

RICARDO MANUEL ROSA DOMINGOS

*VEÍCULO ELÉTRICO-SOLAR URBANO COM
GRANDE AUTONOMIA*



Instituto Superior de Engenharia

2019

RICARDO MANUEL ROSA DOMINGOS

*VEÍCULO ELÉTRICO-SOLAR URBANO COM
GRANDE AUTONOMIA*

Mestrado em Engenharia Elétrica e Eletrónica

Especialidade de Sistemas de Energia e Controlo

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Coordenador Doutor Isménio Lourenço Eusébio Martins



UNIVERSIDADE DO ALGARVE

Instituto Superior de Engenharia

2019

VEÍCULO ELÉTRICO-SOLAR URBANO COM GRANDE AUTONOMIA

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências bibliográfica incluída.

© 2019, RICARDO MANUEL ROSA DOMINGOS

Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

Resumo

Este projeto tem como fundamento a conceção de um veículo elétrico que possibilite o transporte de duas pessoas e respetiva bagagem. Focado para uma utilização turística ou particular, no Algarve, onde o meio urbano é em grande parte contínuo em toda a sua costa sul. Adicionalmente o Algarve possui uma grande abundância de dias de sol, logo este projeto irá averiguar a viabilidade e utilidade deste veículo com geração fotovoltaica integrada.

A conceção do projeto do veículo, inclui o esboço da carroçaria exterior, a escolha e implementação dos vários componentes constituintes do veículo. É também estudada a performance do automóvel através de uma análise às forças resistentes ao movimento. De seguida, é abordado, o modelo matemático utilizado para a simulação dinâmica do veículo. A aplicação do modelo do veículo elétrico a várias situações de estudo leva à simulação e análise. Finalmente, é efetuado o ensaio teórico do veículo projetado em diversas situações, os resultados são estudados de modo a tirar as conclusões da sua aplicação em situação real.

Abstract

This project is based on the design of an electric vehicle that allows the transport of two passengers and their luggage. Focused on a touristic or private use, in the Algarve, where the urban environment is largely continuous across its south coast. In addition, the Algarve has a great abundance of sunny days, so this project will investigate the feasibility and usefulness of this vehicle with integrated photovoltaic generation.

The design of the vehicle includes the outline of the exterior bodywork, the choice and implementation of the various constituent components of the vehicle. It is also studied the performance of the automobile through an analysis to all the drag forces resistant to movement. The mathematical model used for the dynamic simulation of the vehicle is then approached. The application of the electric vehicle model is used to various study situations, that leads to simulation and analysis. Finally, the theoretical test of the vehicle designed in several situations is carried out, the results are studied in order to draw the conclusions of its application in a real-life scenario.

Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem a colaboração de diversas pessoas, pelo que é indispensável um agradecimento a todos os que contribuíram neste projeto direta ou indiretamente.

Agradeço em especial ao Prof. Doutor Isménio Martins, imprescindível à realização deste projeto. A sua enorme disponibilidade e dedicação, foram essenciais à evolução deste projeto até mesmo antes do ponto de partida. Agradeço também, a todo o corpo docente do departamento de Engenharia Eletrotécnica, do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve, que estiveram sempre disponíveis com grande amabilidade, em todo o meu percurso académico na Universidade do Algarve.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus pais pela sua enorme motivação e apoio, sem os quais, seria impossível a realização deste projeto.

SIMBOLOGIA

A	- Área dos módulos fotovoltaicos (m^2) / Área frontal do veículo (m^2);
a_g	- Aceleração da gravidade (m/s^2);
c_a	- Coeficiente de atrito aerodinâmico;
c_r	- Coeficiente de rolamento;
E	- Força eletromotriz (V);
\dot{E}_1	- Força eletromotriz complexa indutora do estator (V);
\dot{E}'_2	- Força eletromotriz complexa induzida no rotor, refletida ao estator (V);
e^-	- Eletrão;
F_{ar}	- Força resistente aerodinâmica (N);
F_g	- Força resistente gravítica (N);
F_i	- Força equivalente da inércia (N);
F_m	- Força motora (N);
F_m	- Força resultante da força motora (N);
F_r	- Força resistente resultante (N);
F_r	- Força resultante (N).
F_{roda}	- Força de tração na roda (N);
F_{rol}	- Força resistente ao rolamento (N);
$FePO_4$	- Molécula de Fosfato de Ferro;
Fg	- Peso (N);
Fn	- Força de reação normal (N);

G	- Radiação incidente (W/m^2);
I	- Corrente do módulo fotovoltaico (A) / Corrente na barra condutora (A);
\dot{I}_{0m}	- Corrente complexa de magnetização (A);
\dot{I}_{0p}	- Corrente complexa para as perdas no circuito ferromagnético (A);
\dot{I}_1	- Corrente complexa do estator (A)
\dot{I}'_2	- Corrente complexa do rotor refletida ao estator (A);
I_0	- Corrente de saturação do díodo (A)
\dot{i}_a	- Corrente contínua no induzido (A);
I_d	- Corrente de fuga do díodo (A);
I_{MPP}	- Corrente no ponto de máxima potência (A);
I_{ph}	- Corrente fotovoltaica (A);
J	- Momento de inércia de cada roda ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) / Momento de inércia do rotor ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);
J_c	- Momento de inércia equivalente do veículo no veio do motor ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);
J_m	- Momento de inércia do rotor ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);
k	- Constante de Boltzmann
k_r	- Relação de transmissão entre o motor e a roda;
k_v	- Ganho de velocidade proporcional;
$k\phi$	- Constante de velocidade do motor de corrente contínua;
L_a	- Indutância do induzido (H);
Li^+	- Íon Lítio;
LiFePO_4	- Molécula de Lítio Fosfato de Ferro;
m	- Massa do veículo (kg);
m_{eq}	- Massa equivalente do veículo (kg);
n	- Fator de idealidade do díodo ($1 \leq n \leq 2$) / número de rodas do veículo;

n	- Velocidade de rotação do veio do motor (r.p.m.);
n_{ref}	- Velocidade de referência do veio do motor (r.p.m.);
n_s	- Número de células fotovoltaicas em série;
ne	- Velocidade de rotação do eixo do veículo (r.p.m.);
ne_{ref}	- Valor de referência da velocidade do eixo do veículo (r.p.m.);
P	- Potência (W);
p	- Pressão de enchimento dos pneus (bar);
P_{EM}	- Potência eletromagnética (W);
p_{J2}	- Perdas por efeito de Joule no rotor (W);
P_{MEC}	- Potência mecânica útil (W);
p_r	- Perdas diversas no motor (W);
q	- Carga do eletrão;
r	- Raio da roda do veículo (m);
R'_2	- Resistência elétrica do rotor refletida ao estator (ohm);
R_0	- Resistência elétrica equivalente das perdas no circuito ferromagnético (ohm);
R_1	- Resistência elétrica do estator (ohm);
R_a	- Resistência elétrica do induzido (ohm);
R_p	- Resistência em paralelo (ohm);
R_{roda}	- Raio da roda (m);
R_s	- Resistência em série (ohm);
s	- Escorregamento do motor;
T	- Temperatura em Kelvin / Binário útil do motor (N.m);
T_e	- Binário eletromagnético (N.m);
T_L	- Binário de carga no veio do motor (N.m);

T_{re}	- Binário resistente aplicado no eixo do veículo (N.m);
T_{roda}	- Binário na roda (N.m);
T_{ω}	- Binário devido à inércia do rotor (N.m);
U	- Tensão contínua no induzido (V);
\dot{U}_1	- Tensão complexa aplicada ao estator (V);
U_F	- Tensão contínua de excitação (V);
V	- Tensão do módulo fotovoltaico (V);
v	- Velocidade de deslocamento do veículo m/s.
V_L	- Tensão na indutância (V);
V_{MPP}	- Tensão no ponto de máxima potência (V);
V_R	- Tensão na resistência (V);
v_r	- Velocidade de referência;
v_{ref}	- Valor de referência da velocidade deslocamento do veículo (m/s);
v_T	- Tensão térmica equivalente do módulo fotovoltaico;
v_x	- Velocidade de deslocamento do veículo (km/h);
X'_2	- Reactância de fugas do rotor refletida ao estator (ohm);
X_0	- Reactância de magnetização (ohm);
X_1	- Reactância de fugas magnéticas do enrolamento do estator (ohm);
ρ	- Densidade mássica volúmica do ar em condições PTN (kg/m ³);
ω	- Velocidade angular do rotor (rad/s)/ velocidade angular da roda (rad/s);
ω_m	- Velocidade angular do rotor (rad/s);
ω_s	- Velocidade angular do campo magnético (rad/s);

Abreviaturas

AGM - *Absorbent Glass Mat*;

A-Si	- Silício Amorfo;
BLDC	- <i>Brushless Direct Current</i> ;
CC	- Corrente Contínua;
CdTe	- Telureto de Cádmio;
CO ₂	- Dióxido de carbono;
DC	- <i>Direct Current</i> ;
f.e.m	- Força Electro motriz;
INC	- <i>Incremental Conductance</i> ;
Li-ion	- Lithium Ion;
LiPo	- Lítio Polímero;
Li-Polymer	- <i>Lithium Polymer</i> ;
Mono-Si	- Mono cristal de Silício;
MPP	- <i>Maximum Power Point</i> ;
MPPT	- <i>Maximum Power Point Tracking</i> ;
NEDC	- <i>New European Driving Cycle</i> ;
Ni-Cd	- Níquel Cádmio;
Ni-MH	- Níquel-Hidreto Metálicos;
P&O	- <i>Perturb and Observe</i> ;
Poly-Si	- Policristalino de Silício;
PV	- <i>Photovoltaic</i> ;
SAE	- <i>Society of Automotive Engineers</i> ;
STC	- <i>Standard Test Conditions</i> ;
TFSC	- <i>Thin-film solar cell</i> ;
UPS	- <i>Uninterruptible power supply</i> ;
VRLA	- <i>Valve Regulated Lead-Acid</i> ;
WLTP	- <i>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure</i> ;

CONTEÚDO

RESUMO	I
ABSTRACT.....	II
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 LEGISLAÇÃO	3
1.3.1 <i>Procedimento Mundial Harmonizado Para Teste De Veículos Ligeiros</i>	3
1.4 ESTRUTURA DO PROJETO.....	5
1.5 ESTADO DA ARTE.....	6
1.6 ENERGIA SOLAR.....	9
1.6.1 <i>O Efeito Fotoelétrico.....</i>	9
1.6.2 <i>A Radiação Solar.....</i>	11
1.6.3 <i>Tipos de Painéis Fotovoltaicos.....</i>	13
1.6.4 <i>Modelos de Painéis Fotovoltaicos.....</i>	17
1.6.5 <i>Características dos Painéis Fotovoltaicos.....</i>	20
1.6.6 <i>Maximização da Potência dos Painéis Fotovoltaicos.....</i>	22
1.7 BATERIAS UTILIZADAS EM VEÍCULOS.....	26
1.7.1 <i>Baterias de Chumbo-Ácido.....</i>	27
1.7.2 <i>Baterias de Iões Lítio.....</i>	32
1.8 MOTOR ELÉTRICO	34
1.8.1 <i>Motor de Indução</i>	34
1.8.2 <i>Motor de Corrente Contínua</i>	40
1.8.3 <i>Motor de Corrente Contínua Sem Escovas (BLDC)</i>	44
1.9 SISTEMAS MECÂNICOS DE TRANSMISSÃO	46
1.9.1 <i>Comparação de Dois Sistemas de Transmissão.....</i>	48
2 MODELO DINÂMICO DE UM VEÍCULO.....	50

2.1 FORÇAS RESISTENTES AO MOVIMENTO	51
2.1.1 Força Resistente ao Rolamento	52
2.1.2 Força Resistente Aerodinâmica.....	53
2.1.3 Força Resistente pela Ação da Gravidade.....	54
2.1.4 Força Resistente Devido à Inércia.....	56
2.1.5 Perfil Temporal da Resistência ao Movimento	57
2.2 MODELO DINÂMICO DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA.....	58
2.2.1 Modelo Matemático.....	59
2.2.2 Equação Dinâmica.....	61
2.2.3 Equações no Sentido Entrada-Saída.....	62
2.3 MODELO DINÂMICO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO	64
3 PROJETO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO SOLAR.....	72
3.1 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	72
3.2 PROPOSTA DE CARROÇARIA	73
3.3 PROPOSTA DE CHASSIS.....	75
3.4 CONSTITUIÇÃO DA BATERIA DO VEÍCULO	77
3.5 IMPLEMENTAÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	80
3.6 MOTOR ELÉTRICO	82
4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS.....	83
4.1 FORÇAS RESISTENTES E DESEMPENHO EM REGIME PERMANENTE.....	84
4.1.1 Resistência ao Rolamento.....	84
4.1.2 Resistência Aerodinâmica.....	85
4.1.3 Força Resistente Gravítica.....	86
4.1.4 Resultante das Forças Resistentes.....	87
4.2 SIMULAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	89
4.3 SIMULAÇÃO DINÂMICA DO VEÍCULO ELÉTRICO.....	90
4.3.1 Rodas.....	91
4.3.2 Transmissão.....	94
4.3.3 Motor Elétrico.....	95
4.4 AUTONOMIA COM O WORLDWIDE HARMONISED LIGHT VEHICLE TEST PROCEDURE.....	97
4.4.1 Sem Geração de Energia.....	97

4.4.2 Com Geração Fotovoltaica.....	98
4.5 AUTONOMIA INFINITA.....	99
4.5.1 De Junho a Agosto.....	100
4.5.2 De Abril a Setembro.....	101
4.5.3 De Fevereiro a Novembro	102
4.5.4 Movimento ao Longo do Ano.....	103
4.6 TRAVESSIA DO ALGARVE.....	105
5 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	107
6 BIBLIOGRAFIA.....	109
7 ANEXOS.....	112
7.1 ANEXO A.....	112
7.2 ANEXO B.....	113
7.3 ANEXO C.....	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Perfil temporal do ciclo de testes WLTP para veículos de classe 1 [3].....	4
Figura 2- Protótipo de carro solar da Honda [5].....	6
Figura 3- Fotografia do veículo solar Stella [6].	7
Figura 4- Modelo elétrico da Hyundai com tejadilho fotovoltaico [7].....	8
Figura 5- Energia cinética do fotoelectrão em diferentes materiais [9].	10
Figura 6- Funcionamento de uma célula fotovoltaica [10].....	11
Figura 7- espectro radiação solar no planeta Terra [11].....	12
Figura 8 -Energia mensal da radiação solar incidente num plano horizontal em Faro [12].	12
Figura 9- Painel Fotovoltaico de Silício Monocristalino [13].....	14
Figura 10- Painel Fotovoltaico de Silício Policristalino [13].....	14
Figura 11- Circuito equivalente com um díodo ideal [16].	17
Figura 12- Circuito equivalente real de 1 um díodo [16].	19
Figura 13- Característica V-I para radiância variável (G) [16].	20
Figura 14- Característica V-I para uma temperatura variável T (Celsius) [16].....	21
Figura 15- Característica P-V para radiância variável (G) [16].	21
Figura 16- Característica P-V para uma temperatura variável T (Celsius) [16].....	22
Figura 17- Diagrama típico da implementação do MPPT [17]	22
Figura 18- Fluxograma do algoritmo INC [19].....	24
Figura 19- Fluxograma do algoritmo do P&O [19].....	25
Figura 20- Comparação entre baterias Chumbo-Ácido e de Iões Lítio [20].	27
Figura 21- Ilustração de uma bateria de arranque [20].....	28

Figura 22- Ilustração de uma bateria de ciclo profundo [20].	29
Figura 23-Funcionamento da bateria de íões lítio [22].....	33
Figura 24- Campo magnético móvel através das barras numa gaiola de esquilo [24]... 36	
Figura 25- Rotor em gaiola de esquilo.	36
Figura 26: Circuito equivalente do motor de indução [24].	37
Figura 27: Curva binário velocidade do motor de indução [24].....	40
Figura 28- Gerador elementar de corrente contínua [25].	41
Figura 29- Tensão aos terminais das escovas após a rotação completa de uma espira [25].	42
Figura 30- Circuito equivalente de uma máquina com excitação separada [25].....	42
Figura 31- Curva característica de binário-velocidade [25].	43
Figura 32- Constituição de motor com escovas [26].	44
Figura 33- Constituição de motor sem escovas [27].	45
Figura 34- Transmissão por correia [28].	46
Figura 35- Transmissão por corrente [28].	47
Figura 36- Transmissão por engrenagem [28].	47
Figura 37- Sistema de transmissão de dois eixos distanciados.	47
Figura 38- Modelo simplificado da resistência ao rolamento.	52
Figura 39- Exemplo de simulação aerodinâmica [29].	54
Figura 40- Representação das forças num plano inclinado.	55
Figura 41- Perfil temporal do binário resistente no motor de um veículo.....	58
Figura 42- Circuito equivalente de um motor de corrente contínua [31].	58
Figura 43- Diagrama de blocos do motor de corrente contínua.	63
Figura 44- Bloco de entradas-saídas do simulador carro elétrico.	64
Figura 45- Modelo dinâmico de um veículo elétrico.	64
Figura 46- Perfil temporal de velocidade.	65

Figura 47- Controlador proporcional de velocidade.....	66
Figura 48- Conversão eletromagnética da energia elétrica em energia mecânica.....	66
Figura 49- Transformação do binário motor em força de tração na roda.....	67
Figura 50- Conversão das forças nas rodas em velocidade.	68
Figura 51- Modelo dinâmico do veículo. a) Perfil de velocidade que controla o motor. b) Conversão eletromecânica. c) Conversão da força em velocidade. d) Forças resistentes ao movimento. e) Determinação da f.e.m. em função da velocidade.....	69
Figura 52- Simulação dinâmica de um veículo elétrico. a) Perfil temporal de velocidade. b) Potência elétrica consumida e Potência mecânica útil. c) Binário motor e Tensão de alimentação. d) Consumo de energia elétrica.	71
Figura 53- Vista superior do veículo.	74
Figura 54- Vista frontal do veículo.....	74
Figura 55- Vista lateral do veículo, mostrando a distribuição dos painéis fotovoltaicos.	75
Figura 56- Vista frontal-lateral da proposta de chassis.	76
Figura 57- Vista superior do chassis.....	76
Figura 58- Bateria Voltronix 180 Ah Lítio Fosfato de Ferro [32].	77
Figura 59- Dimensões da bateria [32].	77
Figura 60- Dimensões da bateria.	79
Figura 61- Circuito Equivalente da ligação das baterias.	79
Figura 62- Modelo MPPT para diferentes painéis [33].....	80
Figura 63- Agrupamento dos painéis fotovoltaicos.....	81
Figura 64- Motor elétrico do veículo.....	82
Figura 65- Resistência ao rolamento em função da velocidade.	85
Figura 66- Resistência aerodinâmica em função da velocidade.....	86
Figura 67- Força resistente gravítica em função do declive.....	87

Figura 68- Potência total necessária para o movimento a diferentes declives em função velocidade.....	88
Figura 69- Distância percorrida por kWh em função da velocidade.....	88
Figura 70- Disposição dos painéis fotovoltaicos para simulação.....	89
Figura 71- Constituição do simulador do veículo.	91
Figura 72- Bloco de simulação das rodas.....	92
Figura 73- Simulação das Rodas.	92
Figura 74- Bloco de simulação da transmissão.	94
Figura 75- Bloco de simulação do motor.	96
Figura 76- Energia média diária de geração fotovoltaica no veículo.	98
Figura 77- Autonomia média diária utilizando exclusivamente a energia fotovoltaica gerada.....	99
Figura 78- Estado de carga na bateria para 20 km/h.	100
Figura 79- Estado de carga na bateria para 15 km/h.	101
Figura 80- Estado de carga na bateria para 10 km/h.	102
Figura 81- Estado de carga na bateria para 10 km/h.	103
Figura 82- Velocidade ao longo do ano para autonomia infinita.	104
Figura 83- Distância diária percorrida ao longo do ano exclusivamente com energia fotovoltaica.	105
Figura 84- Percurso Sagres- Vila Real de Santo António.	105
Figura 85- Perfil de inclinações do percurso.....	106

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica e científica juntamente com a preocupação ambiental e de saúde pública, tem levado ao investimento em formas de energia não poluentes e não dependentes de produtos petrolíferos. Os veículos automóveis não têm sido excluídos desta evolução. Atualmente, vai sendo cada vez mais comum a existência de veículos elétricos e híbridos, mas ainda há um certo preconceito dos condutores relativamente a este tipo de veículos, mais concretamente em relação às baterias, ao seu custo de substituição, autonomia e tempo de carga.

De modo a resolver o incómodo dos tempos de carga e autonomia, seria vantajosa a aplicação de dispositivo de geração de energia que, numa situação ideal, fosse capaz de proporcionar uma autonomia que se pudesse considerar infinita.

Neste trabalho, projeta-se um veículo alimentado com geração fotovoltaica. Não é feita uma abordagem detalhada dos vários constituintes do veículo. O objetivo deste projeto é o estudo do funcionamento de um automóvel que tenha a possibilidade de atingir uma autonomia infinita (Autonomia infinita significa que a geração fotovoltaica é suficiente para o movimento do veículo e para carregar as baterias a serem utilizadas nos momentos em que não há sol, à noite).

1.1 Motivação

A mobilidade urbana constitui uma das principais fontes de emissão de gases de efeito de estufa, assim como da emissão de poluentes prejudiciais à saúde de seres humanos e animais. Os veículos com motor de combustão interna são os responsáveis por essas emissões, mas também são fonte de ruído e de congestionamento. A utilização de veículos elétricos em meio urbano poderá ser uma forma de redução dos efeitos nefastos da mobilidade. No entanto, a utilização de um grande número de veículos elétricos poderá conduzir a importantes sobrecargas da rede elétrica. Assim, do mesmo modo que há apostas na microgeração para a alimentação elétrica de edifícios, os veículos também poderão ser dotados de um sistema de carga solar individual.

A utilização de pequenos veículos, com velocidade limitada, com sistema de carga solar, permitirá diminuir a poluição, a emissão de gases de efeito de estufa, diminuindo também o ruído devido à mobilidade urbana e ao congestionamento.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste projeto de mestrado é a criação de um veículo elétrico de passageiros alimentado com painéis solares fotovoltaicos de modo a obter uma autonomia que se pretende que possa ser ilimitada nos períodos do ano com maior insolação solar.

O veículo destina-se a deslocações em ambiente urbano, a baixa velocidade, até 30 km/h, podendo servir de meio de transporte em circuitos turísticos em zonas históricas, integrado ou não em frotas de hotéis, municípios ou mesmo para utilização individual.

O veículo a projetar enquadra-se na classe dos quadrículos para dois passageiros. Pretende-se que a massa do veículo seja suficiente baixa para que a energia recolhida dos painéis solares, em condições normais de insolação no verão, seja suficiente para assegurar o movimento do veículo e, ao mesmo tempo, a carga da bateria [1].

1.3 Legislação

Pretende-se projetar um veículo de dois eixos e quatro rodas com pequenas dimensões, ideal para circuito urbano, que possua o espaço suficiente para o transporte de duas pessoas mais bagagem. Sendo um os principais objetivos a utilização urbana, é indispensável a compatibilidade do veículo com a legislação em vigor, de modo a que as suas características e dimensões permitam a sua livre circulação na via pública. De acordo com o decreto de lei nº 265-A/2001 [2], assim como com o artigo 107.º do código da estrada, lista-se na Tabela 1 a classificação e as características limite do veículo. No caso de veículos elétricos com armazenamento de energia em baterias, a massa das baterias não tem limite por lei, nem é quantificada no valor da tara máxima.

Tabela 1- Características limite de classificação do veículo [4]	
Classificação do Veículo	Quadriciclo ligeiro
Velocidade máxima	45 km/h
Tara máxima (baterias não incluídas)	350 kg
Potência máxima do motor	4 kW

1.3.1 Procedimento Mundial Harmonizado Para Teste De Veículos Ligeiros

Outro aspeto legal prende-se com as condições normalizadas de teste de veículos. Desde a década de 80 foi utilizado o chamado de *New European Driving Cycle* (NEDC). Devido a evoluções na tecnologia e nas condições de condução, ficou desatualizado. Então, a União Europeia desenvolveu um novo teste, denominado Procedimento Mundial Harmonizado para Teste de Veículos Ligeiros, *Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure*, (WLTP) que entrou em vigor a partir de 2017. A indústria automóvel da União Europeia congratulou-se com a mudança para o WLTP, tendo contribuído ativamente para o desenvolvimento deste novo ciclo de testes.

Enquanto os valores do teste NEDC foram determinados com base num perfil de condução teórico, o ciclo WLTP foi desenvolvido usando dados reais, reunidos em todo o mundo. Assim, o WLTP representa melhor os perfis de condução do dia-a-dia.

