E, *History of Formula E*. URL: <https://www.fiaformulae.com/en/discover/history> (acedido em 20/01/2021).
- [5] ExtremeE, *Electric Odyssey*. URL: <https://www.extreme-e.com/> (acedido em 21/01/2021).
- [6] Fia Formula, *Formula 1 announces plan to be Net Zero Carbon by 2030*. URL: <https://www.formula1.com/en/latest/article.formula-1-announces-plan-to-be-net-zero-carbon-by-2030.5IaX2AZHy7jqx16wra6CZ.html> (acedido em 21/01/2021).
- [7] Fia Formula 1, *How Formula 1 will lead the charge to use biofuels*. URL: <https://www.formula1.com/en/latest/article.how-formula-1-will-lead-the-charge-to-use-biofuels.1xWqy8GilwMBsjKyPiFf.html> (acedido em 21/01/2021).
- [8] K. M. Ebrahimi, M. Ehsani, Y. Gao e Stefano Longo, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*, 3ª Edição, CRC Press, ed. New York, EUA, 2018, pp. 11–346.
- [9] L. J. Contente, “La Jamais Contente”, 1994. URL: <http://blog.hemmings.com/index.php/tag/la-jamais-contente>.
- [10] Tesla, *Tesla’s mission is to accelerate the world’s transition to sustainable energy*. URL: <https://www.tesla.com/about> (acedido em 23/02/2021).
- [11] T. Denton, “Electric and Hybrid Vehicles”, em, Routledge, ed., 1ª Edição, New York, EUA, 2016, pp. 77–158.
- [12] K. T. Chau, *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*, 1ª Edição, John Wiley Sons Singapore Pte. Ltd., ed. Solaris South Tower, Singapore: IEEE, 2015, pp. 20–102.

- [13] Fia Karting, *Fia Karting - History*. URL: <https://www.fiakarting.com/history> (acedido em 23/02/2021).
- [14] K. Hee Nam e R. E. Neapolitan, *AC motor control and electrical vehicle applications*, 2ª Edição, CRC Press, ed. New York, EUA, 2019, pp. 87–92, ISBN: 9781138712492. DOI: 10.1201/9781315200149-7.
- [15] B. Business, *Ac motor vs Dc motor: Which one is better for EVs?* URL: <https://www.boldbusiness.com/transportation/ac-motor-vs-dc-motor-one-better-evs/> (acedido em 24/02/2021).
- [16] P. Breeze, *Power Generation Technologies*, 3ª Edição. Cambridge: Elsevier Ltd., 2019, p. 239, ISBN: 9780081026311.
- [17] P. P. Prosini, *Iron Phosphate Materials as Cathodes for Lithium Batteries*. London: Springer-Verlag, 2011, p. 4, ISBN: 9780857297440. DOI: 10.1007/978-0-85729-745-7.
- [18] M. Hořan, L. Streit, M. Kubík e J. Holeček, *Concept of electric kart with LiFeYPO4 batteries*. 2011 International Conference on Applied Electronics, 2011.
- [19] C. Cardoso, J. Ferreira, V. Alves e R. Araujo, “The design and implementation of an electric go-kart for education in motor control”, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006.*, 2006. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2006.1650003.
- [20] A. Oliveira, “Desenvolvimento de Conceito , Implementação e Teste de Plataforma Eléctrica em Kart Ajustável”, tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.
- [21] Massachusetts Institute of Technology (MIT), *The Cap Kart (v2.0)*, 2010. URL: <http://web.mit.edu/first/kart/#specs> (acedido em 26/05/2021).
- [22] ALLTRAX INC, *ALLTRAX – Motor Controllers for the Electric Vehicle Industry*. URL: <https://alltraxinc.com/>.
- [23] F. A. Salem, “Mechatronics design of small electric vehicles; research and education”, *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, vol. 13, pp. 26–32, 2013.
- [24] Club Car, *Club Car 2001-2002 DS Golf Cars illustrated parts list, gasoline/electric*. Club Car, Inc., 2001.





ON THE RIGIDITY OF MARGINALS

ANDREW A. KATZ AND JONATHAN M. LEE