O ciclo de condução WLTP é dividido em quatro partes com diferentes velocidades médias: baixa, média, alta e extra alta. Cada parte contém uma variedade de fases de condução: parado; aceleração; fases de travagem. Para um determinado tipo de veículo, cada configuração da transmissão de potência é testada com o WLTP para a versão mais leve (mais econômica) e mais pesada (menos econômica).

O WLTP foi desenvolvido com o objetivo de ser utilizado como um ciclo de teste global em diferentes regiões do mundo, de modo a que as emissões de poluentes e CO₂, bem como os valores de consumo de combustível sejam comparáveis em todo o mundo. No entanto, embora o WLTP tenha um "núcleo" global comum, a União Europeia e outras regiões aplicarão o teste de maneiras diferentes, dependendo das suas leis e necessidades do tráfego rodoviário. Dentro das 3 classes de testes, o veículo desenvolvido no presente projeto faz parte da classe 1, que é destinada a veículos pequenos e leves com velocidades máximas inferiores a 70 km/h. Na Figura 1 mostra-se o correspondente perfil temporal, WLTP, para veículos de classe 1 [3].

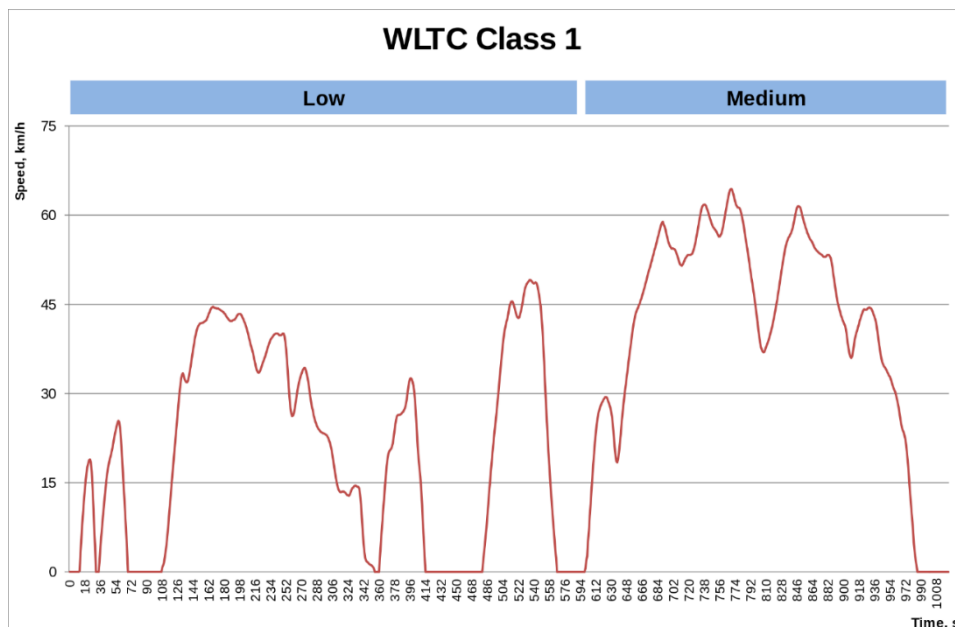


Figura 1- Perfil temporal do ciclo de testes WLTP para veículos de classe 1 [3].

1.4 Estrutura do Projeto

Este projeto está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo, Introdução, descreve-se o problema que motiva a realização do presente projeto. São definidos os objetivos, o enquadramento legislativo do projeto, assim como o procedimento mundial de teste de veículos. Apresenta-se estado da arte, no que concerne aos veículos elétricos com alimentação solar fotovoltaica. São apresentados os elementos mais relevantes de um veículo elétrico solar, como: os painéis fotovoltaicos, as baterias, os motores, e os sistemas de transmissão.

No segundo capítulo apresenta-se o Modelo Dinâmico de um Veículo, onde é feita uma abordagem teórica e matemática das principais envolventes na dinâmica de um veículo. São identificadas as várias forças resistentes ao movimento e analisado o seu comportamento, das quais, força resistente ao rolamento, força resistente aerodinâmica, força resistente pela ação da gravidade e força resistente devido à inércia. De seguida, é mostrado o desenvolvimento e construção, do modelo matemático de um motor de corrente contínua. Com os vários principais intervenientes expostos, é iniciada a abordagem do Modelo Dinâmico de um Veículo Elétrico.

No terceiro capítulo, Projeto de um Veículo Elétrico Solar, são propostos os vários constituintes do veículo, as suas dimensões e aspeto. São selecionados e dimensionados os vários componentes, como a bateria, os painéis fotovoltaicos e o motor.

No quarto capítulo, Simulação e Resultados, são simulados vários cenários de teste e aplicação real do veículo projetado. A análise dos diversos resultados e das várias simulações é concretizada, de forma, a aproximar os resultados teóricos obtidos a uma aplicação no mundo real.

E por último, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões e trabalho futuro.

1.5 Estado da Arte

Um veículo solar é um veículo elétrico movido totalmente ou em parte por energia solar direta. As células fotovoltaicas, *Photovoltaic* (PV) contidas nos painéis solares convertem a energia do sol em energia elétrica. A energia solar também pode ser utilizada para fornecer energia aos sistemas de comunicações ou controlo e outras funções auxiliares.

Na atualidade, os veículos solares não são vendidos como meios de transporte práticos no dia-a-dia, mas são principalmente, veículos de demonstração e projetos experimentais de engenharia, geralmente patrocinados por agências governamentais. No entanto, existe divulgação sobre o desenvolvimento deste tipo de veículos. Por outro lado, os barcos solares já estão disponíveis comercialmente. Na figura 2 mostra-se um protótipo de carro solar produzido pela empresa Honda [5].



Figura 2- Protótipo de carro solar da Honda [5].

O projeto de um veículo solar é severamente limitado pela quantidade de energia solar que é possível recolher. Este tipo de veículos é normalmente construído para corridas de carros solares e também para protótipos de carros movidos a energia solar. Mesmo as melhores células solares só podem absorver uma quantidade de energia que é limitada pela área disponível no veículo. Por outro lado, os carros solares estão limitados à utilização de materiais compostos ultraleves, para poupar peso. De um modo geral, os

carros solares não possuem as características de segurança e conforto dos veículos convencionais.



Figura 3- Fotografia do veículo solar Stella [6].

Na Figura 3 mostra-se o primeiro carro comercializado da família solar, chamado de Stella, que foi construído em 2013 por estudantes na Holanda [6]. Este veículo é capaz de percorrer **885 quilômetros** com uma carga durante o dia com exposição solar. Pesa **385 quilogramas** e os painéis oferecem uma potencia de pico de **1,5 kW**. Os veículos solares devem ser leves e eficientes. O Stella Lux é o antecessor do Stella e estão a tentar a sua comercialização na Holanda. Durante as corridas, o Stella Lux tem autonomia para **1100 km** durante o dia. A **70 km/h**, o Stella Lux tem autonomia infinita. Isto é, novamente, devido à sua alta eficiência, incluindo um coeficiente de atrito aerodinâmico de **0,16**. Como o condutor comum nunca conduz mais que **200 quilômetros** por dia não iria ter a necessidade da ligação à rede elétrica. Só o ligariam se quisessem devolver energia à rede. As especificações mais relevantes do Stella Lux estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2- Especificações do Stella Lux [6]	
Comprimento	4,52 m
Largura	1,76 m
Capacidade das baterias	15kWh
Área de painéis fotovoltaicos	5,8 m ²
Velocidade máxima	125 km/h
Autonomia dia de sol (Austrália)	1100 km

A aplicação de painéis fotovoltaicos também pode ser realizada em veículos elétricos convencionais. Nestes veículos a energia utilizada para o movimento do veículo é fornecida por uma fonte externa, na esmagadora maioria dos casos pela rede elétrica. Nestes veículos, os painéis fotovoltaicos não geram energia suficiente para desempenhar um papel importante no acionamento. Por exemplo, a Toyota já teve como opção um teto solar, aplicado ao modelo Prius. No entanto, este gerava apenas **50 W**, servindo apenas para alimentar os ventiladores do ar-condicionado. Na Figura 4 mostra-se um veículo elétrico da empresa Hyundai, equipado com tejadilho fotovoltaico.



Figura 4- Modelo elétrico da Hyundai com tejadilho fotovoltaico [7].

1.6 Energia Solar

A energia solar é um termo que se refere à energia proveniente da luz e do calor do Sol. É utilizada por meio de diferentes tecnologias em constante evolução, como o aquecimento solar, a energia solar fotovoltaica, a energia heliotérmica, a arquitetura solar e a fotossíntese artificial. As tecnologias solares são amplamente caracterizadas como ativas ou passivas, dependendo da forma como capturam, convertem e distribuem a energia solar. Entre as técnicas solares ativas, está o uso de painéis fotovoltaicos, concentradores solares térmicos das centrais heliotérmicas e os aquecedores solares [8].

1.6.1 O Efeito Fotoelétrico

A geração de energia elétrica, efetuada pelo painel fotovoltaico, somente é possível devido ao efeito fotoelétrico. A luz pode ser utilizada para mover elétrons, ao libertá-los da superfície de um sólido. Este fenômeno é designado de efeito fotoelétrico. O material que possibilita a ocorrência deste fenômeno diz-se que é fotoemissivo e os elétrons ejetados fotoelétrons. Não existe diferença para os outros elétrons, todos são idênticos em massa, carga, spin e momento magnético.

O efeito fotoelétrico foi observado pela primeira vez em 1887, por Heinrich Hertz, durante experiências com um gerador de pequenos arcos elétricos. Este gerador seria o primeiro equipamento a que se pôde chamar de rádio transmissor. Os arcos gerados entre duas pequenas esferas metálicas no emissor, induzem arcos elétricos entre outras duas esferas metálicas, no recetor. O gerador de arcos elétricos era muito difícil de pôr a funcionar corretamente: a distância entre as esferas tinha de ser menor que 1 milímetro para ocorrer a transmissão para o recetor. Devido a este problema Hertz observou que podia aumentar a sensibilidade da lacuna entre as esferas se a iluminasse com luz visível ou ultravioleta.

Estudos posteriores de J.J. Thomson mostraram que esta sensibilidade aumentada foi o resultado da luz movendo os elétrons. Os dois fatores que afetam a energia cinética máxima dos fotoelétrons são a frequência da radiação incidente e o material na superfície. Como se pode observar no gráfico da Figura 5, a energia do elétron aumenta com a frequência de uma forma linear, todas as três curvas têm o mesmo declive

(igual à constante de Planck), o que mostra que a relação energia-frequência é constante para todos os materiais. Abaixo da frequência limite a fotoemissão não ocorre. Se aumentada, a intensidade da fonte luminosa e a frequência for constante, o número de fótons a atingir a superfície é maior, resultando na emissão de mais elétrons num determinado intervalo de tempo (corrente elétrica). Para maiores frequências a energia cinética do fotoelétrão é maior [9].

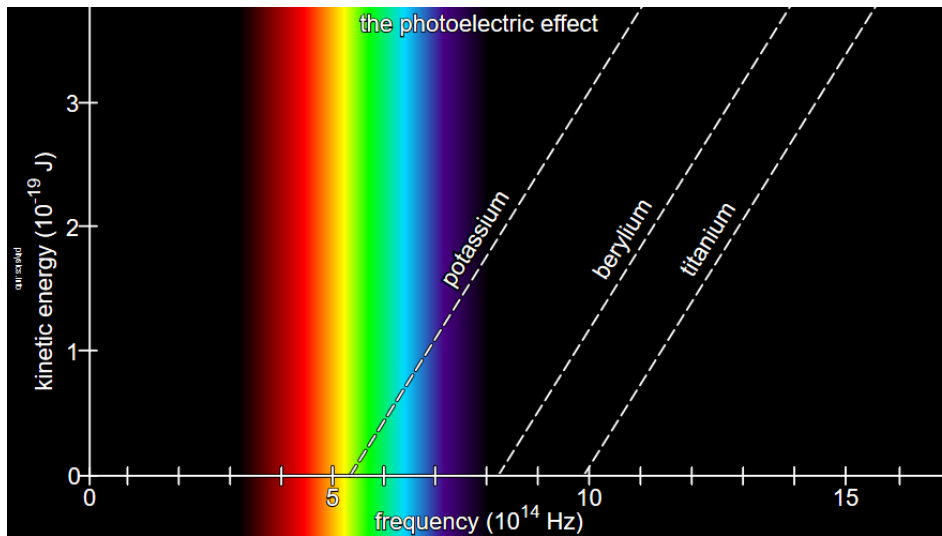


Figura 5- Energia cinética do fotoelétrão em diferentes materiais [9].

Os painéis de silício, constituídos por duas camadas, têm uma camada positiva (P-type) e uma camada negativa (N-type) [10]. Para formar as duas camadas, é necessário recorrer a um processo em que se adiciona impurezas, propositadamente, chamado de *doping*. Quando o silício é dopado com fósforo que tem cinco elétrons em vez de quatro na sua camada exterior, o material resultante é chamado de tipo N ("N" para negativo) devido à prevalência de elétrons livres. O silício dopado tipo N é um condutor muito melhor que o silício puro, porque não é necessária energia para arrancar o elétron do átomo, só é utilizada a energia para o movimento daqueles que estão livres. A outra parte de uma célula solar típica é dopada com o elemento boro, que tem apenas três elétrons na sua camada externa, em vez de quatro, para se tornar o silício tipo-P. Em vez de ter elétrons livres, o tipo P ("P" para positivo) tem buracos livres e carrega a carga oposta (positiva). Quando um fóton proveniente da radiação solar, com energia suficiente atinge um elétron na banda de valência este move-se para a banda de condução passando a ser um elétron livre, deixando assim uma lacuna que forma uma carga positiva. Na região

entre os dois materiais é formado um campo elétrico, que por sua vez provoca a circulação de uma corrente elétrica como está representado na Figura 6.

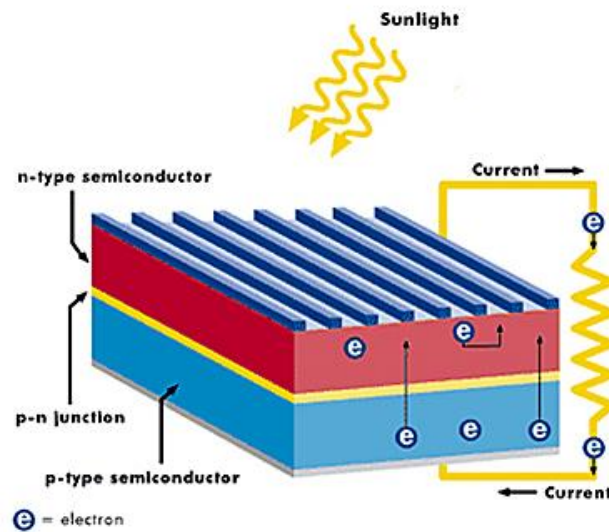


Figura 6- Funcionamento de uma célula fotovoltaica [10].

1.6.2 A Radiação Solar

A radiação solar é energia eletromagnética proveniente do sol. Fornece luz e calor para a Terra. Esta energia é necessária para o metabolismo do meio ambiente e de todos os seus habitantes. As três bandas mais relevantes ao longo do espectro de radiação solar são a ultravioleta, a visível e a infravermelha. Da luz que atinge a superfície da Terra como está representado no gráfico da Figura 8, a radiação infravermelha representa **49,4%**, enquanto a luz visível **42,3%**. A radiação ultravioleta representa pouco mais de **8%** da radiação solar total. Assim, maior parte da radiação solar que chega à superfície da Terra é constituída por radiação infravermelha e visível. A radiação ultravioleta é na sua grande maioria absorvida pelos gases estratosféricos (ozono), não chegando a ultrapassar os **0,5%** da radiação solar total na superfície da Terra [11].

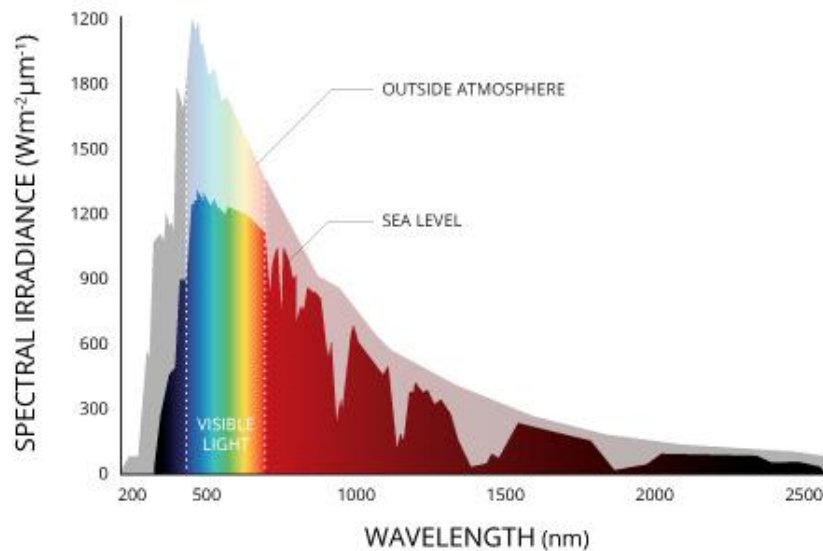


Figura 7- espectro radiação solar no planeta Terra [11].

Para uma superfície tangente à superfície da Terra, com localização em Faro, obtêm-se diferentes valores de energia de radiação solar ao longo dos meses do ano. Como se pode observar no gráfico da Figura 8, no verão, os maiores valores de energia são devidos a um período de exposição solar diária mais prolongado e também a uma maior intensidade da radiação solar, com as frequências mais altas a chegar ao nível do mar, entre as quais a ultravioleta. Assim, é de esperar que entre os meses de Abril e Setembro a produção de energia elétrica com painéis fotovoltaicos atinja os maiores valores, que chega a ser mais do dobro em relação aos meses de inverno.

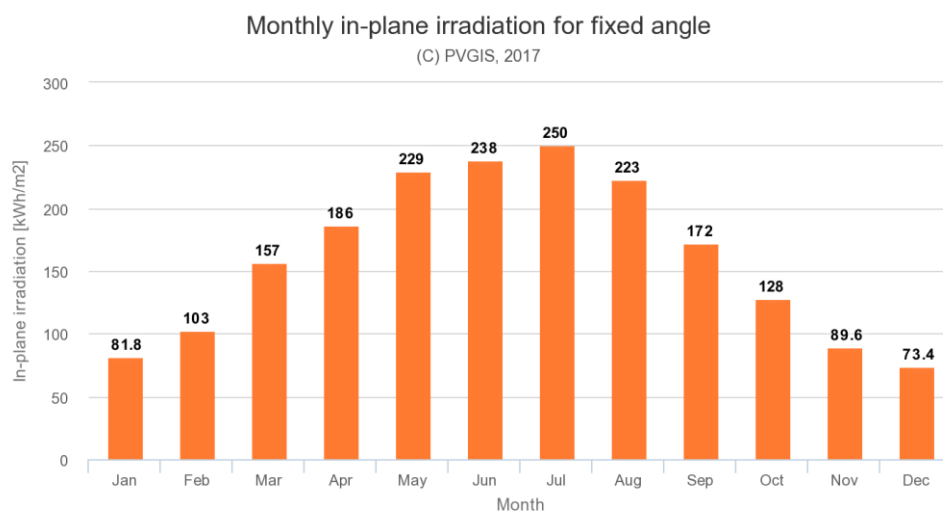


Figura 8 -Energia mensal da radiação solar incidente num plano horizontal em Faro [12].

1.6.3 Tipos de Painéis Fotovoltaicos

A classificação dos diferentes tipos de painéis solares, pode ser efetuada em função do número de junções. Os painéis podem ser de junção única ou multi-junção. Os painéis também podem classificar-se em função da geração. Sendo de primeira, segunda ou terceira geração. A junção única e as multi-junções diferem no número de camadas na construção do painel que absorve a luz solar, enquanto a classificação por geração centra-se nos materiais utilizados e na eficiência dos diferentes tipos de painéis solares fotovoltaicos [13].

Painéis de Primeira Geração

Os painéis de primeira geração são os tipos de painéis fotovoltaicos tradicionais, feitos de silício monocristalino ou policristalino. Atualmente, perfazem **80%** de todos os painéis fotovoltaicos instalados no mundo [14].

- Células Fotovoltaicas Monocristalinas (Mono-Si)

Estes tipos de painéis solares são feitos de silício monocristalino puro, na sua produção a cultura do silício é controlada de modo a formar um cristal único. São facilmente reconhecidas a partir do seu aspeto escuro uniforme e das extremidades arredondadas (Figura 9). A alta pureza do silício faz com que este tipo de painel solar tenha uma das mais altas taxas de eficiência, com as mais recentes a situarem-se acima dos **20%**.

Os painéis monocristalinos em relação aos outros painéis oferecem uma maior potência elétrica por área, junto de um maior tempo de vida útil. Contudo, também significa que são os mais caros do grupo. Outra vantagem a considerar é que estes painéis tendem a ser menos afetados pelas temperaturas elevadas, em comparação com os painéis policristalinos [15].

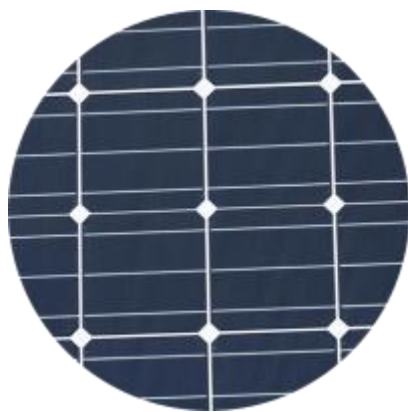


Figura 9- Painel Fotovoltaico de Silício Monocristalino [13].

- Células Fotovoltaicas Policristalinas (Poly-Si)

Os painéis de silício policristalino apresentam quadrados com vértices não arredondados, e têm um aspeto de cor azul salpicada, com diferentes cristais (Figura 10). São produzidos através da fusão de silício bruto, que é um processo mais rápido e barato do que o usado nos painéis monocristalinos.

Assim, obtém-se um preço final mais baixo, mas também a uma menor eficiência (em torno dos **15%**), menor eficiência por área e menor tempo de vida, uma vez que são afetados consideravelmente pelas temperaturas mais altas. No entanto, as diferenças entre os tipos de painéis solares mono e policristalinos não são muito significativas e a escolha dependerá fortemente da sua implementação específica. A primeira opção oferece uma eficiência por área ligeiramente maior a um preço ligeiramente superior, mas as potências geradas são muito próximas para o mesmo investimento, se a área de implementação não for um problema [15].

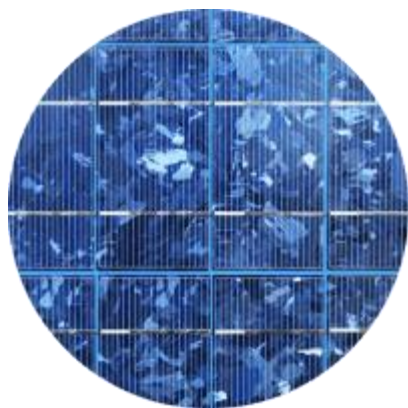


Figura 10- Painel Fotovoltaico de Silício Policristalino [13].

Painéis de Segunda Geração

As células de segunda geração são também conhecidas por células de película fina, devido a terem uma espessura, por camada, micrométrica. São constituídas por sucessivas camadas finas de material semicondutor, depositadas sobre um material de baixo custo. A vantagem das células de película fina é a possibilidade de construção de módulos maleáveis e translúcidos, potenciando, assim, a energia solar em diversas aplicações nunca antes possíveis [14].

- Células Fotovoltaicas de Película Fina (TFSC)

Para uma opção mais barata há que ter em consideração os painéis de película fina. Os painéis solares de película fina são produzidos, aplicando uma ou mais camadas de material fotovoltaico (como silício, cádmio ou cobre) sobre um substrato. Este tipo de painéis solares são os mais fáceis de produzir e, quando produzidos em massa, são os mais baratos, devido à necessidade de uma menor quantidade de materiais.

São também flexíveis, o que abre muitas oportunidades para aplicações alternativas, e são menos afetados por altas temperaturas. O principal problema é que ocupam uma grande área para a mesma potência. Geralmente são inadequados para instalações residenciais. Além disso, possuem menor tempo vida útil do que dos painéis solares mono e policristalinos. No entanto, podem ser uma boa opção onde exista muito espaço disponível [15].

- Célula Solar de Silício Amorfo (A-Si)

A célula solar de silício amorfo é provavelmente, das mais conhecidas por ser o mais utilizada em calculadoras de bolso. Este tipo de painel solar utiliza uma tecnologia de camada tripla.

Para dar uma breve perceção do que significa "fino", neste caso, estamos a falar de uma espessura de 1 micrômetro. Com apenas **7%** de eficiência, estas células são menos eficazes que as de silício cristalino. Têm, no entanto, a vantagem de ter um custo relativamente baixo [15].

Painéis de Terceira Geração

As células de terceira geração são diferentes das anteriores, não se baseiam numa junção P-N para produzir energia. Por outras palavras, o seu funcionamento não é baseado nas propriedades dos materiais semicondutores.

Podem ser constituídas por diferentes materiais, além do silício, tais como estruturas à base de nanotubos de carbono, tintas/corantes solares, plásticos condutores e corantes orgânicos. As células orgânicas são constituídas por polímeros ou materiais orgânicos. No futuro, estas células podem vir a ser economicamente competitivas o que ainda não acontece na atualidade [14].

- Célula Solar *Biohybrid*

Os painéis solares com células solares do tipo *biohybrid* ainda está em fase de investigação e desenvolvimento. Foram descobertas por uma equipa de investigadores da Universidade de Vanderbilt. A ideia, por trás desta nova tecnologia, imitar o processo natural de fotossíntese. Muitos dos materiais utilizados nesta célula são semelhantes aos tradicionais, mas combinando as múltiplas camadas do fotossistema, a conversão da energia química em elétrica será muito mais eficaz (até 1000 vezes mais eficiente do que os tipos de 1ª geração painéis solares) [15].

- Célula Solar de Telureto de Cádmio (CdTe)

Entre a diversidade de diferentes tipos de painéis solares, esta técnica fotovoltaica utiliza telureto de cádmio, que permite a produção de células solares a um custo relativamente baixo, portanto, proporciona um menor tempo de retorno de investimento de cerca de menos de um ano. De todas as tecnologias de energia solar, esta é a que requer a menor quantidade de água para o processo de fabrico. Possuindo assim também um tempo de retorno de energia curto, as células solares de CdTe mantêm a pegada de carbono o mais baixa possível. A única desvantagem do uso de telureto de cádmio é por ser tóxico para o ser humano, se ingerido ou inalado. Na Europa, esta é uma das maiores barreiras a serem superadas, muitas pessoas estão apreensivas com a tecnologia que está por trás deste tipo de painel solar [15].

1.6.4 Modelos de Painéis Fotovoltaicos

Para a previsão do comportamento de uma célula solar real, sob diferentes condições ambientais, obter as curvas características de tensão-corrente (V-I) e tensão-potência (V-P), é necessário a utilização de um modelo da célula solar. A abordagem mais comum consiste na utilização de um circuito elétrico equivalente, constituído principalmente, por uma fonte de corrente controlada pela luz solar, com uma ligação em paralelo a um díodo de junção p-n [16]. Têm sido propostos muitos modelos para a simulação de uma única célula solar, ou para um sistema fotovoltaico (PV), completo e preciso, funcionando com diferentes intensidades solares e temperatura.

O fator chave que afeta a precisão da simulação e a representação precisa das características não-lineares do sistema fotovoltaico é o próprio modelo. Existem diferentes tipos de modelos apresentados nas últimas décadas, como o modelo de díodo único, modelo de dois díodos, modelo de três díodos, modelo que tem em consideração sombreamento parcial e muitos mais. Os modelos mais usados são o modelo de díodo único e dois díodos, pois oferecem a melhor aproximação a uma célula solar real, tendo em conta a sua simplicidade.

Modelo Com Um Díodo Ideal

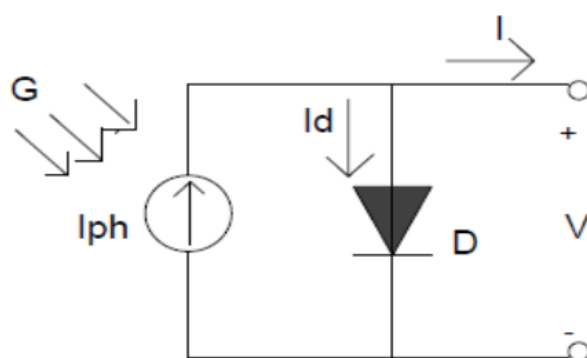


Figura 11- Circuito equivalente com um díodo ideal [16].

Esta é a forma mais simplificada de uma célula fotovoltaica ideal através da qual a tensão de saída e as relações de corrente podem ser escritas:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V}{n_s v_T}} \right) \quad (2)$$

$$v_T = \frac{n k T}{q} \quad (3)$$

Onde:

I_{ph} é a corrente fotovoltaica;

I_d a corrente no díodo;

I_0 a corrente de saturação do díodo;

I a corrente do módulo fotovoltaico;

V a tensão do módulo fotovoltaico;

n_s o número de células em série;

n o fator de idealidade do díodo ($1 \leq n \leq 2$);

k a constante de Boltzmann **$1,3865 \times 10^{-23}$ J/K**;

T a temperatura em Kelvin;

q a carga do eletrão **$1,6021 \times 10^{-19}$ C**;

v_T a tensão térmica equivalente.

Contudo este modelo não fornece grande precisão nas características das curvas V-I e V-P.

Modelo Aproximado De Um Díodo Real

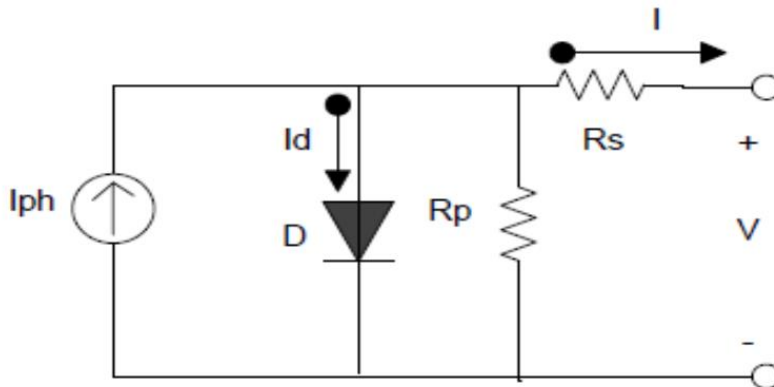


Figura 12- Circuito equivalente real de 1 um díodo [16].

Este é um circuito equivalente de uma célula PV mais aproximado à realidade. É considerado como um modelo de cinco parâmetros (I_0, n, R_s, R_p, I_{ph}). Leva em consideração diferentes propriedades da célula solar.

Onde:

R_s é a resistência em série, para considerar as quedas de tensão e as perdas internas devido à circulação da corrente elétrica;

R_p leva em consideração a corrente de fuga para a terra quando o díodo está em polarização inversa.

No entanto, este modelo não tem em conta o efeito de recombinação do díodo, razão pela qual ainda não é o modelo mais preciso. O cálculo da corrente de saída pode ser determinado a partir de (4):

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s}{n_s v_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (4)$$

1.6.5 Características dos Painéis Fotovoltaicos

A partir das curvas características V-I e V-P é possível especificar um único ponto de operação para o qual a máxima potência é atingida. No ponto de máxima potência, o painel fotovoltaico está a operar à máxima eficiência possível para aquelas condições.

As células fotovoltaicas têm uma relação complexa entre corrente, tensão e potência gerada de saída, o que provoca uma saída não linear. Esta saída pode ser expressa na curva característica tensão-corrente da célula fotovoltaica. Constantes flutuações nas variáveis externas, tais como, temperatura, radiação e sombra provocam constantes mudanças na curva V-I. Uma mudança na temperatura tem um efeito inversamente proporcional na tensão de saída, e uma mudança na radiação vai provocar uma variação proporcional da corrente de saída.

Utilizando as equações do modelo de painéis fotovoltaicos, é possível determinar as curvas características do módulo fotovoltaico. As curvas características V-I são obtidas ao variando certos parâmetros, um de cada vez, e mantendo os outros parâmetros constantes em STC (*Standard Temperature Conditions*).

Na Figura 13, está representada a característica V-I para uma radiação solar variável G (em STC é **1000 W/m²**). Observando a curva, verifica-se que o aumento dos valores da radiação solar, causa o aumento proporcional dos valores da corrente da célula fotovoltaica. Porém, a tensão da célula fotovoltaica tem um aumento muito pequeno.

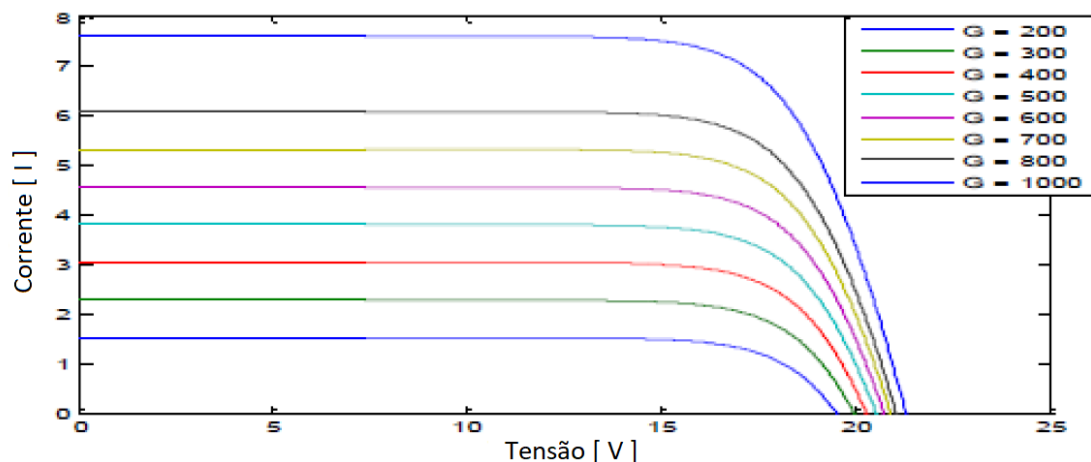


Figura 13- Característica V-I para radiação variável (G) [16].

A curva da Figura 14 descreve a característica V-I para uma temperatura variável. É observável que com o aumento da temperatura, a corrente da célula fotovoltaica também aumenta ligeiramente os seus valores. Contudo, a tensão da célula apresenta um decréscimo bastante significativo nos seus valores.

As curvas das Figuras 15 e 16, mostram as características V-P da célula fotovoltaica, através das quais é possível identificar o seu pico, o qual será o ponto de potência máxima. As tensões são apresentadas para uma variação da radiação solar e temperatura, respetivamente. Como é possível observar enquanto a radiação solar se intensifica, a potência de saída também cresce, atingindo os valores nominais para as condições STC. Porém, com o aumento da temperatura, a potência de saída diminui.

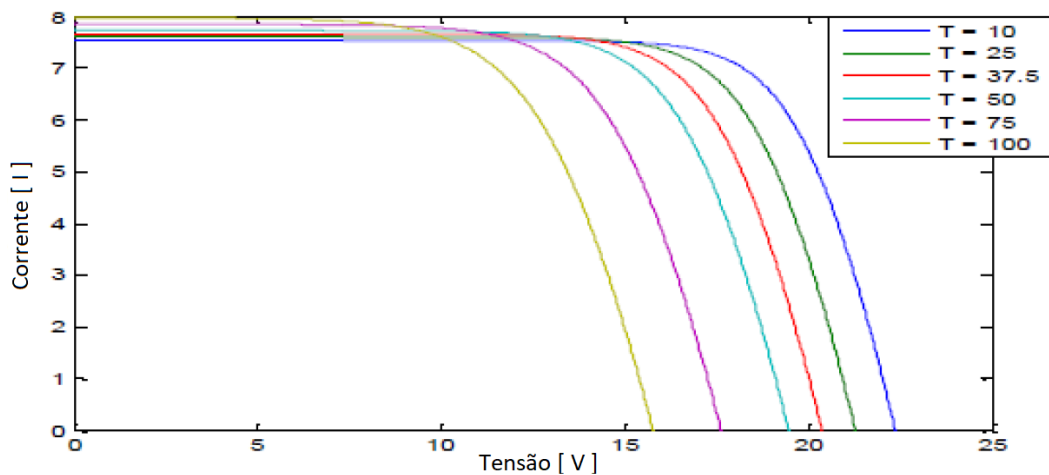


Figura 14- Característica V-I para uma temperatura variável T (Celsius) [16].

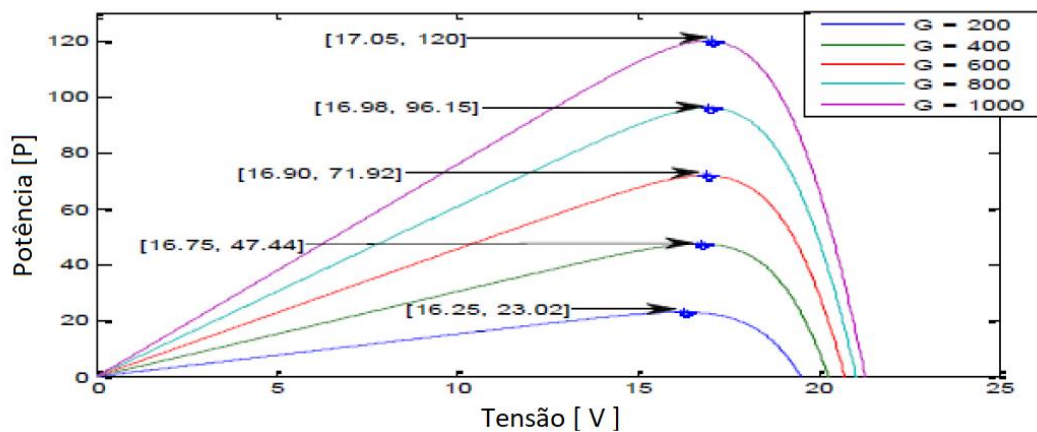


Figura 15- Característica V-P para radiação variável (G) [16].

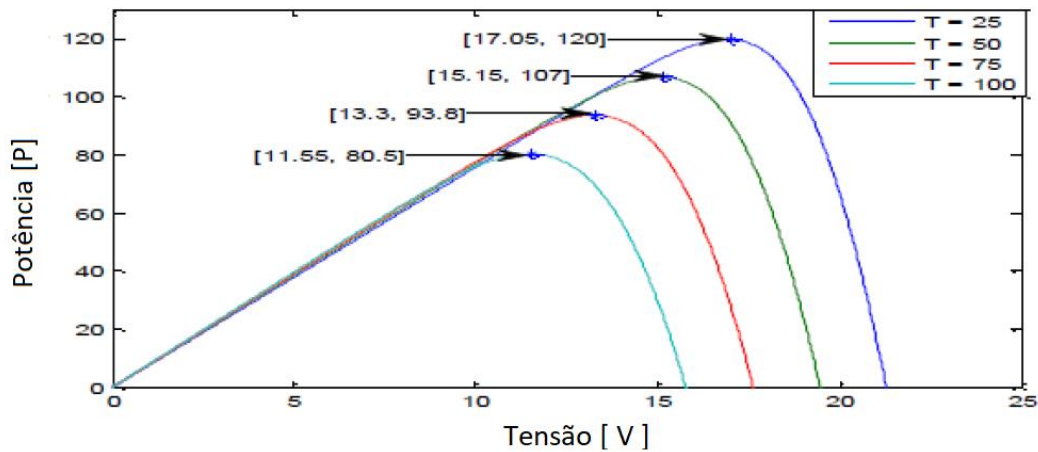


Figura 16- Característica V-P para uma temperatura variável T (Celsius) [16].

1.6.6 Maximização da Potência dos Painéis Fotovoltaicos

Um painel fotovoltaico é uma fonte de energia em que, o ponto para o qual gera a máxima potência está dependente da temperatura, do nível de radiação e da corrente de carga. Consequentemente, é necessário possibilitar uma máxima eficiência na produção de energia elétrica. A maximização da potência fotovoltaica é atingida com um sistema usualmente designado por MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

O MPPT pode ser implementado de diferentes formas, no entanto as técnicas mais utilizadas são a INC (*incremental conductance*) e a P&O (*perturb and observe*), especialmente em aplicações de mais baixo custo [17].

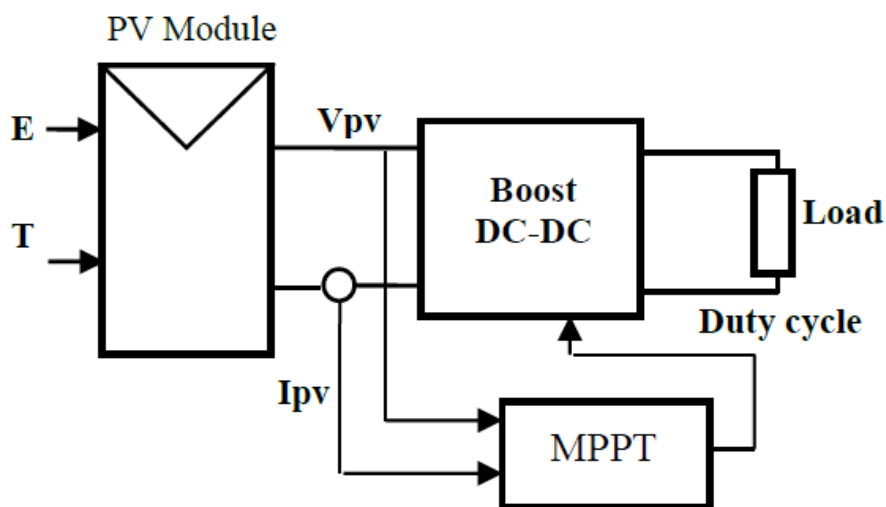


Figura 17- Diagrama típico da implementação do MPPT [17]

Na Figura 17, onde E representa a radiação e T a temperatura, encontra-se ilustrado um diagrama simplificado da implementação de um MPPT, do painel fotovoltaico até à carga. O MPPT controla o conversor DC-DC, de modo a que a corrente do painel corresponda á máxima potência para os valores atuais de radiação e temperatura.

Método INC

Este algoritmo de MPPT designado de INC (*Incremental Conductance*) utiliza a relação $\frac{\partial P}{\partial V}$ para procurar corrigir a tensão de saída para um ponto mais eficiente.

Assim, segundo [18]:

$$\frac{\partial P}{\partial V}_{MPP} = \left[\frac{\partial (V \cdot I)}{\partial V} \right]_{MPP} = I_{MPP} + V_{MPP} \cdot \left(\frac{\partial I}{\partial V} \right)_{MPP} = 0 \quad (5)$$

Quando $\frac{\partial P}{\partial V} = 0$, o painel fotovoltaico está no ponto *MPP* (ponto de produção máxima). Pode-se, assim, construir o seguinte algoritmo, representado na Figura 18, para o *MPPT* [18].

O algoritmo está constantemente a observar as leituras de potência e de tensão, ajustando o funcionamento do painel fotovoltaico em torno do ponto de produção máximo.

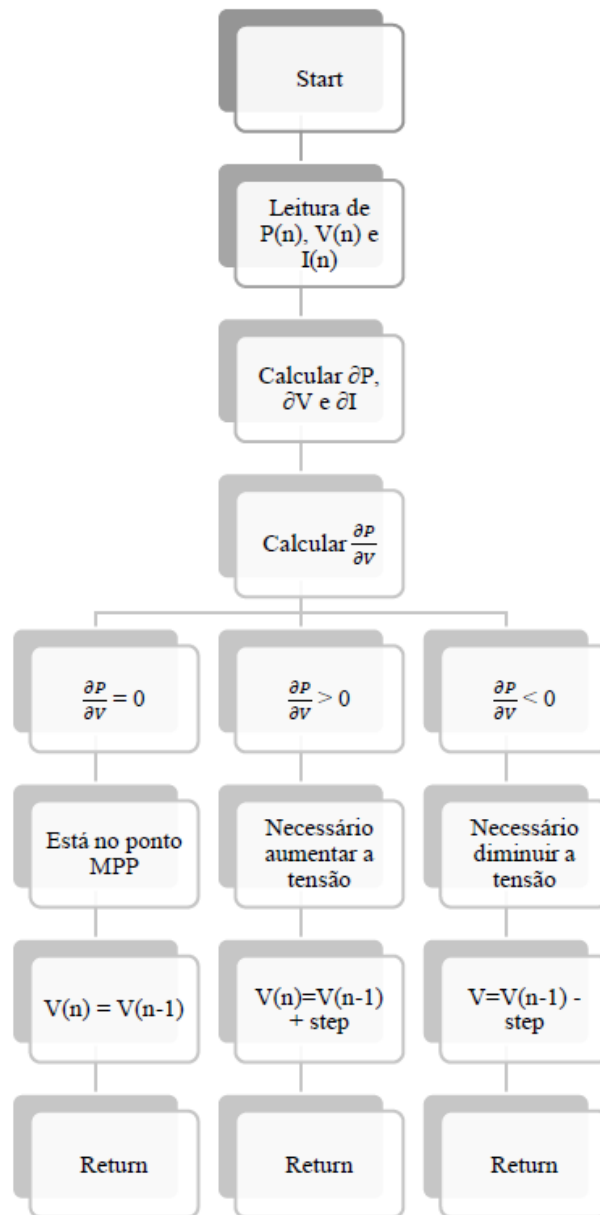


Figura 18- Fluxograma do algoritmo INC [19].

Método P&O

O método de perturbação e observação, também conhecido por *Perturb & Observe* (P&O), utiliza a variação da potência do painel fotovoltaico em função de variações impostas a este na corrente ou na tensão. O algoritmo opera periodicamente, aumentando e diminuindo a tensão imposta no painel fotovoltaico procurando assim o

ponto onde a produção atinge máxima potência (MPP). O aumento/diminuição da tensão é efetuado por passos (*steps*) de variação. É importante notar que os *steps* demasiados grandes provocam perturbações no funcionamento do painel e os demasiados pequenos tornam o MPPT lento. Desta forma, é necessário ter alguma sensibilidade para escolher o *step* adequado ao sistema [18].

Segundo [18], o MPPT P&O pode ser implementado utilizando o algoritmo representado na Figura 19.

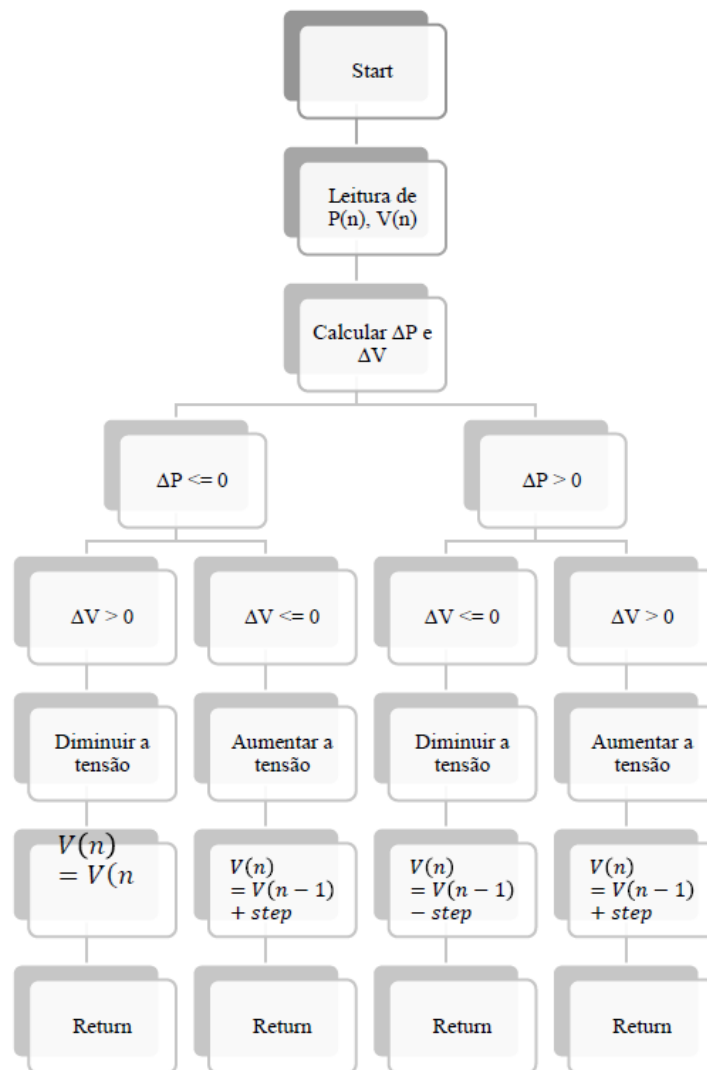


Figura 19- Fluxograma do algoritmo do P&O [19].

Como se pode observar, este algoritmo irá procurar o ponto de operação máxima, provocando perturbações no sistema e observando os resultados. Assim, se uma dada perturbação aumentar, a potência de saída, o algoritmo dá o comando para manter a

perturbação anterior, caso contrário, isto é, caso a perturbação diminua a potência de saída, o algoritmo dá o comando para contrariar a perturbação anterior.

1.7 Baterias Utilizadas em Veículos

Após a aquisição da geração de energia elétrica, é necessário encontrar uma forma de armazenamento da energia disponível ao longo do dia para, assim, ser possível a sua utilização quando necessário. Para o armazenamento de energia elétrica existem diversos tipos de baterias, Chumbo-Ácido (*Lead-Acid*), Níquel- Cádmio (Ni-Cd), Níquel-Hidreto metálico (Ni-MH), Iões de Lítio (Li-ion) e Lítio polímero (Li-Polymer ou LiPo). As baterias de Li-ion (Iões de Lítio) são as que possuem as melhores características relativamente às outras baterias, principalmente na união entre a densidade de energia e a densidade de potência. São utilizadas em veículos elétricos, veículos híbridos elétricos, sistemas de armazenamento de energia e dispositivos portáteis, entre outras aplicações.

A Figura 20, ilustra as características das baterias de chumbo-ácido e de iões lítio. Ambas as baterias têm um desempenho semelhante na densidade de potência. A bateria de chumbo ácido apresenta-se ligeiramente melhor em W/kg, mas em contrapartida, a de iões de lítio proporciona grandes melhorias no ciclo de vida, melhor densidade de energia em Wh / kg e uma boa aceitação de um processo de carga dinâmica. Onde as baterias de iões lítio ficam em desvantagem é no seu alto custo por kWh, uma reciclagem complexa e uma menor fiabilidade na sua segurança do que as de chumbo ácido.

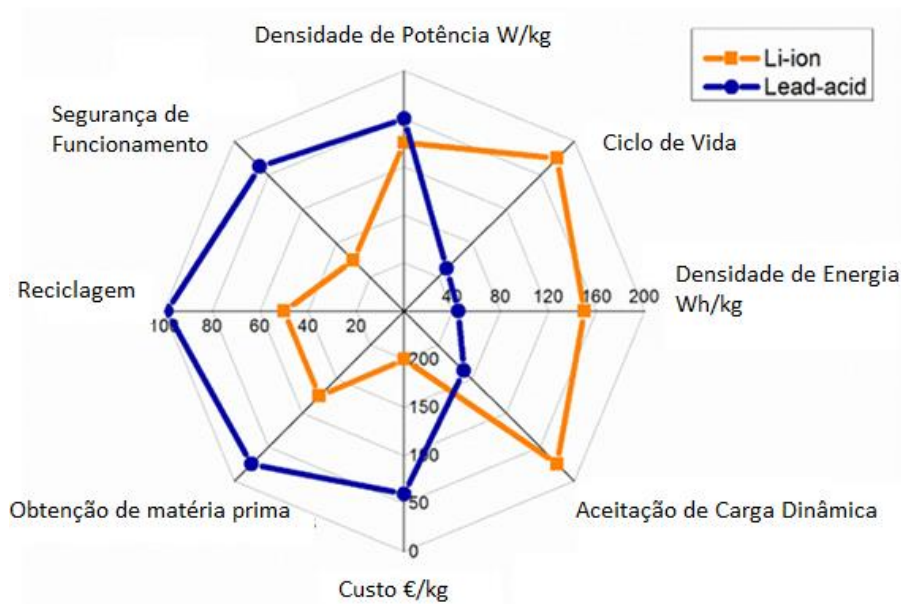


Figura 20- Comparação entre baterias Chumbo-Ácido e de Iões Lítio [20].

1.7.1 Baterias de Chumbo-Ácido

Inventadas pelo médico francês Gaston Planté em 1859, as baterias de chumbo-ácido foram as primeiras baterias recarregáveis para uso comercial. Apesar de ser uma tecnologia antiga, a química das baterias de chumbo-ácido continua em uso nos dias de hoje. Existem boas razões para a sua popularidade: Estas baterias são fiáveis e baratas; tem um baixo custo-por-watt. Há poucas outras baterias que conseguem fornecer energia de forma tão barata como as de chumbo-ácido, e isso torna a bateria económica para o arranque de automóveis, acionamento de carros de golfe, empilhadores, fontes de alimentação marítimas e fontes ininterruptas (UPS).

A bateria de chumbo-ácido é composta por uma liga de chumbo. O chumbo puro é muito mole e não se autossustenta, assim é necessário que pequenas quantidades de outros metais sejam adicionadas para obter a resistência mecânica e melhorar as propriedades elétricas. Os aditivos mais comuns são o antimónio, o cálcio, o estanho e o selénio.

É fácil carregar uma bateria de chumbo-ácido, porém é necessária uma atenção reforçada aos limites de tensão. A escolha de um limite baixo de tensão protege a bateria. No entanto, causa um mau desempenho da bateria em termos de energia acumulada. Se a

tensão da bateria diminuir abaixo do limite mínimo, então dá-se a acumulação de sulfatos na placa negativa, ficando a bateria inutilizada. Utilizar uma tensão mais alta melhora o desempenho, mas pode provocar a gaseificação do eletrólito, degradando a placa positiva. Embora a sulfatação possa ser revertida com uma intervenção atempada, a degradação é permanente. Na bateria de chumbo ácido não pode ser aplicado um carregamento rápido como as baterias de íões de lítio, e com a maioria dos modelos, uma carga completa leva entre 14 a 16 horas. A bateria deve ser sempre armazenada totalmente carregada. A adição de carbono no elétrodo negativo mitiga o problema da sulfatação, mas a energia específica é reduzida [20]. Dentro das baterias de chumbo-ácido existem duas variantes desta bateria, a bateria de arranque e a bateria de ciclo profundo.

Bateria de Arranque

A bateria de arranque é projetada para acionar um motor com uma carga de muito curta duração, mas de alta potência. São as baterias usadas no arranque dos veículos com motor de combustão interna. Para o seu tamanho, a bateria é capaz de debitar correntes de valor muito elevado, mas não pode ser descarregada em profundidade. Possuem uma resistência interna muito baixa, que é obtida através da distribuição do maior número de placas dentro da bateria, e assim, atingir uma área de superfície máxima (Figura 21). As placas são finas e o chumbo é aplicado de forma a ter o aspeto rugoso de uma esponja, expandindo ainda mais a área de ativa.

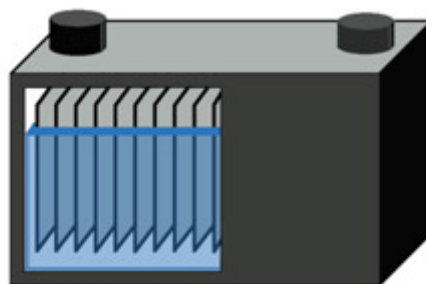


Figura 21- Ilustração de uma bateria de arranque [20].

Bateria de Ciclo Profundo

A bateria de ciclo profundo é produzida para fornecer energia para cadeiras de rodas, carros de golfe, empilhadores e entre outros. Esta bateria é construída para deter a maior capacidade possível e um número de ciclos carga-descarga razoavelmente alto. Isto é conseguido construindo as placas de chumbo com maior espessura (Figura 22). Embora a bateria seja projetada para ciclos de descarga profundos, as descargas completas ainda provocam a deterioração da bateria.

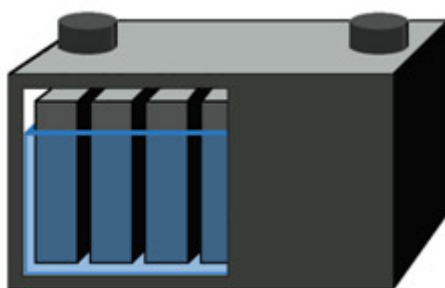


Figura 22- Ilustração de uma bateria de ciclo profundo [20].

Existem combinações de baterias de arranque / ciclo profundo disponíveis para camiões, autocarros, forças de segurança pública e veículos militares, mas estes conjuntos atingem grandes dimensões e são pesados. Através de uma simples diretriz sabe-se que quanto mais pesada for a bateria, maior a quantidade de chumbo, e mais tempo irá durar. A Tabela 3 compara o tempo de vida típico das baterias de arranque e de ciclo profundo quando sujeitas a descargas profundas [20].

Tabela 3- Comparação dos ciclos da bateria de arranque e ciclo profundo		
Profundidade de descarga	Bateria de Arranque	Bateria de Ciclo Profundo
100%	12-15 ciclos	150-200 ciclos
50%	100-120 ciclos	400-500 ciclos
30%	130-150 ciclos	1000 ou mais ciclos

Bateria de Gel Ácido

A primeira bateria de chumbo-ácido com gel, foi desenvolvida na década de 1950 por Sonnenschein (Alemanha) e tornou-se popular na década de 1970. Ao misturar o ácido sulfúrico com um composto de sílica-gel, converteu-se o eletrólito líquido numa pasta semissólida. As baterias de gel são usadas atualmente em UPS, grandes e pequenas, sistemas de armazenamento fotovoltaico e em pequenos sistemas móveis de tração elétrica. As baterias de gel fazem parte da família *valve-regulated lead acid* (VRLA), que não necessitem de manutenção, ao contrário da bateria tradicional de chumbo-ácido.

A bateria de gel é conhecida pelo bom desempenho em temperaturas ambiente mais elevadas, é menos propensa à sulfatação do que os outros tipos de bateria. O número de ciclos carga-descarga é maior e o seu desempenho permanece alto até ao fim de vida, devido à sua capacidade de transferir calor para o exterior. Devido a uma maior resistência interna, as baterias de gel não são usadas para aplicações que necessitem grandes correntes [20].

Vantagens:

- Não necessita de manutenção, baixa auto-descarga
- Bom tempo de vida
- Desempenho alto até o fim da vida
- Operação segura e resistente a abusos
- Bom número de ciclos, tolerância ao calor

Limitações:

- Custo de fabrico moderado
- Sensível ao sobrecarregamento
- Energia específica e corrente de carga moderada
- Sujeita a libertação de gases. Ventilação necessária

Bateria de não-tecido absorvente em fibra de vidro

A bateria de não-tecido absorvente em fibra de vidro, tem como base a tecnologia AGM (*Absorbent Glass Mat*). A tecnologia AGM tornou-se popular no início da década de 1980 como uma bateria selada de chumbo ácido para aeronaves militares, veículos e UPS, de forma a reduzir o peso e melhorar a fiabilidade. O ácido sulfúrico é absorvido por uma esteira muito fina da fibra de vidro, tornando a bateria à prova de derrames. As placas podem ser posicionadas horizontalmente para assemelhar-se a uma bateria de chumbo-ácido tradicional, com o formato de uma caixa retangular, mas também podem ser enroladas e formar uma célula cilíndrica.

A bateria AGM tem uma resistência interna muito baixa, assim, é capaz de fornecer altas correntes de descarga. Oferece uma vida útil relativamente longa, mesmo quando utilizada em ciclo profundo. A AGM não necessita de manutenção e fornece uma boa fiabilidade elétrica. As baterias de AGM são menos propensas à sulfatação e podem estar sem uso por muito mais tempo antes que uma carga se torne necessária. A bateria tolera bem as baixas temperaturas e tem uma baixa auto-descarga.

São encontradas em motocicletas e veículos automóveis modernos para alimentar acessórios de grande potência tais como bancos aquecidos, sistema *Start&Stop*, sistema de direcção, espelhos e pára-brisas. A NASCAR e outras ligas de corridas de automóveis escolhem as baterias AGM porque são resistentes a vibrações e mais leves [20].

Vantagens:

- Alta potência específica, baixa resistência interna, responsiva à carga
- Carregamento até 5 vezes mais rápida do que a bateria convencional
- Resistência à vibração devido à construção em sanduíche
- Menos propensa a sulfatação
- Utiliza menos eletrólitos e chumbo do que a versão convencional

Limitações:

- Custo de produção
- Sensível ao sobrecarregamento
- A capacidade da bateria tem um declínio gradual
- Baixa energia específica

1.7.2 Baterias de Iões Lítio

Existem muitos tipos diferentes de baterias de lítio, como as de lítio polímero, grafeno e iões de lítio convencionais. Entre os diferentes tipos, as baterias de iões de lítio que fornecem as melhores características entre massa e capacidade energética, são as de ferro fosfato.

As baterias de Lítio ferro-fosfato (LiFePO_4), são um tipo de bateria recarregável. Especificamente são baterias de Iões Lítio que utilizam LiFePO_4 na composição do cátodo e um eléctrodo de carbono grafítico com uma base metálica condutor de corrente eléctrica como ânodo. A sua capacidade específica é maior do que as típicas baterias de lítio óxido de cobalto (LiCoO_2), mas a sua densidade energética é um pouco menor devido a uma menor tensão de operação. Porém, consegue manter a tensão estável até à sua descarga. As baterias de LiFePO_4 alcançam um maior número de ciclos de carga/descarga e um tempo de vida superior a dez anos. O uso de fosfatos previne também as preocupações ambientais em relação ao cobalto, a sua incorreta desapropriação e raridade. Estas baterias possuem baixa toxicidade, uma boa estabilidade química e térmica, toleram maiores correntes de pico e conseguem suportar temperaturas mais altas, sem haver degradação das células e risco de ignição. Assim, oferece também uma maior segurança, comparada com as outras baterias de iões lítio [21].

O princípio de funcionamento da bateria de iões lítio pode observar-se na Figura 23. Os iões de lítio são extraídos do ânodo para se inserirem no cátodo no processo de descarga. O oposto ocorre enquanto a bateria está a ser carregada. A reação eletroquímica que permite a extração do lítio a partir de LiFePO_4 , para carregar o cátodo, pode ser

apresentada com a equação (6). A inserção do lítio no $FePO_4$ no processo de descarga está representado na equação (7).

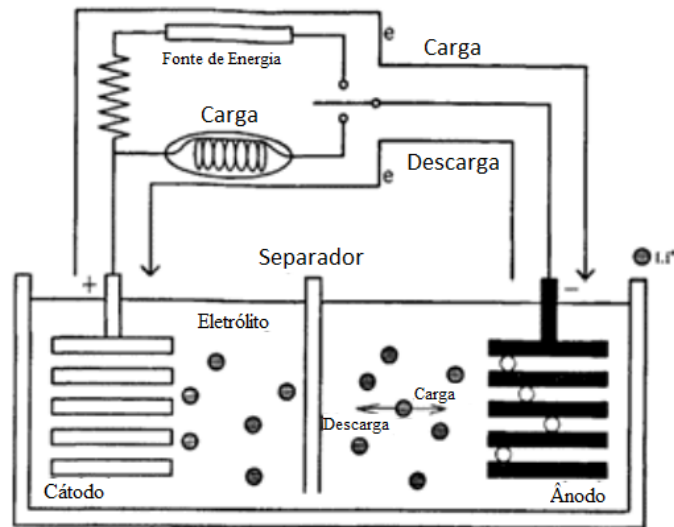
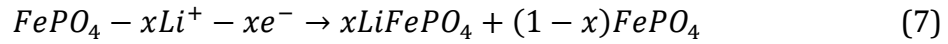
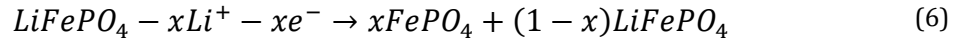


Figura 23-Funcionamento da bateria de íões lítio [22].

Outra grande vantagem destas baterias é o seu maior tempo de vida, aguentam descargas mais profundas mantendo mesmo assim disponível um grande número de ciclos. Na Tabela 4, encontra-se o número de ciclos em função da profundidade de descarga para uma bateria de íões lítio ($LiFePO_4$) [23].

Tabela 4- Ciclos carga-descarga da bateria de íões lítio $LiFePO_4$	
Profundidade de Descarga	Ciclos
80%	2000
70%	3000

1.8 Motor Elétrico

O motor elétrico é uma máquina que faz a conversão de energia elétrica para energia mecânica. Existe uma grande variedade de motores elétricos, alguns com aplicações muito específicas e de precisão, outros mais abrangentes. Os motores elétricos são divididos em duas grandes categorias: Motores de Corrente Contínua e Motores de Corrente Alternada.

Os Motores de Corrente Alternada, são aplicados em situações que exigem uma maior robustez e facilidade de acesso a uma fonte de energia elétrica, monofásica ou trifásica. Existem desde monofásicos a polifásicos, sendo os polifásicos a esmagadora maioria trifásico. Existe uma grande variedade de motores trifásicos, sendo os mais conhecidos, o motor síncrono e o motor de indução. O motor síncrono é mais usado em aplicações a funcionar em modo gerador, onde tem grande versatilidade, já como motor possui algumas limitações. O motor de indução é o motor elétrico mais utilizado, está presente em grande número na indústria.

Os Motores de Corrente Contínua, são usados em diversas aplicações específicas. Necessitam de conversores para modificar a corrente alternada fornecida pela rede de energia elétrica, para corrente contínua. O ambiente onde este tipo de motores domina, é na robótica e aplicações de grande precisão. São também utilizados em pequenos sistemas de tração elétrica ou bombagem. Têm grande utilidade nos sistemas de rega e bombagem, alimentados por sistemas de geração fotovoltaica isolada.

1.8.1 Motor de Indução

Em 1831 Faraday publicou a lei da indução eletromagnética e por volta de 1860 Maxwell conseguiu determinar as equações, conhecidas como equações de Maxwell. Estes marcos históricos foram essenciais para a invenção do motor de indução. Em 1885 Galileo Ferrari, e um ano mais tarde (1886) Nikola Tesla apresentaram dois tipos de motores cujo princípio de funcionamento é o de um normal e atual motor de indução. Um campo magnético girante produzido no estator induz correntes nas barras do rotor ou

enrolamentos produzindo, assim, um binário. Aproximadamente, desde o ano de 1900 os motores elétricos são utilizados industrialmente.

De todos os diferentes tipos de máquinas elétricas, a máquina assíncrona ou de indução é a mais comum devido ao facto das suas características cumprirem praticamente todos os requisitos da grande maioria dos acionamentos industriais relativamente ao custo, robustez, manutenção, fiabilidade e estabilidade de velocidade.

Esta máquina, funcionando como motor, tem numerosas aplicações sendo, sem qualquer dúvida, considerada o “cavalo de trabalho” na maioria das indústrias existentes. Alimentada por corrente alternada, a sua velocidade e a frequência da tensão da fonte de energia, estão numa razão constante. É vulgarmente conhecida como máquina de indução pelo facto de ser uma máquina cujo circuito magnético está associado a dois ou mais circuitos elétricos que se deslocam um em relação ao outro e na qual a energia é transferida da parte fixa (estator) para a parte móvel (rotor) e vice-versa, por indução eletromagnética.

Princípio de funcionamento

O funcionamento da máquina de indução é baseado na aplicação da lei de Faraday e da força de Lorentz sobre um condutor. O princípio de funcionamento pode ser facilmente entendido por meio dum exemplo. Considere-se uma porção planificada das barras condutoras, como se mostra na Figura 24, e por cima um magneto permanente que se desloca rapidamente para a direita a uma velocidade v , (materializando um campo magnético girante), de tal modo que as linhas de força do campo magnético cortam as barras (ou condutores) [24]. Então tem início a seguinte sequência de eventos:

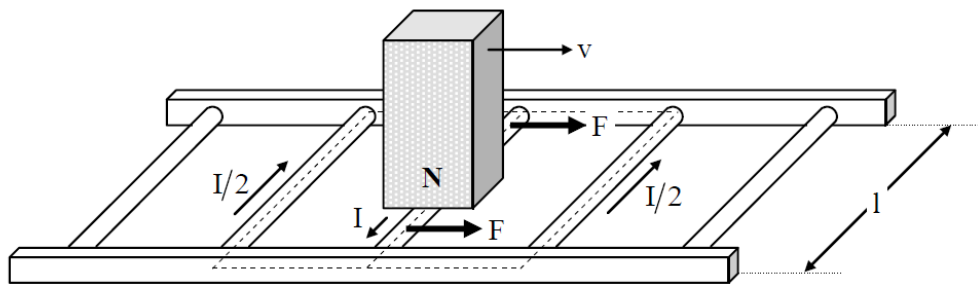


Figura 24- Campo magnético móvel através das barras de uma gaiola de esquilo [24].

- De acordo com a lei de Faraday, é induzida uma (Força Eletromotriz) f.e.m. em cada condutor atravessado pelo fluxo magnético;
- A f.e.m. induzida produz, imediatamente, uma corrente I na barra respectiva que se distribui pelas barras laterais, fechando o circuito;
- Como a barra atravessada pela corrente I se encontra no seio do campo magnético criado pelo ímã, é gerada uma força mecânica (força de Lorentz);
- A força atua, arrastando a barra e a estrutura de que ela faz parte no sentido em que se desloca o campo magnético, para a direita no sentido de v ;

Num motor com o rotor em gaiola de esquilo, estas barras enfiadas formam um cilindro, como está representado na Figura 25. As extremidades do veio, inserido no

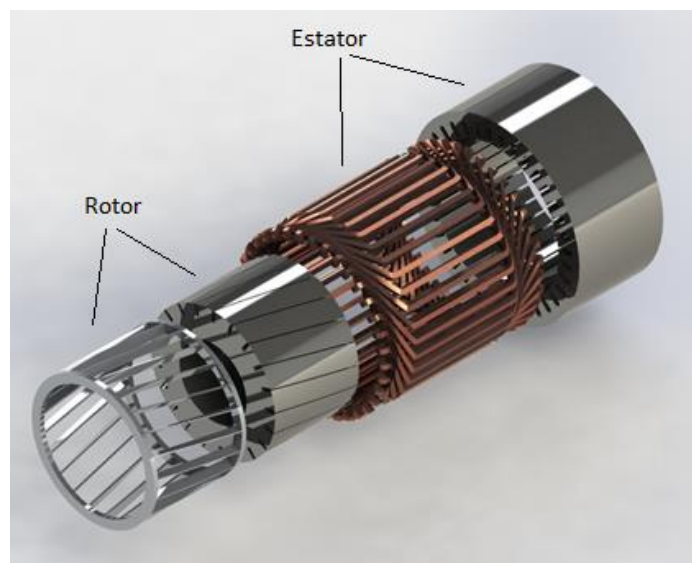


Figura 25- Rotor em gaiola de esquilo.

centro do rotor, estão acopladas dentro de dois rolamentos, o que permite a sua livre rotação.

Características do motor de indução

Para que exista binário é necessário haver uma diferença de velocidade entre o campo magnético girante e a velocidade de rotação do rotor. É por isso que o motor de indução é também chamado de motor assíncrono. Essa diferença de velocidades é representada pelo escorregamento, s . Este escorregamento, s , com valores compreendidos entre zero e um, é definido na equação seguinte (9):

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (8)$$

Onde ω_s é a velocidade do campo magnético girante, e ω , a velocidade de rotação do rotor em radianos por segundo.

Na Figura 26, está representado o circuito equivalente por fase do motor de indução.

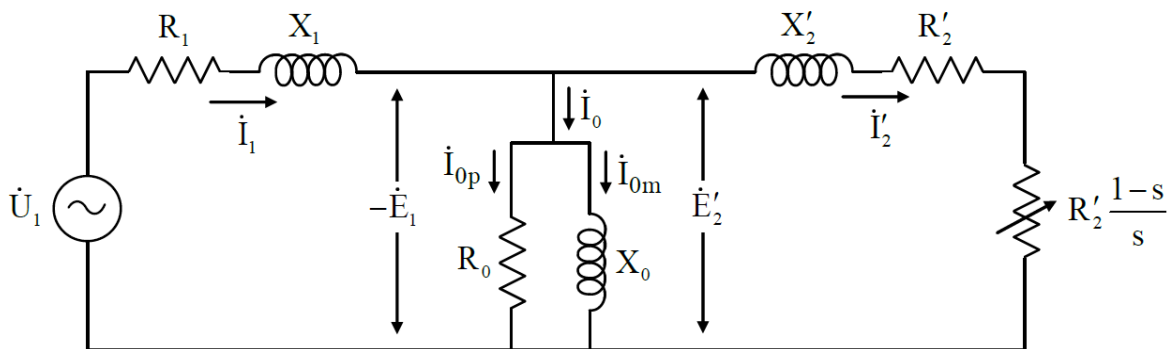


Figura 26: Circuito equivalente do motor de indução [24].

Onde:

\dot{U}_1 é a tensão aplicada ao enrolamento do estator;

\dot{I}_1 a corrente do estator;

R_1 é a resistência elétrica do estator;

X_1 a reactância de fugas magnéticas do enrolamento do estator;

\dot{E}_1 é a força eletromotriz (f.e.m.) indutora do estator;

\dot{E}'_2 a f.e.m. induzida no rotor, refletida ao estator;

X_0 e \dot{I}_{0m} , representa a reactância e corrente de magnetização;

R_0 e \dot{I}_{0p} são a resistência elétrica equivalente das perdas no ferro do circuito magnético e a respetiva corrente;

X'_2 e R'_2 são a reactância de fugas e respetiva resistência elétrica do rotor refletidas ao estator;

\dot{I}'_2 a corrente no rotor refletida ao estator;

$R'_2 \frac{(1-s)}{s}$ é a resistência equivalente da carga mecânica.

A Potência Eletromagnética (P_{EM}), é a potência que transita do estator para o rotor através do entreferro, por meio do campo magnético. Através da análise do circuito, sabe-se de [24], que pode ser determinado o seu valor a partir da seguinte expressão (9):

$$P_{EM} = 3E'_2 I'_2 \cos \varphi_2 = 3I'_2 \sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X'^2_2} I'_2 \left(\frac{\frac{R'_2}{s}}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X'^2_2}}\right) \quad (9)$$

Que conduz à expressão final:

$$P_{EM} = \frac{3R'_2}{s} I'^2_2$$

As únicas perdas a tomar em consideração no circuito do rotor são as perdas de Joule p_{J2} , energia dissipada na resistência do rotor. Assim, a potência mecânica desenvolvida P_{MEC} , é dada entre a diferença da potência eletromagnética, as perdas de Joule no rotor, é:

$$P_{MEC} = P_{EM} - p_{J2} - p_r = \frac{3R'_2(1-s)}{s} I_2'^2 - p_r \quad (10)$$

Se a este valor da potência mecânica desenvolvida for subtraído o valor das perdas por atrito, ventilação e diversas p_r , então obter-se-à a potencia mecânica útil disponível no veio da máquina. A partir desta equação é possível retirar a equação de binário útil T (11), onde ω_m é a velocidade rotação do rotor em radianos por segundo.

$$T = \frac{P_{MEC}}{\omega_m} \quad (11)$$

É possível assim retirar a curva característica do binário em função da velocidade e representá-la como está no gráfico da Figura 27. A zona de funcionamento do motor de indução situa-se em velocidades acima do ponto de binário máximo. Nessa zona a máquina consegue absorver e reagir a alterações do binário da carga, reduzindo ou aumentando a sua velocidade. Portanto, desde que as perturbações no binário de carga atinjam um valor menor ou igual ao binário máximo o motor encontra-se em funcionamento estável.

Através do uso de eletrónica de potência é possível controlar o motor de indução. Utilizando um dispositivo de eletrónica de potência conhecido por variador de velocidade, é possível deslocar a curva característica de binário para maiores ou menores velocidades. Assim, o binário de arranque pode tomar valores muito próximos ao binário máximo e, se necessário, para um arranque em carga .

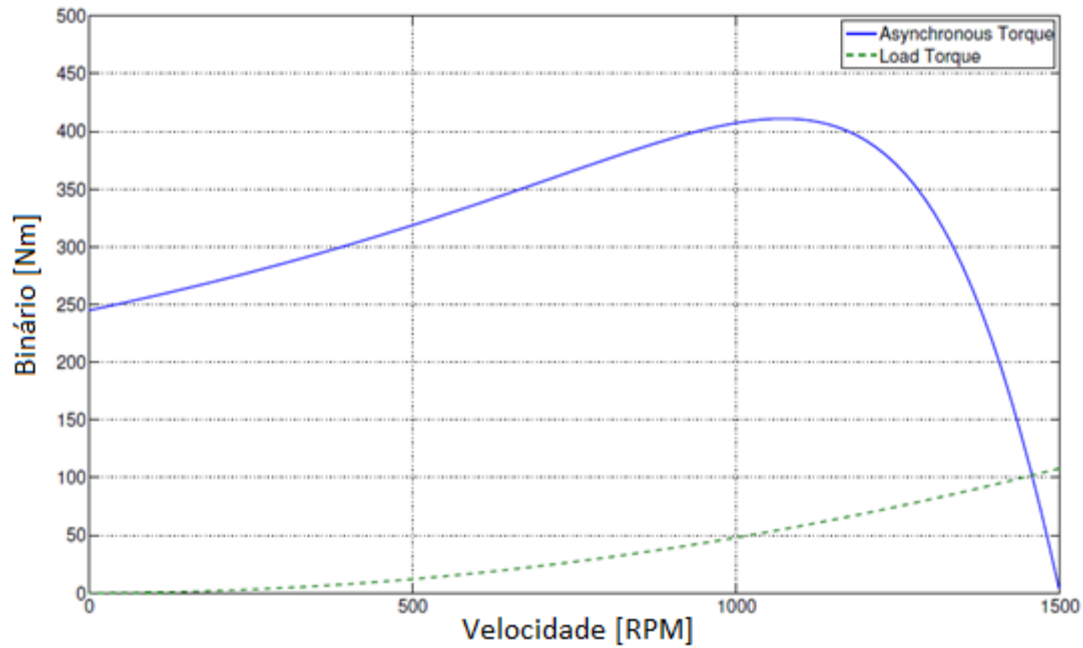


Figura 27: Curva binário velocidade do motor de indução [24].

1.8.2 Motor de Corrente Contínua

As máquinas de corrente contínua (máquinas CC) são na realidade máquinas de corrente alternada, mas dotadas dum dispositivo especial, chamado coletor, que permite transformar a corrente contínua em corrente alternada. O coletor e as escovas fazem das máquinas de corrente contínua as menos robustas das máquinas elétricas. Além disso, a complexidade adicional do coletor e escovas torna as máquinas de corrente contínua mais caras que as máquinas de corrente alternada da mesma potência. Apesar destas desvantagens, a controlabilidade das máquinas CC torna-as as máquinas preferidas para muitas aplicações.

As máquinas de corrente contínua tal como todas as outras máquinas elétricas são reversíveis, portanto elas podem funcionar como geradores convertendo energia mecânica em energia elétrica na forma de tensão e corrente contínuas, ou como motores convertendo energia elétrica em energia mecânica.

A característica binário-velocidade destes motores pode ser ajustada para responder às muitas exigências das cargas que acionam, tais como alto binário de arranque e de paragem, manter constante a potência mecânica de saída, manter constante o binário, desenvolver rápidas acelerações e desacelerações e permitir variação contínua de velocidade num intervalo bastante grande. Embora as suas características binário-velocidade sejam facilmente ajustáveis, as máquinas CC não são utilizadas em aplicações industriais normais por causa das limitações, custo, pouca robustez e custo de manutenção [25].

Princípio de funcionamento

Através da representação de um gerador elementar de corrente contínua na Figura 28, pode entender-se o princípio de funcionamento de uma máquina DC (*direct current*) com escovas. Sobre o conjunto dos dois semi-anéis assentam duas escovas X e Y, que permitem ligar os terminais da espira a uma carga exterior. A espira A-D efetua um movimento de rotação no seio de um campo magnético no sentido de ω , os dois semi-anéis seguem o mesmo movimento, as escovas estão numa posição fixa.

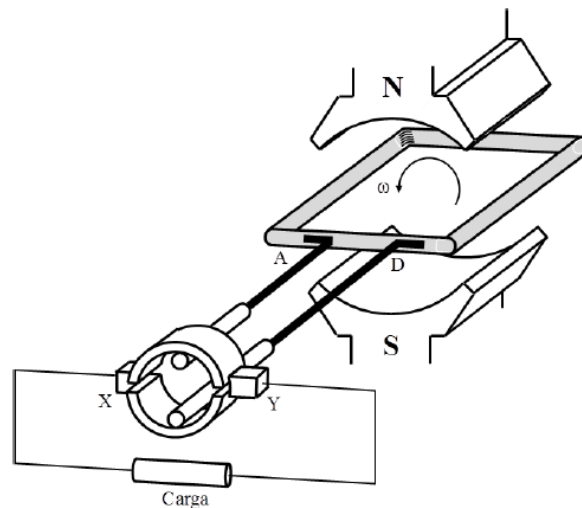


Figura 28-Gerador elementar de corrente contínua [25].

Graças aos dois semi-anéis, as escovas que sobre eles assentam apresentam sempre a mesma polaridade, embora a tensão entre as escovas flutue durante a rotação da

espira. Na Figura 29 está desenhada a forma de onda da tensão obtida aos terminais X, Y da espira (ou das escovas). Na figura estão assinalados nove instantes ao longo duma rotação completa da espira.

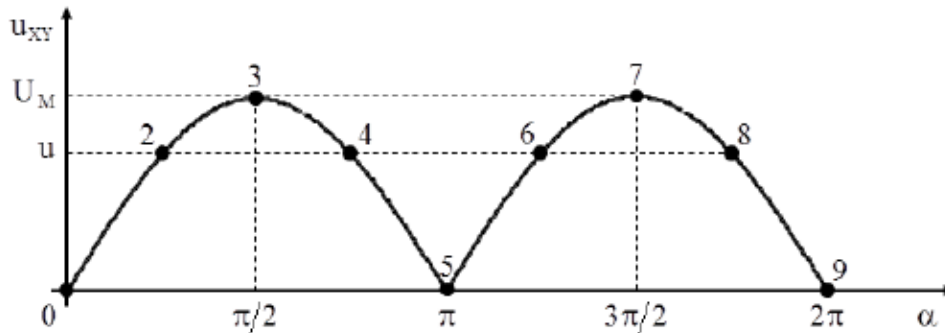


Figura 29- Tensão aos terminais das escovas após a rotação completa duma espira [25].

Características do Motor DC com escovas

Nas máquinas de excitação separada a corrente de excitação é fornecida por uma fonte de tensão contínua independente U_F , como é mostrado no esquema duma máquina de excitação separada da Figura 30. Este circuito tem a finalidade de formar um campo magnético constante, de intensidade ajustável. No entanto, o circuito de excitação pode ser substituído por magnetos permanentes, estes formam um campo magnético de intensidade constante que atravessa o rotor. Originando assim, um motor mais simples e eficiente.

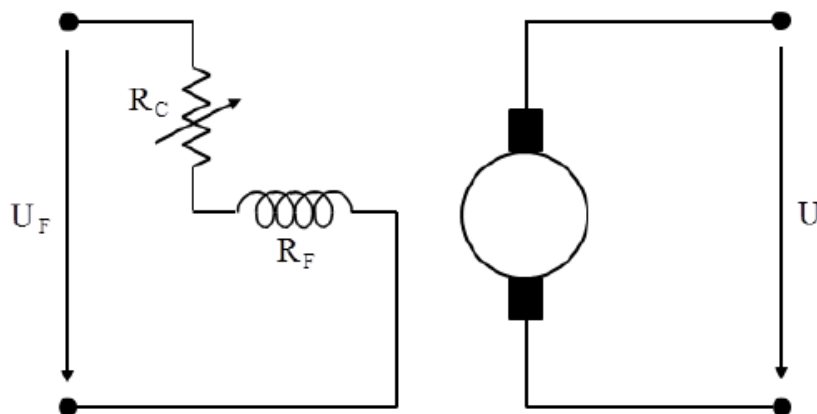


Figura 30- Circuito equivalente de uma máquina com excitação separada [25].

O binário motor é diretamente proporcional à corrente absorvida como se pode verificar através da equação (12). Nos motores com magnetos permanentes, a corrente absorvida é i_a , a única grandeza que pode influenciar o binário do motor. Onde $k\phi$ é a constante de velocidade determinada pela densidade de fluxo dos magnetos permanentes, a relutância do núcleo ferro magnético da armadura e pelo número de espiras do enrolamento.

$$T = k\phi i_a \quad (12)$$

Logo a curva característica do binário irá resultar numa reta com declive igual a $k\phi$, como está ilustrado no gráfico da Figura 31. Resulta numa máquina bastante versátil, com a capacidade para desenvolver altos binários de arranque e de frenagem, a capacidade para manter constante a potência mecânica de saída ou manter constante o binário e a capacidade em permitir uma variação contínua de velocidade.

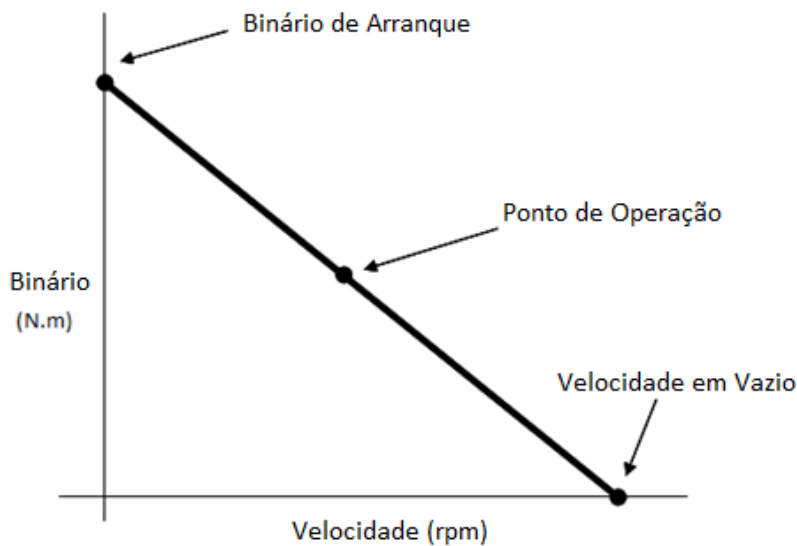


Figura 31- Curva característica de binário-velocidade [25].

1.8.3 Motor de Corrente Contínua Sem Escovas (BLDC)

O princípio de funcionamento do motor sem escovas é o mesmo do que o motor com escovas, porém existem algumas diferenças.

As escovas no motor elétrico são usadas para fornecer a corrente elétrica aos enrolamentos do rotor através das lamina do coletor. Contudo, os motores sem escovas não utilizam nenhum tipo de coletor ou comutador mecânico. O campo magnético num motor sem escovas é comutado através de um comutador eletrônico, acionado por sensores que fornecem a posição exata do rotor.

Outra das grandes diferenças entre estes motores está na sua construção. Num motor com escovas os magnetos permanentes estão colocados no estator e os enrolamentos no rotor (Figura 32). Mas, nos motores sem escovas, o rotor é constituído por magnetos permanentes, e é no estator que se encontram os enrolamentos (Figura 33). Estando os enrolamentos estacionários, é eliminada a necessidade de contactos elétricos deslizantes, escovas e coletor.

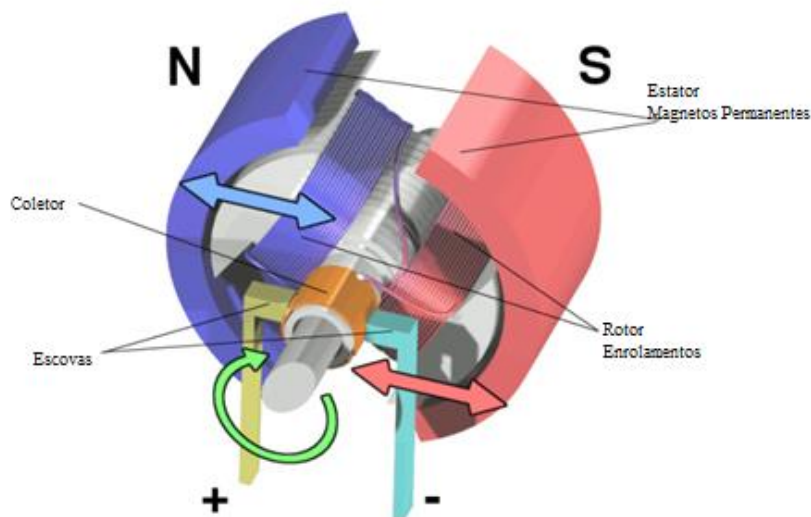


Figura 32- Constituição de motor com escovas [26].

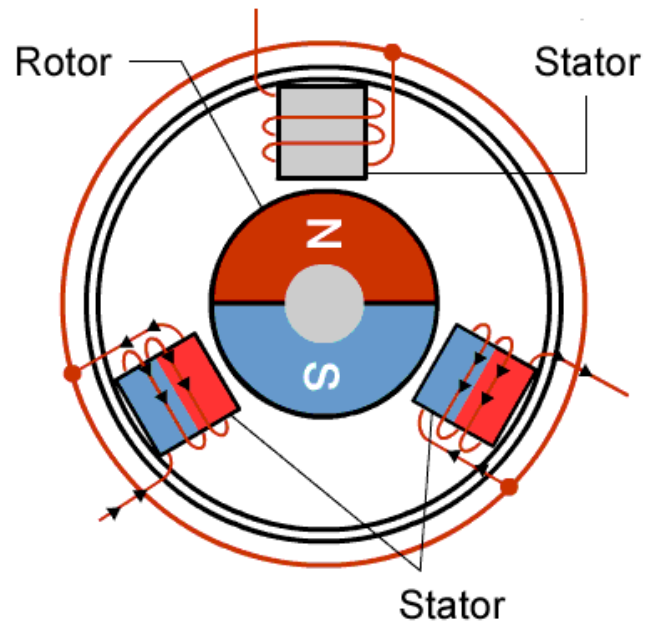


Figura 33- Constituição de motor sem escovas [27].

As diferenças existentes entre estes dois tipos de motores, implica uma diversidade de vantagens e desvantagens:

Motor com escovas

Vantagens:

- Ligação simples, um motor com escovas pode ser ligado diretamente a uma fonte de energia elétrica de corrente contínua.
- O dispositivo de controlo entre o motor e a fonte de energia, pode ser algo simples como um interruptor.
- Baixo custo.

Desvantagens:

- Baixo rendimento: 75-80%
- Ruído elétrico: A ação de comutação constantemente a decorrer no coletor faz uma comutação rápida de elementos indutivos e cria arcos elétricos nas lâminas do coletor. O que origina um grande ruído elétrico e eletromagnético.

- Baixo tempo de vida, Manutenção cara e de maior frequência: As escovas e o coletor estão em contato físico permanente, e acabam por se desgastar.
- Binário de atrito: fricção entre as escovas e coletor

Motor sem escovas

Vantagens:

- Pouca manutenção e bom tempo de vida: o único componente mecânico de desgaste são os rolamentos.
- Alto rendimento: 85-90%

Desvantagens:

- Alto custo inicial: Necessita de um dispositivo de comutação (encoder) e um controlador de eletrônica de potência.

1.9 Sistemas Mecânicos de Transmissão

A transformação ou transmissão de movimento entre o motor e os órgãos mecânicos das máquinas e mecanismos pode ser realizada por componentes ou elementos denominados, genericamente, como transmissões.

Os tipos mais comuns de transmissões mecânicas de movimento são as correias, as correntes e as engrenagens, como se representa nas figuras 35, 36 e 37, respetivamente [28].



Figura 34- Transmissão por correia [28].



Figura 35- Transmissão por corrente [28].



Figura 36- Transmissão por engrenagem [28].

Um sistema de transmissão de movimento permite a transformação de binário e de velocidade. Na Figura 37 está representado um sistema de duas polias diferentes, que pode representar uma transmissão por correia ou corrente.

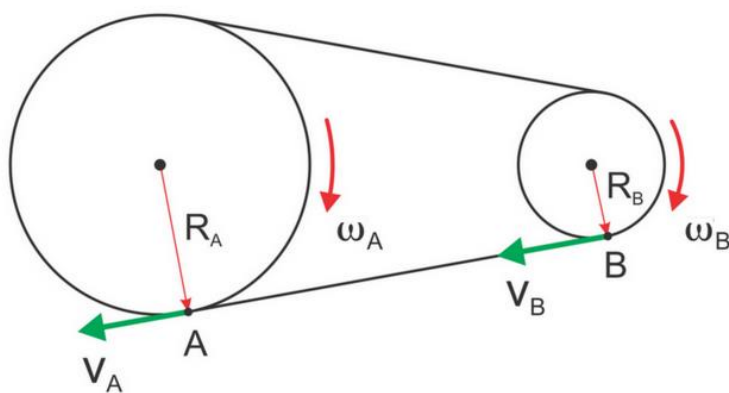


Figura 37- Sistema de transmissão de dois veios distanciados.

Considerando a polia A a roda mandante acionada por um motor, e a polia B a roda mandada que aciona uma carga. O ajuste da razão do raio de cada polia $\frac{R_A}{R_B}$, denomina-se de razão de transmissão, é possível transformar a velocidade angular ω de cada polia e o binário no veio respectivo. As velocidades V_A e V_B são sempre iguais, esta transformação ocorre como está descrito na seguinte equação:

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{T_A}{T_B} = \frac{\omega_B}{\omega_A} \quad (13)$$

Onde:

R_A é o raio da roda A;

R_B o raio da roda B;

T_A o binário no veio da roda A;

T_B o binário no veio da roda A;

ω_A é a velocidade de rotação da roda A em rad/s;

ω_B é a velocidade de rotação da roda A em rad/s.

1.9.1 Comparação de Dois Sistemas de Transmissão

Para a implementação de uma transmissão entre dois veios, segue-se uma breve análise comparativa dos dois sistemas, por correia e por corrente [28].

Correia

- As correias apresentam um rendimento de 96-98%
- As correias são menos fiáveis
- As correias requerem uma inspeção periódica da pré-tensão

- As correias planas e trapezoidais não asseguram uma relação de transmissão constante devido ao escorregamento que ocorre entre as superfícies da polia e da correia.

Corrente

- As correntes apresentam um rendimento de 97-98%
- As correntes apresentam uma fiabilidade intermédia
- As correntes requerem lubrificação e verificação da pré-tensão
- Nas correntes a razão de transmissão média é perfeitamente definida e independente da carga transmitida.

2 MODELO DINÂMICO DE UM VEÍCULO

Pretende-se criar um veículo elétrico de grande autonomia. Para este fim, são utilizados painéis fotovoltaicos distribuídos pela carroçaria exposta ao exterior. A potência disponível que se pode obter através dos painéis fotovoltaicos, é dependente da quantidade de painéis utilizados e é dada por (14):

$$P = A \cdot G \quad (14)$$

Onde:

A , é a área total de painéis fotovoltaicos em m^2 ;

G a radiância da energia solar W/m^2 .

Logo, quanto melhor for a distribuição e aproveitamento da área disponível na carroçaria do veículo para a distribuição dos painéis, maior será a potência disponibilizada para o seu movimento. Porém também é necessário proceder

Para a concretização com sucesso dos objetivos deste projeto, é necessário ter em consideração os vários constituintes do veículo. Assim, como, as suas vantagens, desvantagens e condicionantes de funcionamento. Desde a geração fotovoltaica à recolha e armazenamento da energia produzida e à sua transformação eletromecânica. A influência no desempenho deste veículo provém também de fatores externos, dentro dos

quais, os principais são as forças resistentes ao movimento. Nomeadamente, a resistência aerodinâmica, resistência ao rolamento, a resistência gravítica e a inércia. A radiação solar e a temperatura também afetam o desempenho do veículo ao provocar alterações na geração fotovoltaica.

2.1 Forças Resistentes ao Movimento

As forças resistentes ao movimento são todas as forças que se opõem ao movimento do veículo tais como: Resistência aerodinâmica; Resistência ao Rolamento; Força gravítica; Inércia (15). Não é considerada a inércia se a aceleração do veículo for nula, o que dá uma perceção do funcionamento e desempenho num regime contínuo e estável.

Quando o veículo viaja a uma velocidade constante, as forças de atrito, como resistência do ar, resistência ao rolamento e a força gravítica quando existe inclinação, irão provocar uma reação contrária á força motriz do motor que passará a tomar o mesmo valor em módulo. A resultante de todas as forças atuantes no veículo terá valor nulo.

$$F_r = F_{ar} + F_{rol} + F_g + m_{eq} \frac{dv}{dt} \quad (15)$$

Onde:

F_r é a força resultante;

F_{ar} a força resistente aerodinâmica;

F_{rol} a força resistente ao rolamento;

F_g a força resistente gravítica;

m_{eq} a massa equivalente do veículo.

Se não existir variação da velocidade no tempo, ou seja, aceleração, a inércia é nula.

2.1.1 Força Resistente ao Rolamento

A resistência ao rolamento principalmente acontece em cada rotação, a zona do pneu que trabalha e entra em contacto com o solo, banda de rolamento e flanco, abate, deforma-se e aquece, consumindo energia em forma de calor. Este fenómeno chama-se histerese e é a origem de **90%** da "resistência ao rolamento" dos pneus, sendo as restantes perdas causadas pelo atrito do solo, aderência e aerodinâmica do pneu.

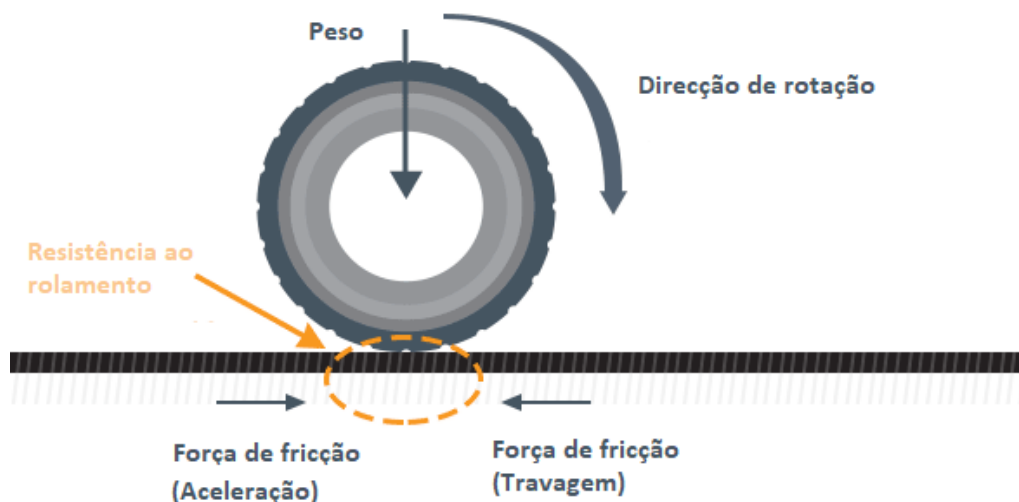


Figura 38-Modelo simplificado da resistência ao rolamento.

Utilizando a expressão (16) calcula-se o coeficiente de rolamento c_r , onde a, b e c são coeficientes do modelo determinado pela *Society of Automotive Engineers* (SAE) que desenvolveu testes para medir a resistência ao rolamento dos pneus e determinar assim, o valor destes coeficientes. Os testes (SAE J1269 e SAE J2452) são usualmente feitos em pneus novos.

$$c_r = a + \frac{1}{p}(b + c) \left(\frac{v_x}{100} \right)^2 \quad (16)$$

Onde:

p é a pressão de enchimento dos pneus em bar;

v_x a velocidade em km/h.

Determinado o coeficiente de rolamento dos pneus c_r , a força resistente ao rolamento é calculada a partir de (17);

$$F_{rol} = c_r m a_g \quad (17)$$

Onde:

m é a massa do veículo;

a_g a aceleração da gravidade na superfície terrestre.

2.1.2 Força Resistente Aerodinâmica

Quando um carro está em movimento, comporta-se como um objeto a atravessar um fluido, neste caso o ar. E quanto maior a velocidade atingida pelo veículo, maior é a ação do ar sobre ele. Para o cálculo do coeficiente de atrito aerodinâmico, que determina a facilidade com que o ar flui, neste caso, pela carroçaria de um automóvel, são efetuadas simulações computacionais e no final testes em túneis de vento com potentes ventiladores. O fluxo do ar e a facilidade com que flui pela carroçaria de um veículo é possível observar na Figura 39, as zonas de diferentes pressões e velocidades do ar, maior velocidade e maior pressão a cor vermelha e para menores velocidades e menores pressões a cor azul/violeta.

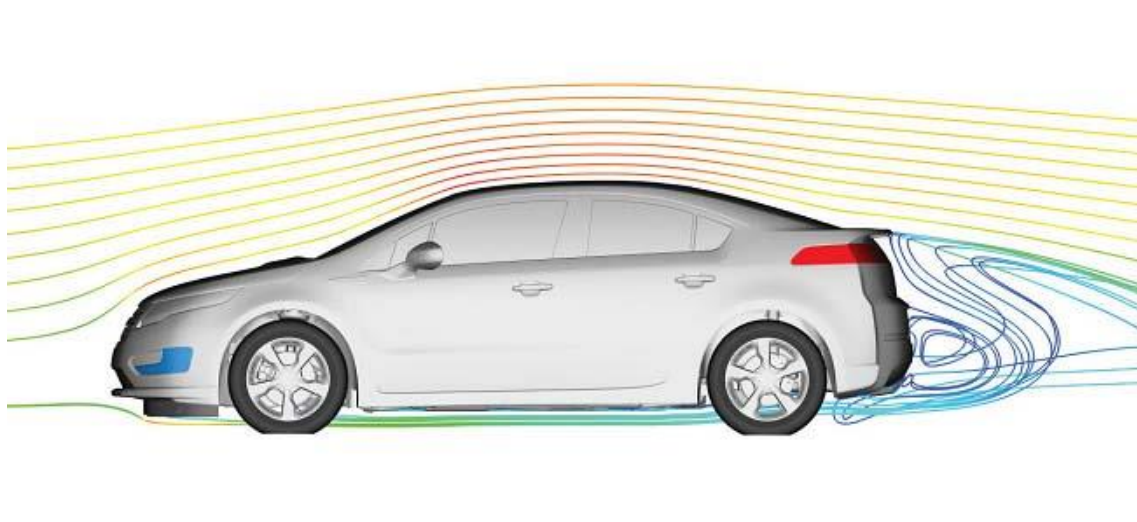


Figura 39-Exemplo de simulação aerodinâmica [29].

Utilizando a expressão da dinâmica de fluidos (18) atribuída a Lord Rayleigh [30], é usada para calcular a força de atrito pelo movimento de um objeto totalmente envolvido por um determinado fluido:

$$F_{ar} = \frac{1}{2} c_a \rho A v^2 \quad (18)$$

Onde:

c_a , é o coeficiente de atrito aerodinâmico;

ρ , é a densidade mássica volúmica do fluido em condições PTN. $\rho_{ar} = 1,2 \text{ kg/m}^3$;

A , a área frontal do veículo;

v , velocidade em m/s.

2.1.3 Força Resistente pela Ação da Gravidade

A aceleração da gravidade, causa uma força de atração num corpo de massa m em direção ao centro do planeta Terra. Sendo a aceleração constante na superfície da Terra, esta força é diretamente proporcional à massa do corpo. Se o corpo se localizar

num plano sem inclinação, ou seja, perpendicular à força gravítica, segundo a terceira lei de Newton o solo irá aplicar uma força de reação normal F_n , igual em módulo, mas com sentido oposto. Porém, ao circular num plano inclinado, como está ilustrado na Figura 40, o peso do veículo irá dividir-se em duas componentes. Uma será perpendicular à superfície onde circula, e irá provocar uma força de reação F_n em cada roda, somando as 4, totaliza um valor igual em módulo e sentido oposto, sendo: $4F_n = m \times a_g \times \cos \theta$. A outra força $F_g = m \times a_g \times \sin \theta$ sendo paralela à superfície irá opor-se ao movimento do veículo, a qual será responsável pelo esforço adicional do motor ao ter de gerar um maior binário de forma a vencer esta força e existir movimento no sentido pretendido.

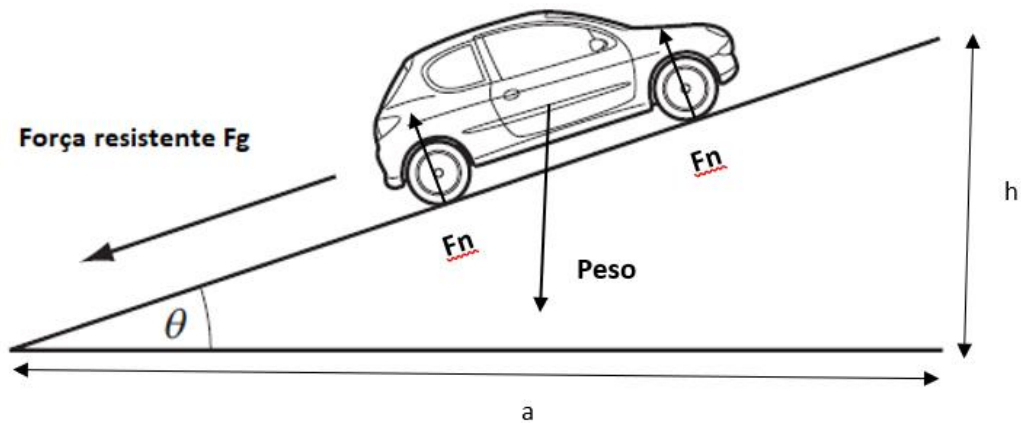
$$\sqrt{|F_g|^2 + 4|F_n|^2} = \text{Peso} = m \times a_g.$$


Figura 40- Representação das forças num plano inclinado.

O declive em percentagem é o formato normalmente usado na classificação e sinalização das estradas:

$$d(\%) = \frac{h}{a} 100 \quad (19)$$

Sendo a e h dados de acordo com a Figura 40.

De forma a calcular a força resistente em função do declive é utilizada a seguinte equação:

$$F_g = m a_g \frac{d(\%)}{100} \quad (20)$$

Onde:

m , é a massa do veículo

a_g , é a aceleração da gravidade (**9,81 m/s²**)

2.1.4 Força Resistente Devido à Inércia

De acordo com a 1ª Lei de Newton, um objeto em repouso permanece em repouso e um objeto em movimento permanece em movimento com a mesma velocidade e a mesma direção, a não ser que seja influenciado por uma força de desequilíbrio. Os objetos tendem a fazer no instante seguinte o que estão a fazer no instante presente, reagindo com uma força contrária a qualquer mudança. Esta tendência de resistência às mudanças do estado do movimento, é denominada de inércia.

A ação da inércia num veículo manifesta-se em diversas situações, em que existe alteração da velocidade ou da direção. Quando existe variação da velocidade, em situações de aceleração ou travagem, o esforço adicional causado pela ação da inércia é suportado pelo motor e sistema de travagem, respetivamente. Porém, quando existe alteração na direção do movimento do veículo, ao delinear uma trajetória em arco na realização de uma curva, os pneus e a sua aderência ao pavimento, serão os principais responsáveis em anular a força centrífuga resultante da inércia.

A intensidade da força equivalente da inércia F_i , está dependente do valor da aceleração $\frac{dv}{dt}$, como está representado na equação (21). Assim, significa que para manter a inércia com valores mínimos, é necessário proceder a variações da velocidade no tempo da forma mais suave possível.

$$F_i = m_{eq} \frac{dv}{dt} \quad (21)$$

$$m_{eq} = m + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\omega_i}{v}\right)^2 J_i \quad (22)$$

Onde:

n é o número de rodas do veículo;

ω a velocidade angular da roda em rad/s;

v a velocidade de deslocamento do veículo em m/s;

J é o momento de inércia de cada roda.

A massa equivalente m_{eq} calculada a partir de (22), é um valor constante, se a relação de transmissão das massas girantes constituintes do veículo, não sofrer alterações.

2.1.5 Perfil Temporal da Resistência ao Movimento

Para um veículo elétrico normal de dois eixos, a evolução da resultante das forças resistentes ao movimento, pode ser representada pelas curvas da Figura 41. O binário resistente representado na figura, é o binário aplicado ao veio do motor de um veículo de pequenas dimensões. Considera-se um percurso sem inclinação, onde a resultante das forças resistentes ao movimento é constituída por: força resistente aerodinâmica; força resistente ao rolamento; força resistente devido à inércia.

Observa-se que a inércia tem um grande impacto no desempenho do veículo. No intervalo de tempo de 5 a 20 segundos, ocorre um aumento da velocidade e por consequência, a aceleração do veículo é maior que zero. A partir dos trinta segundos quando a aceleração passa a ser nula, a inércia é nula, e as únicas forças resistentes ao movimento do veículo é a aerodinâmica e de rolamento, que provocam um binário resistente cerca de quatro vezes inferior. Quando se inicia a desaceleração do veículo a partir dos sessenta segundos, existe um pequeno binário de travagem quando o binário é menor que zero, pois, as forças resistentes ao movimento contribuem para a diminuição da velocidade.

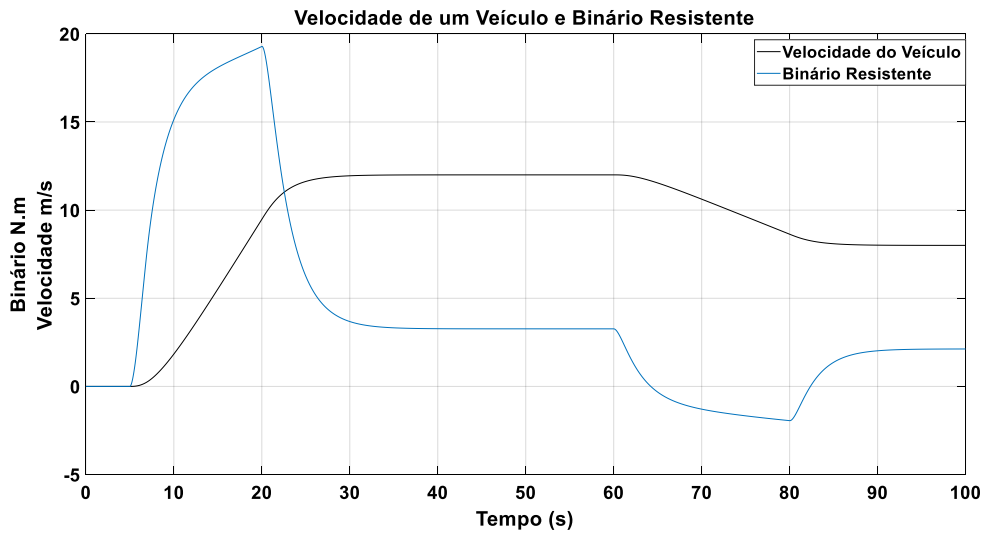


Figura 41- Perfil temporal do binário resistente no motor de um veículo.

2.2 Modelo Dinâmico de um Motor de Corrente Contínua

O objetivo do modelo matemático é relacionar a tensão aplicada ao motor à velocidade do rotor, considerando as características elétricas e mecânicas do sistema. O circuito elétrico equivalente de um motor de CC é ilustrado na Fig. 42. Pode ser representado por uma fonte de tensão (U) aplicada aos terminais do enrolamento da armadura. O equivalente elétrico do enrolamento do circuito do induzido pode ser representado por uma indutância (L_a) em série com uma resistência (R_a) em série com uma tensão induzida (E) que se opõe à fonte de tensão. A tensão induzida ou força eletromotriz (fem) induzida é gerada pela rotação da bobina através das linhas de fluxo fixas dos magnetos permanentes.

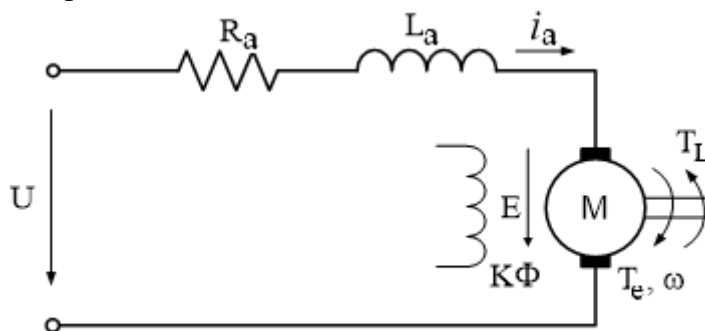


Figura 42- Circuito equivalente de um motor de corrente contínua [31].

2.2.1 Modelo Matemático

Uma equação diferencial para o circuito equivalente pode ser escrita usando a lei das tensões de Kirchoff. A lei das tensões de Kirchoff afirma que a soma de todas as tensões em torno de uma malha fechada deve ser igual a zero (23).

$$U - V_R - V_L - E = 0 \quad (23)$$

De acordo com a lei de ohm, a tensão aos terminais de uma resistência pode ser representada (24):

$$V_R = i_a R_a \quad (24)$$

Onde i_a é a corrente do circuito do enrolamento do induzido. A tensão da indutância é proporcional à variação do valor da corrente num determinado intervalo de tempo e pode ser escrita através da equação (25):

$$V_L = L_a \frac{d}{dt} i_a \quad (25)$$

Onde L_a é a indutância do circuito do enrolamento do induzido do motor. A fem induzida pode ser escrita (26):

$$E = k\phi \omega \quad (26)$$

Onde $k\phi$ é a constante de velocidade determinada pela densidade de fluxo dos magnetos permanentes, a relutância do núcleo ferro magnético da armadura e pelo número de espiras do enrolamento.

ω é a velocidade de rotação em rad/s do motor. Substituindo (24), (25) e (26) na equação (23) obtém-se a seguinte equação diferencial:

$$U(t) - i_a(t) R_a - L_a \frac{d}{dt} i_a(t) - k\phi \omega(t) = 0 \quad (27)$$

A soma dos binários do motor tem de ser igual a zero, portanto:

$$T_e - T_\omega - T_L = 0 \quad (28)$$

Onde:

T_e é o binário eletromagnético;

T_ω é o binário devido à inércia do rotor.

T_L é a soma do binário da carga mecânica aplicada ao veio do motor com todas as perdas mecânicas.

O binário eletromagnético é proporcional à corrente absorvida pelo enrolamento da armadura e pode ser escrita como (29):

$$T_e = k\phi i_a \quad (29)$$

Onde $k\phi$ é a constante de velocidade determinada pela densidade de fluxo dos magnetos permanentes, a relutância do núcleo ferro magnético da armadura e pelo número de espiras do enrolamento.

T_ω pode ser determinado a partir da seguinte equação (30):

$$T_\omega = J \frac{d}{dt} \omega \quad (30)$$

Onde J é a inércia do rotor e de toda a carga mecânica aplicada, neste caso será de todo o carro elétrico. A associação do binário com a velocidade pode ser escrita (10):

Substituindo (29) e (30) na equação (28) obtém-se a seguinte expressão:

$$k\phi i_a - J \frac{d}{dt} \omega - T_L = 0 \quad (31)$$

2.2.2 Equação Dinâmica

As equações diferenciais dadas em (27) e (31) para a corrente do motor e a velocidade angular podem escrever-se como (32) e (33):

$$\frac{d}{dt} i_a(t) = -\frac{k\phi}{L_a} \omega(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) + U(t) \quad (32)$$

$$\frac{d}{dt} \omega(t) = \frac{k\phi}{J} i_a(t) - \frac{T_L(t)}{J} \quad (33)$$

O modelo dinâmico do motor elétrico de corrente contínua, pode ser descrito com equações de estado.

Sendo entradas do sistema:

$$\begin{cases} u_1(t) = U(t) \\ u_2(t) = T_L(t) \end{cases} \quad (34)$$

Saídas do sistema:

$$\begin{cases} y_1(t) = T_e(t) \\ y_2(t) = \omega(t) \end{cases} \quad (35)$$

Variáveis de estado $i_a(t)$ e $\omega(t)$:

$$\begin{cases} x_1(t) = i_a(t) \\ \dot{x}_1(t) = \frac{di_a(t)}{dt} \\ x_2(t) = \omega(t) \\ \dot{x}_2(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} \end{cases} \quad (36)$$

De seguida, as equações são colocadas num sistema matricial no formato do espaço de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k\phi}{L_a} \\ \frac{k\phi}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (38)$$

Simbolicamente pode ser expresso como:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{Bu}(t) \quad (39)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx}(t) + \mathbf{Du}(t) \quad (40)$$

Onde \mathbf{x} é a matriz de estados, \mathbf{u} a matriz de entradas e \mathbf{y} a matriz de saídas.

2.2.3 Equações no Sentido Entrada-Saída

O diagrama de blocos deste sistema é desenvolvido a partir das equações diferenciais dadas em (32) e (33). Aplicando a transformada de Laplace em cada uma das equações obtém-se:

$$s i_a(s) = -\frac{k\phi}{L_a} \omega(s) - \frac{R_a}{L_a} i_a(s) + \frac{1}{L_a} U(s) \quad (41)$$

$$s \omega_a(s) = \frac{k\phi}{J} i_a(s) - \frac{B}{J} \omega(s) - \frac{1}{J} T_L(s) \quad (42)$$

Considerando as condições iniciais nulas, as equações podem ser expressas:

$$I_a(s) = \frac{-k\phi \omega(s) + U(s)}{sL_a + R_a} \quad (43)$$

$$\omega_a(s) = \frac{-k\phi i_a(s) - T_L(s)}{Js} \quad (44)$$

As equações acima podem ser facilmente aplicadas na construção de um diagrama de blocos. O diagrama de blocos que se obtém para um motor de corrente contínua de ímãs permanentes está ilustrada na Fig. 43.

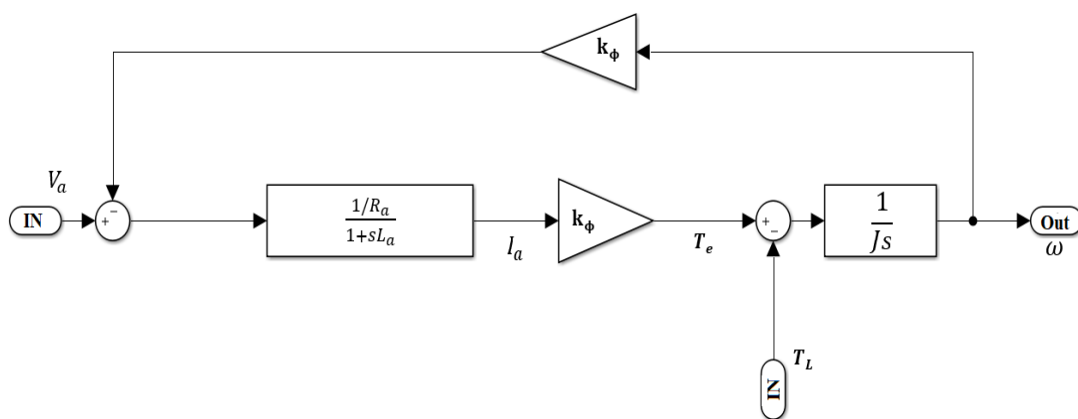


Figura 43- Diagrama de blocos do motor de corrente contínua.

2.3 Modelo Dinâmico de um Veículo Elétrico

Para entender melhor o funcionamento detalhado do veículo projetado é necessária a sua simulação. É possível observar em detalhe a evolução no tempo de cada parte do sistema de transmissão de potência, desde o controle da alimentação do motor elétrico até à velocidade e potencia disponível nas rodas. Como entrada do sistema que constitui o carro elétrico será uma velocidade de referência em m/s que pode variar nas mais diversas formas no tempo, permitindo observar a resposta a acelerações e desacelerações ou manter-se constante, se assim for o pretendido. As principais saídas pretendidas são a velocidade de deslocamento do veículo e a potência que está disponível às suas rodas. Na Figura 44 encontra-se uma representação das entradas e saídas deste sistema.



Figura 44-Bloco de entradas-saídas do simulador carro elétrico.

Para o funcionamento do modelo dinâmico de um veículo elétrico, é necessário ter em consideração os principais elementos constituintes do veículo, e a sua interação mútua. Sendo o bloco central de todo o modelo o motor de corrente contínua (Figura 43),

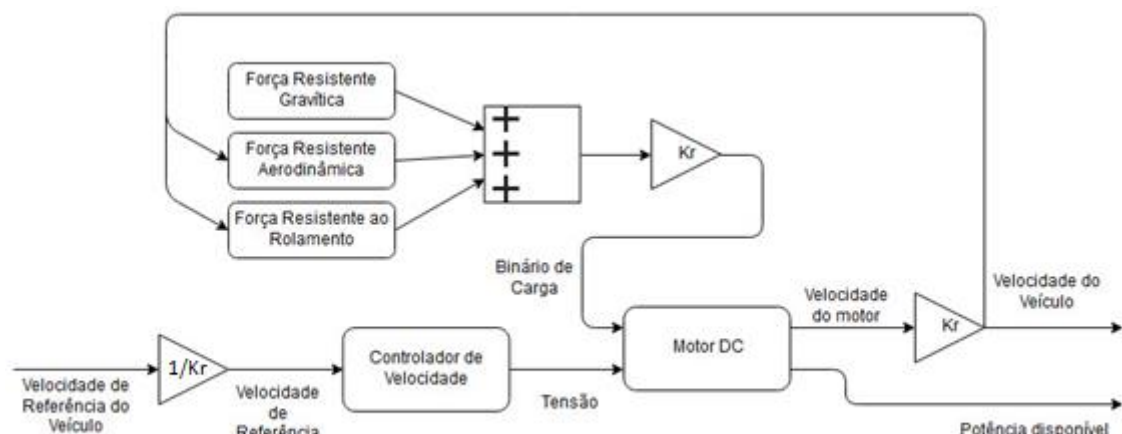


Figura 45- Modelo dinâmico de um veículo elétrico.

que permite a simulação da inércia, tem como saída uma velocidade de rotação, controlada através da entrada do sistema de uma tensão de alimentação. Na Figura 45 encontra-se ilustrada a interação dos elementos de um modelo dinâmico de um veículo elétrico. Como o motor é o elemento principal deste modelo, é necessário a aplicação do fator K_r , este fator converte a velocidade de deslocamento do veículo na velocidade de rotação do motor ou vice-versa. Contudo o fator é dependente do raio das rodas utilizadas e da relação de transmissão equivalente ao veio do motor. De seguida o controlador de velocidade, é responsável por igualar a velocidade do motor à velocidade de referência, através da tensão de alimentação do motor. Todo o binário de carga aplicado ao motor provém das forças resistentes. Para a forças resistentes aerodinâmica e de rolamento é fundamental a velocidade de deslocamento do veículo, assim, existe uma realimentação desta saída do sistema para o cálculo das forças resistentes aerodinâmica e de rolamento.

O modelo dinâmico do veículo pode ser apresentado na forma de um diagrama de blocos, num modelo do tipo entrada-saída.

Como entrada no modelo tem-se o perfil temporal de velocidade (45).

$$v_r = f(t) \tag{45}$$

Como se mostra na Figura 46.

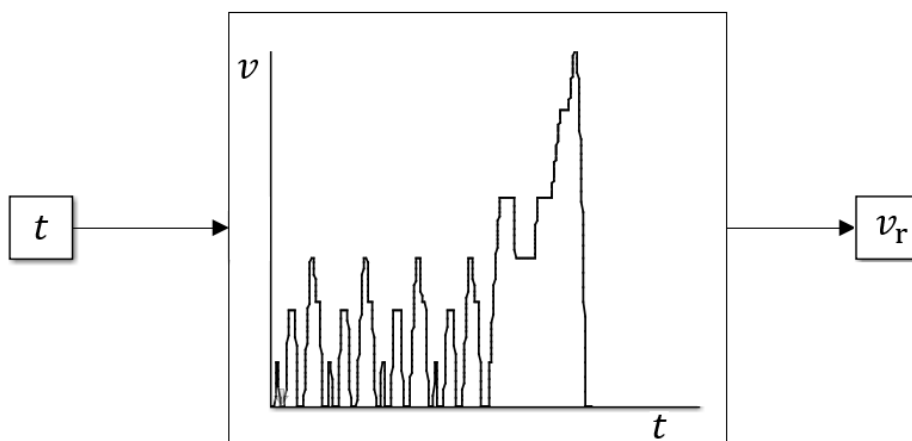


Figura 46- Perfil temporal de velocidade.

Tem como entrada o tempo e como saída a velocidade de referência do veículo. Internamente o bloco é construído com uma tabela que relaciona a velocidade com o

tempo. A velocidade obtida no bloco da figura 46 é uma velocidade de referência, isto é a velocidade com que se pretende que o veículo se desloque. Por isso a designação v_r .

A velocidade do veículo é designada por v , sendo obtida na saída do modelo dinâmico. Esta velocidade realimenta com sinal negativo o controlador de velocidade.

Supondo, numa primeira abordagem, que se utiliza um controlador de velocidade proporcional, então a tensão de alimentação do motor de corrente contínua é dada por:

$$U = (v_r - v) \cdot k_v \quad (46)$$

Onde:

k_v é o ganho de velocidade proporcional.

A expressão (46) dá origem ao bloco do controlador de velocidade como se mostra na Figura 47.

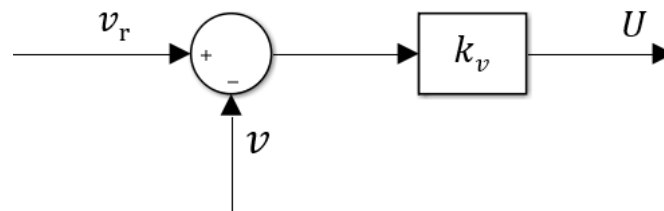


Figura 47- Controlador proporcional de velocidade.

A partir do modelo dinâmico do motor sentido entrada-saída (41), constrói-se o bloco, apresentado na Figura 48, que permite obter a corrente no induzido, i_a e consequentemente, de (29), o binário ao veio do motor, T_m .

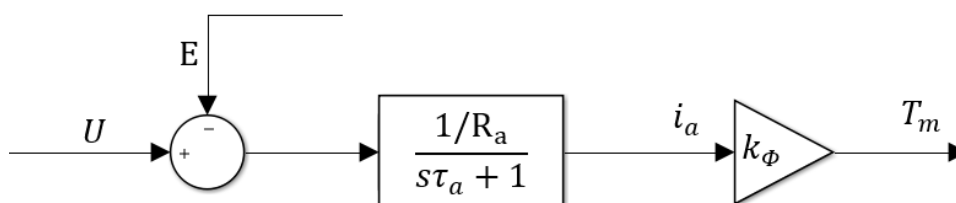


Figura 48- Conversão eletromagnética da energia elétrica em energia mecânica.

Onde E representa a f.e.m. produzida pelo motor. O binário no veio do motor pode ser convertido no binário de roda T_{roda} , com:

$$T_{roda} = T_m \cdot k_r \quad (47)$$

Onde:

T_{roda} é o binário na roda;

k_r a relação de transmissão entre o motor e a roda.

Então a força motora na roda F_m é dada por (48).

$$F_m = \frac{T_{roda}}{R_{roda}} \quad (48)$$

Onde:

R_{roda} é o raio da roda.

A transformação do binário motor em Força, motora na roda é ilustrado na Figura 49.

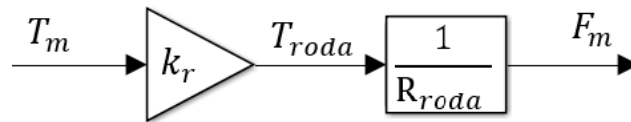


Figura 49- Transformação do binário motor em força de tração na roda.

A força de tração na roda F_{roda} , é a força resultante da força motora F_m com a força resultante F_r .

$$F_{roda} = F_m - F_r \quad (49)$$

Dada a massa equivalente do veículo m_{eq} , (22) e sabendo que, de (21)

$$F_m - F_r = m_{eq} \frac{dv}{dt} \quad (50)$$

pode-se, então, escrever o bloco de conversão da força em velocidade como se mostra na Figura 50.

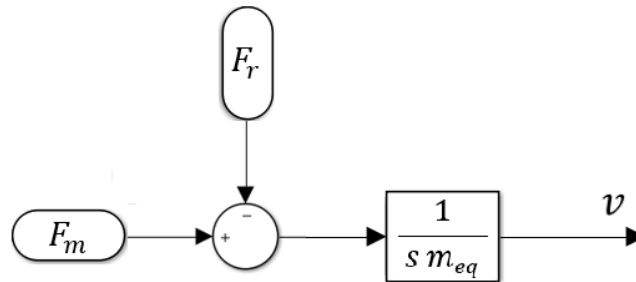
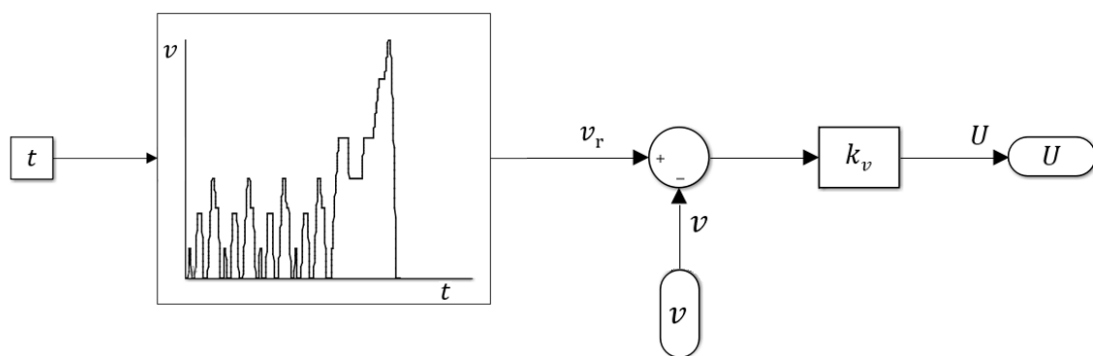


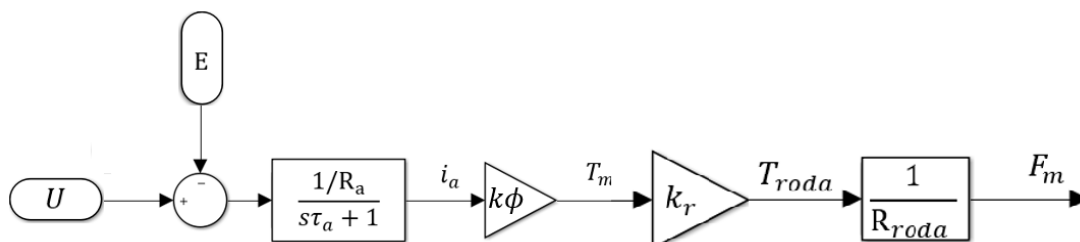
Figura 50- Conversão das forças nas rodas em velocidade.

Nota: É desprezado o escorregamento entre a roda e a superfície de circulação.

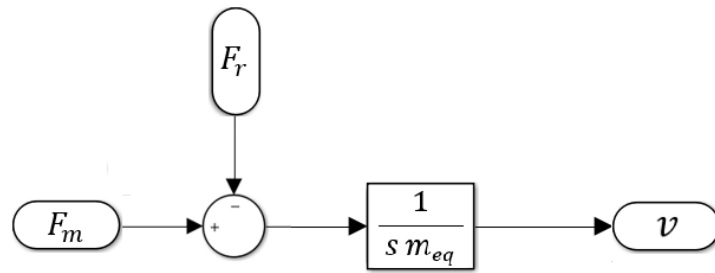
Tendo em consideração (17), (18), (20) e (26) pode agora construir-se o modelo dinâmico do veículo no sentido entrada-saída, como se representa na Figura 51 a), b), c) d), e).



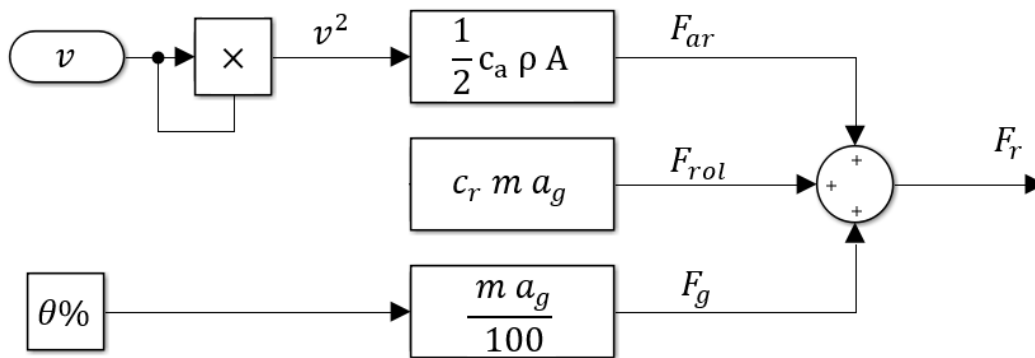
a)



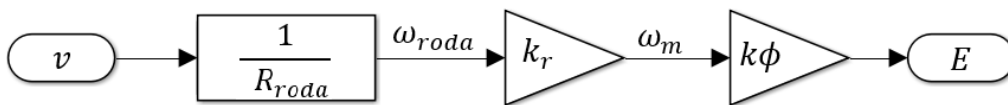
b)



c)



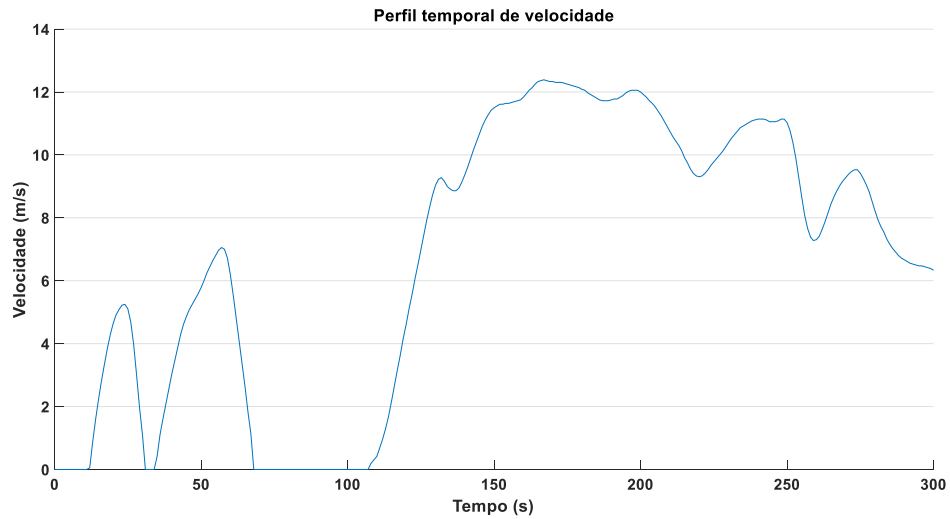
d)



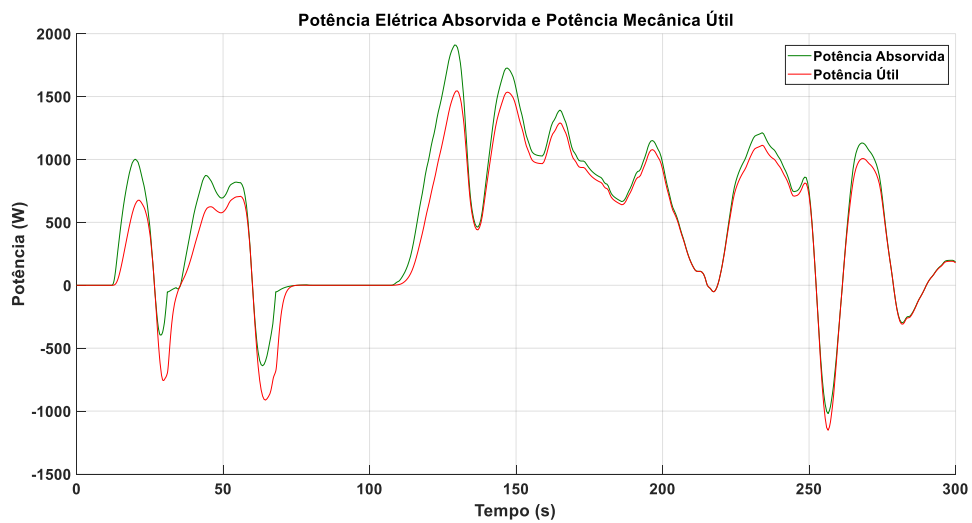
e)

Figura 51- Modelo dinâmico do veículo. a) Perfil de velocidade que controla o motor. b) Conversão eletromecânica. c) Conversão da força em velocidade. d) Forças resistentes ao movimento. e) Determinação da f.e.m. em função da velocidade.

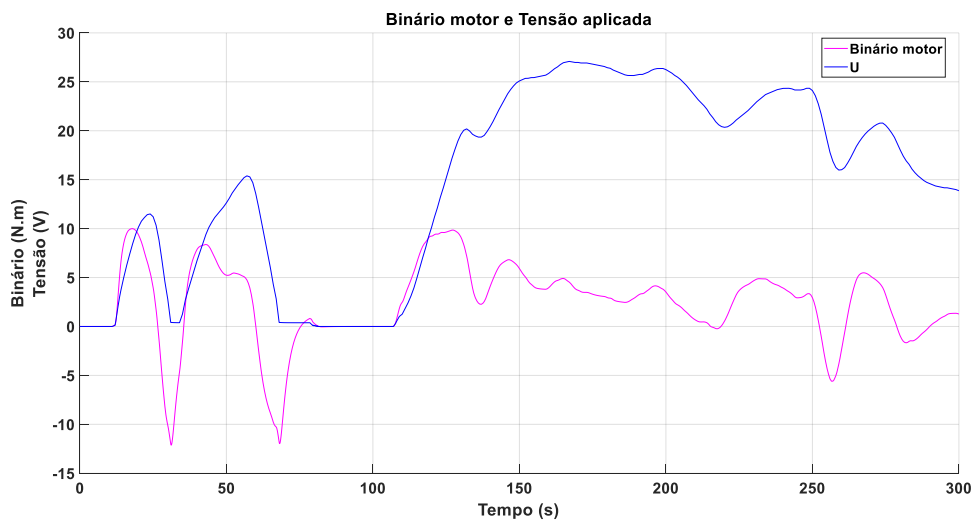
Utilizando o modelo dinâmico de um veículo elétrico, obtém-se a evolução no tempo das diversas variáveis. Em a), b), c) e d) da Figura 52, observa-se a resposta de um veículo elétrico a um perfil temporal de velocidade.



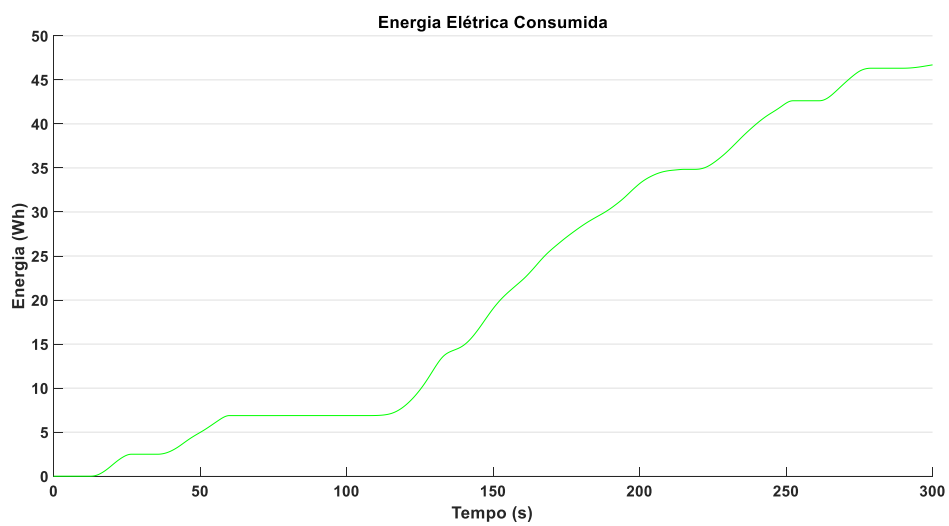
a)



b)



c)



d)

Figura 52- Simulação dinâmica de um veículo elétrico. a) Perfil temporal de velocidade. b) Potência elétrica consumida e Potência mecânica útil. c) Binário motor e Tensão de alimentação. d) Consumo de energia elétrica.

3 PROJETO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO SOLAR

No projeto de um veículo elétrico solar são dimensionados e selecionados os diversos componentes constituintes do veículo. Concretamente, é um processo complexo, devido à grande variedade de componentes necessários, e à análise detalhada da sua implementação no veículo. Assim, o projeto resultante é focado nos principais componentes e no desempenho no veículo. A escolha e dimensionamento dos componentes, foi feita e iterativamente, através de várias simulações até que se alcançassem os resultados pretendidos. Porém, a viabilidade económica deste veículo com custos referenciados no Anexo A, foi também, uma das variáveis importantes do projeto. Os materiais utilizados respeitam esta preocupação, e por consequência, não se utiliza o que existe de mais tecnologicamente avançado, se o seu valor comercial não for justificável em relação às alternativas.

3.1 Painéis Fotovoltaicos

Para a não necessitar de fontes de energia elétrica externas, o veículo tem de possuir, de alguma forma, a capacidade de geração de energia elétrica essencial para o seu movimento. Num veículo convencional, toda a sua área exterior da carroçaria é composta por chapa em contacto com a radiação solar, e toda essa energia é, em parte,

refletida e absorvida sem qualquer utilidade. Portugal é um país com excelente exposição solar anual, e a energia do sol pode ser facilmente convertida em energia elétrica através de painéis fotovoltaicos. Irão ser utilizados painéis fotovoltaicos flexíveis de modo a ser possível o alinhamento para com as curvas presentes na carroçaria do veículo. Os painéis propostos são flexíveis de silício monocristalino produzidos pela empresa Solbian, em Itália, as suas características e dimensões estão na tabela da Tabela 5.

O Anexo B, mostra as principais dos painéis fotovoltaicos.

Tabela 5- Tabela de características dos painéis fotovoltaicos utilizados			
Modelo do Pannel	SR 160 Q	SR 108 Q	SR 72 Q
Potência de Pico [W]	160	108	72
Comprimento [mm]	1046	1046	728
Largura [mm]	996	683	683
Espessura [mm]	2	2	2
Massa [kg]	2,40	1,70	1,2
Tensão para máxima potência [V]	18,6	12,6	8,4
Corrente para máxima potência [A]	8,6	8,6	8,6
Tensão em circuito aberto [V]	23	15,3	10,2
Corrente de curto circuito [A]	9	9	9

3.2 Proposta de Carroçaria

Sabendo as características pretendidas do veículo é possível proceder ao projeto do desenho do seu exterior. Utilizando as várias vistas, pode observar-se qual será o aspeto externo do veículo. Foi necessário aproveitar ao máximo a área exterior da carroçaria para a distribuição de painéis fotovoltaicos, mas também ao mesmo tempo manter a suavidade das suas curvas, principalmente na parte frontal de forma a não prejudicar o seu desempenho aerodinâmico.

Nas Figuras 53 e 54 são mostradas, respectivamente, as vistas superior e frontal do veículo.

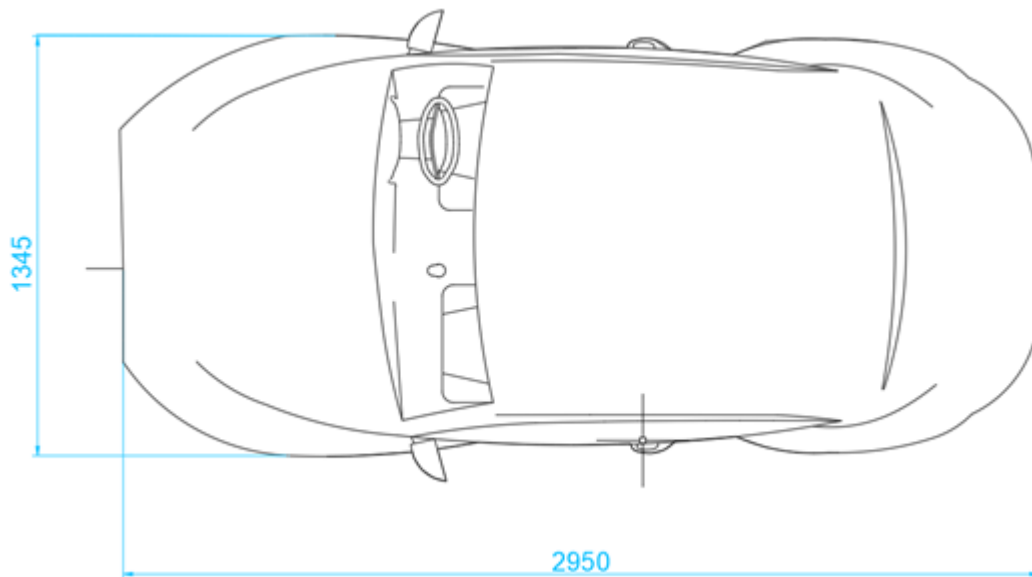


Figura 53-Vista superior do veículo.

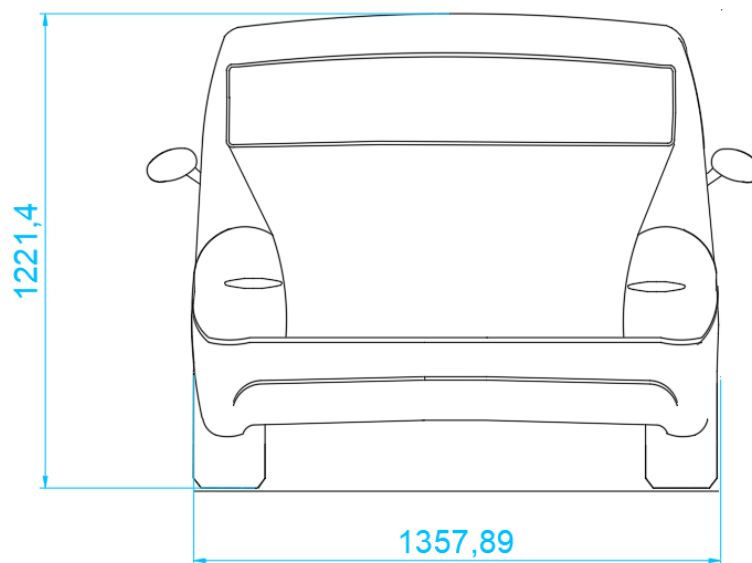


Figura 54- Vista frontal do veículo.

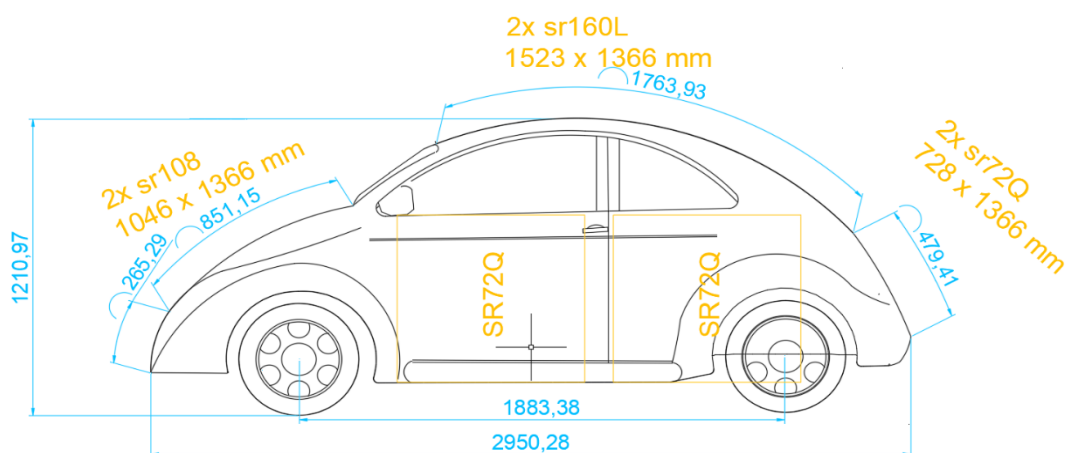


Figura 55- Vista lateral do veículo, mostrando a distribuição dos painéis

Na figura 55 pode observar-se a vista lateral do veículo, onde se encontram distribuídos os painéis fotovoltaicos. A maioria dos painéis fotovoltaicos é distribuída na parte superior, onde é possível colocar dois painéis lado a lado. As medidas dos painéis fotovoltaicos flexíveis são definidas pelo fabricante. É possível preencher o exterior do veículo com 8 painéis, 2 de **108 W**, 2 de **160 W** e 6 de **72 W**, totalizando assim, uma potência de pico de **968 W**, com uma massa total de **15,4 kg**, considerando todos os painéis fotovoltaico.

3.3 Proposta de Chassis

O chassis é a estrutura responsável pelo suporte de todo o veículo e onde são montados os principais componentes do veículo. Nas Figuras 56 e 57 é apresentada a proposta de chassis para o veículo projetado. Contém as rodas, sistema de direção, transmissão, motor e baterias. Para a estrutura de suporte é utilizada tubagem em alumínio, um material leve e suficientemente resistente, a outra opção seria fibra de carbono. Contudo, bastante superior em relação ao alumínio, na relação massa-rigidez, iria permitir uma construção significativamente mais leve, porém é afastada a hipótese da sua utilização por ser dispendiosa economicamente.

O sistema de transmissão é composto por duas rodas dentadas, a mandante acoplada ao veio do motor elétrico e a mandada montada no eixo traseiro. As rodas dentadas são interligadas por uma corrente de transmissão, a sua relação de velocidade é de 7, valor este definido por ser o que foi encontrado como o mais eficiente em simulação.

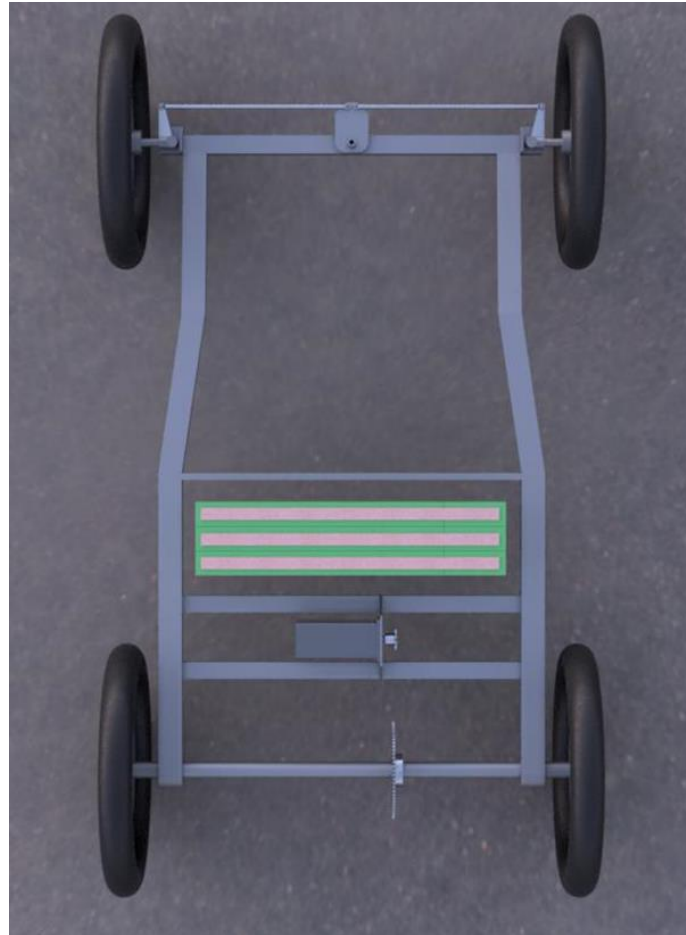


Figura 57- Vista superior do chassi.

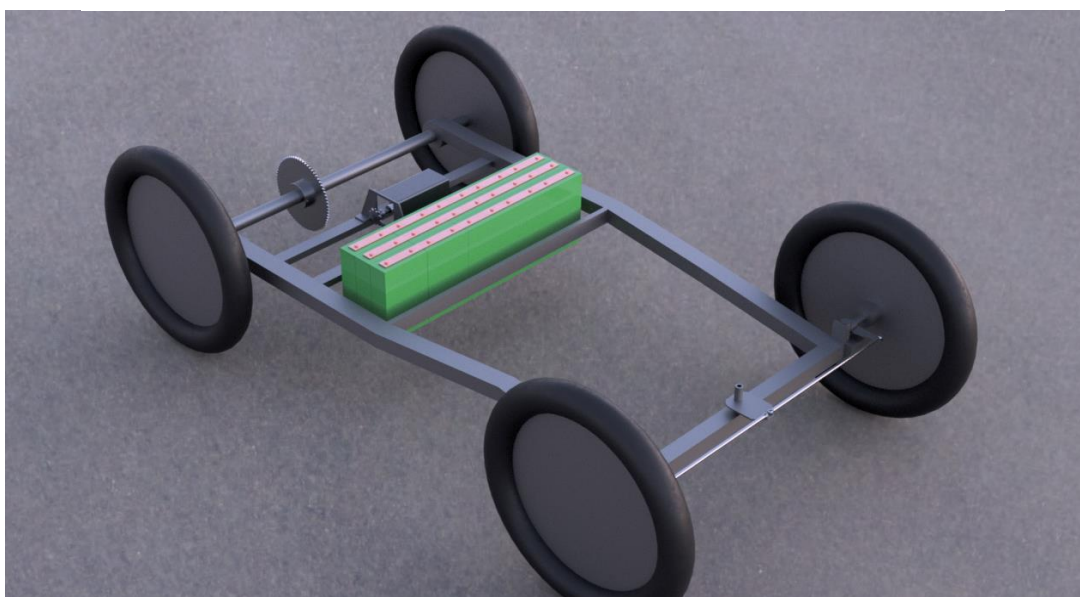


Figura 56- Vista frontal-lateral da proposta de chassi.

3.4 Constituição da Bateria do Veículo

A bateria que se propõe utilizar é produzida pela empresa Voltronix nos Estados Unidos da América, possui uma capacidade de **180 Ah @ 48 A**. Pode ser observada a bateria na Figura 58 e as suas dimensões na Figura 59. As principais características desta bateria estão presentes no Anexo C.



Figura 58-Bateria Voltronix 180 Ah Lítio Fosfato de Ferro [32].

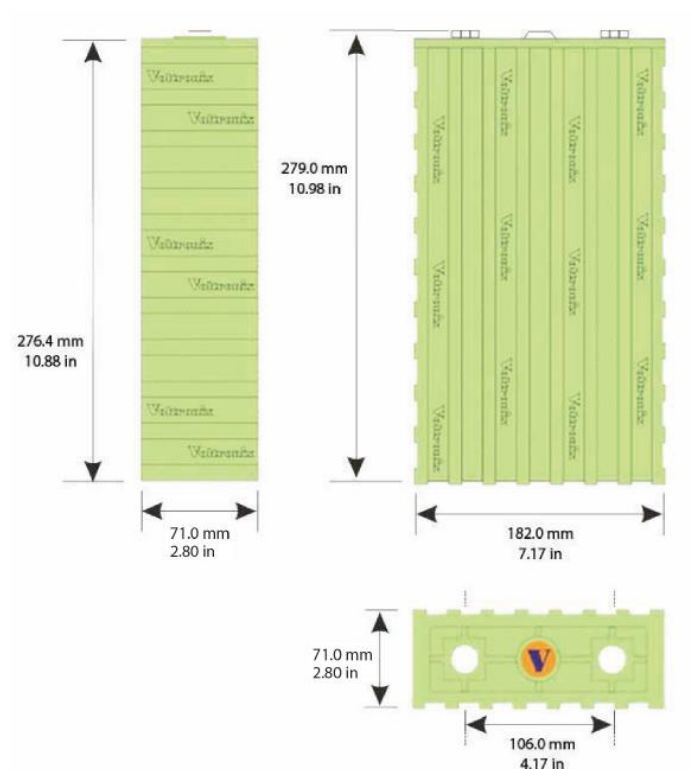


Figura 59-Dimensões da bateria [32].

É necessário o conhecimento das características técnicas da bateria em uso de modo a ser possível dimensionar e definir as ligações. Esta informação está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5- Informação Técnica Da Bateria	
Capacidade	180 Ah
Massa	5,9 kg
Tensão Nominal	3,2 V
Tensão de carga cut-off	3,6 V
Corrente de Carga	48 A
Descarga cut-off	2,5 V
Corrente máxima de descarga	540 A
Corrente máxima de descarga (10 seg.)	8c- 1440 A
Composição Química	LiFePO4

No dimensionamento da bateria para o veículo, tem de ser definida a tensão da mesma de modo a ser possível a ligação com os painéis fotovoltaicos. Sabendo que a mínima tensão de carga é de **3,6 V** e a tensão dos painéis à máxima potência é **18,6 V**. Ao ligar cinco baterias em série, o resultado da soma da tensão mínima de carga de cada bateria será de **18 V**, valor compatível para com a ligação aos painéis. No total são 15 baterias agrupadas em séries de 5, o esquema elétrico de ligação está representado na Figura 61. Os 3 grupos de 5 baterias são ligados em paralelo de modo a formar a bateria responsável pelo armazenamento e fornecimento de energia elétrica, com cerca **912 mm** de comprimento por **215 mm** de largura e **279 mm** de altura, como se pode observar pela Figura 60, A massa total da bateria é de **88,5 kg**.

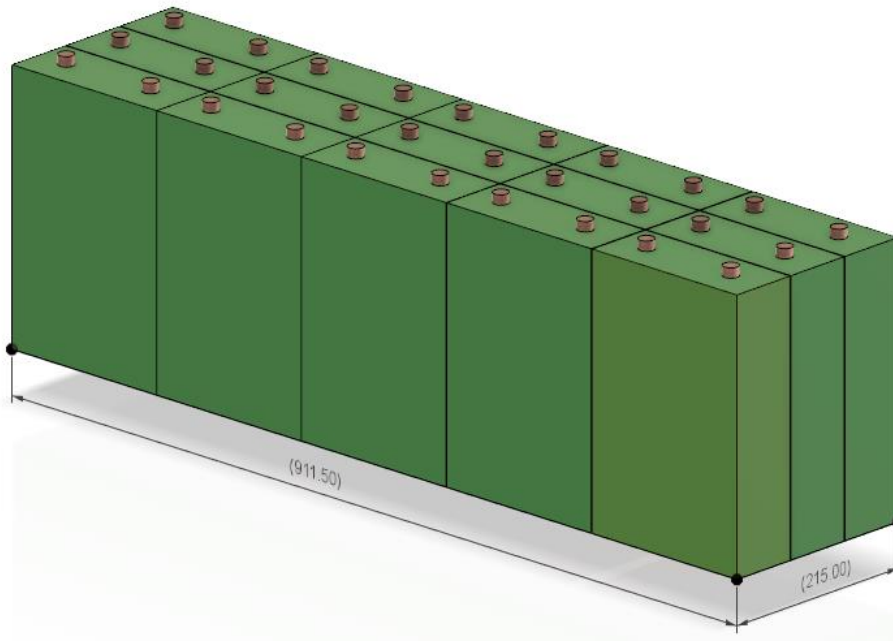


Figura 60- Dimensões da bateria.

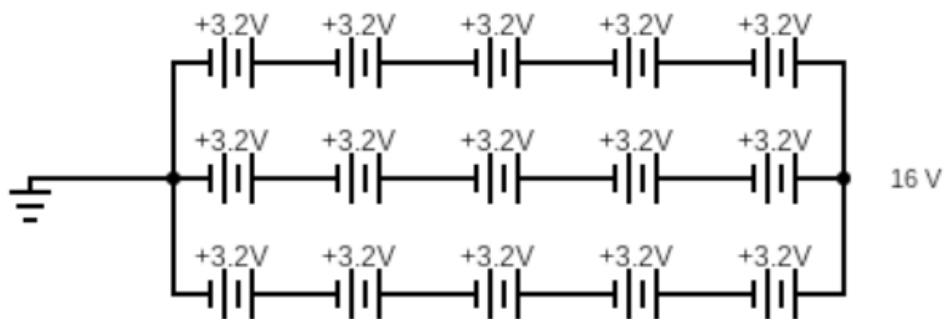


Figura 61- Circuito Equivalente da ligação das baterias.

3.5 Implementação Dos Painéis Fotovoltaicos

Com a implementação de vários painéis fotovoltaicos diferentes, é necessário a aplicação de um sistema MPPT, que possibilite a carga das baterias e também a otimização da potência fornecida por cada painel. A Figura 62 mostra o diagrama blocos do sistema MPPT. Para um sistema com N painéis solares, são necessários N sensores de corrente e não são necessários sensores de tensão, eliminando a necessidade de os circuitos multiplicadores obterem os valores de potência de cada painel. Portanto, o custo do controlador, o consumo de energia do controlador e o tamanho são reduzidos em comparação com os controladores MPPT convencionais, o que é uma vantagem para a implementação num veículo. O Conversor de potência ajusta a tensão de saída para a alimentação das baterias, assim, será somente necessário agrupar os painéis em diferentes grupos (PV Array) na configuração pretendida [33].

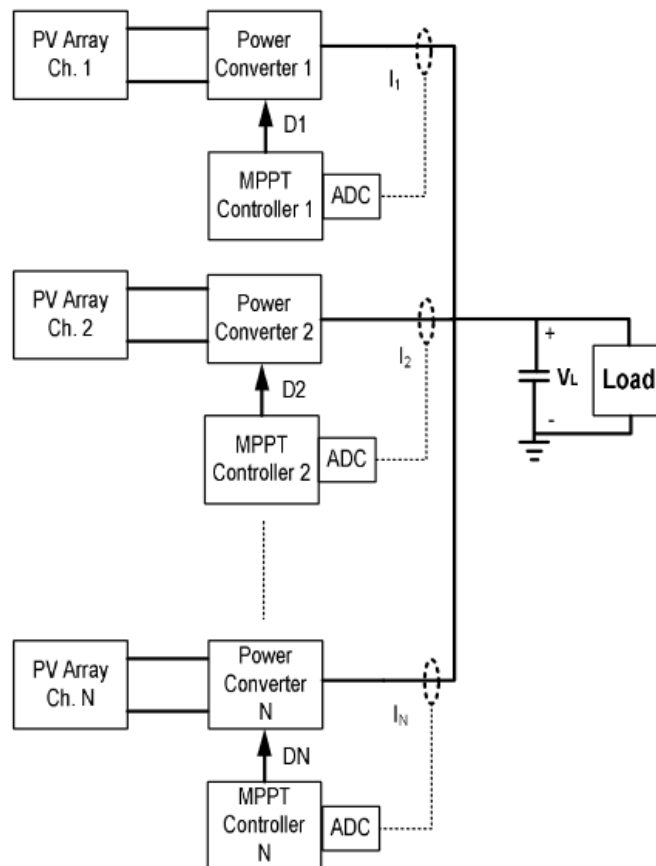


Figura 62- Modelo MPPT para diferentes painéis [33].

Com base no sistema de MPPT anterior é feito o agrupamento dos diferentes painéis distribuídos pelo veículo. Os painéis fotovoltaicos são agrupados, principalmente os que estão sujeitos aproximadamente aos mesmos níveis de radiação solar. No total são formados quatro grupos de painéis solares como está representado na Figura 63. Nos grupos 1 e 3 os dois painéis de cada grupo vão ser eletricamente ligados em série, no grupo 2 é efetuada uma ligação em paralelo. Finalmente no grupo 4, constituído pelos painéis colocados nas partes laterais do veículo, são efetuadas ligações em série nos 2 painéis de cada lado, a lateral esquerda está independente da direita, onde, cada uma tem o seu controlador MPPT.

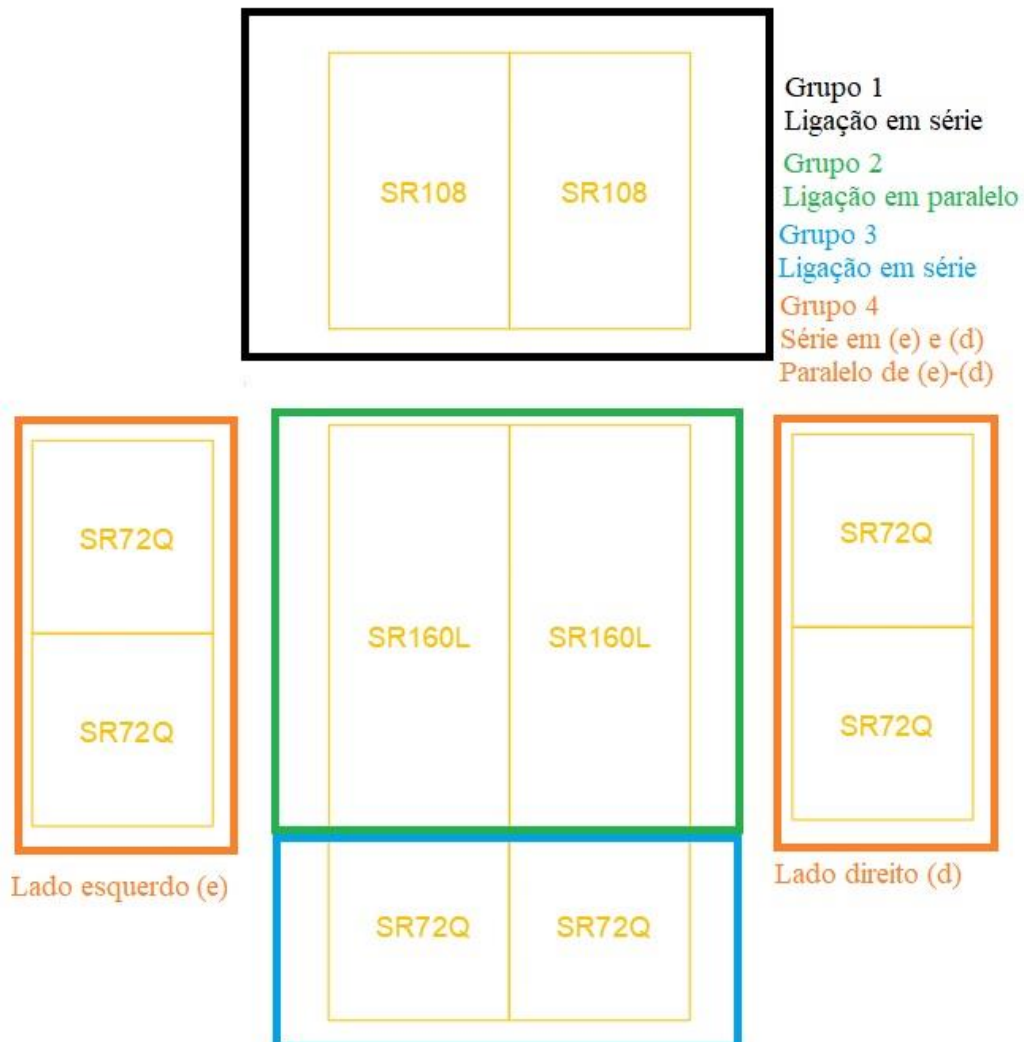


Figura 63- Agrupamento dos painéis fotovoltaicos.

3.6 Motor Elétrico

O motor elétrico é um dos mais importantes constituintes do veículo, é a máquina responsável pela conversão da energia elétrica em energia mecânica, portanto, é o responsável pelo movimento do veículo. O motor proposto para o veículo, é um motor de corrente contínua sem escovas. Conseqüentemente, necessita de um controlador eletrônico de velocidade.

O motor elétrico proposto está ilustrado na Figura 64 e as suas características são apresentadas na Tabela 6.



Figura 64- Motor elétrico do veículo.

Tabela 6- Especificações Técnicas do Motor	
Tamanho da Flange Quadrada	130 mm
Massa	12 kg
Tensão Nominal	24 V
Corrente Nominal	102,7 A
Potência Nominal	2 kW
Binário Nominal	10 N.m
Potência de Pico	6,3 kW
Binário de Pico	30 N.m
Velocidade Nominal	2000 r.p.m.
Velocidade Máxima	2400 r.p.m.
Potencial Elétrico	10 V/krpm
Inércia do Rotor	21.4 kg.cm ²

4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Com o objetivo de conhecer o desempenho do veículo elétrico-solar projetado nas mais diversas situações, pode recorrer-se a simulações computacionais. Os modelos matemáticos, esses mesmos modelos, podem ser implementados num *software* de simulação matemática. Assim, é possível observar a evolução das variáveis pretendidas, conhecer e entender as limitações e vantagens do veículo projetado.

Uma vez que, o veículo e os seus principais componentes já foram dimensionados, é possível apresentar as principais características do veículo na tabela 7.

Tabela 7- Veículo Projetado	
Dimensões e Características	
Comprimento	2950 mm
Largura	1350 mm
Altura	1220 mm
Área Frontal	1,65 m ²
Coefficiente Aerodinâmico	0,32
Massa	350 kg
Transmissão Mecânica	
Tipo de Transmissão	Corrente
Relação de Transmissão	7
Rodas	
Diâmetro do Pneu	66,04 cm
Largura do Pneu	6 cm
Pressão do Pneu	4 bar

4.1 Forças Resistentes e Desempenho em Regime Permanente

4.1.1 Resistência ao Rolamento

De forma a calcular o impacto que a evolução do coeficiente de rolamento tem na força resistente, denominada de resistência ao rolamento, com o aumento da velocidade é utilizada a expressão (17).

Onde:

$$a = 0,005; b=0,01; c=0,0095.$$

$$a_g, \text{ é a aceleração da gravidade (9,81 m/s}^2\text{).}$$

Nestes cálculos é considerado um movimento retilíneo sem inclinação e influência aerodinâmica.

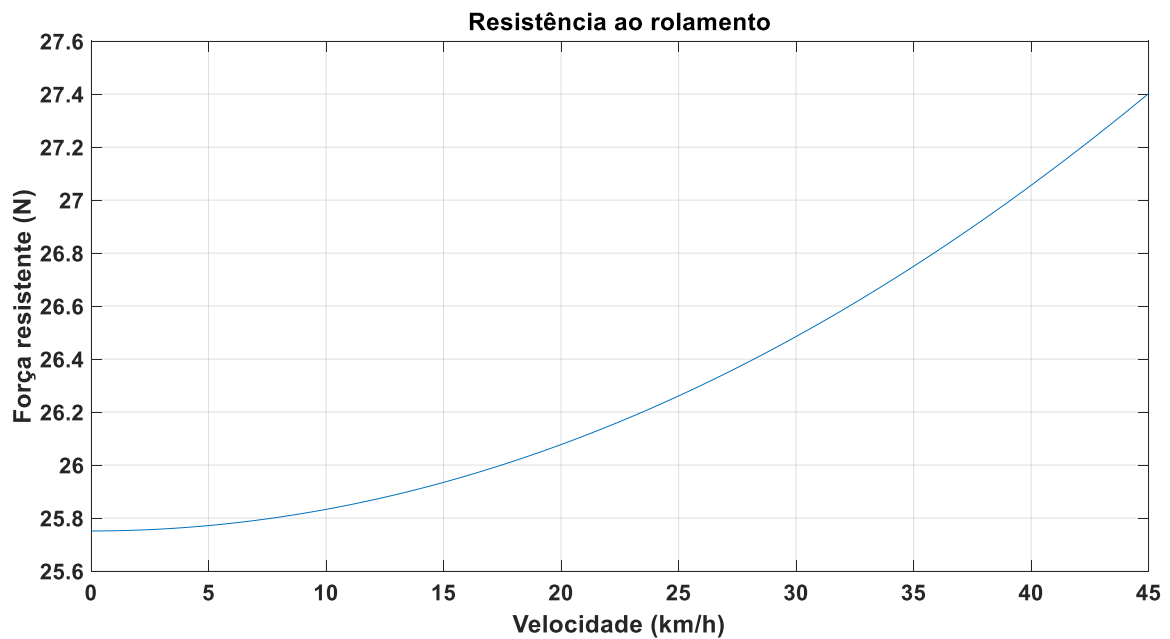


Figura 65- Resistência ao rolamento em função da velocidade.

Não existe um grande aumento da força resistente, como mostra o gráfico da figura 65, é atingido o máximo de **27,4 N** a **45 km/h**. Assim totaliza somente **1,7 N** de diferença, de quando o veículo está imóvel até à sua velocidade máxima. No entanto é uma força de atrito estático de valor considerável, a qual é necessário ultrapassar para iniciar o movimento.

4.1.2 Resistência Aerodinâmica

Utilizando a equação (18) para o cálculo da força resistente aerodinâmica, junto dos dados da tabela 7, é possível determinar a evolução da força de resistência aerodinâmica, como se pode observar pela Figura 66. Após a análise isolada da força resistente aerodinâmica, **25 km/h** é a velocidade em que o veículo se movimenta com maior eficiência e uma velocidade razoável para percorrer pequenas distâncias. A **30 km/h** a força necessária é aproximadamente **1,53 vezes** superior do que a **25 km/h** para uma velocidade apenas **1,2 vezes** superior. É o ponto onde a força resistiva começa a

aumentar muito mais rapidamente que a velocidade, e é muito importante manter o melhor aproveitamento da energia de forma a cobrir uma maior distância, e assim atingir uma grande autonomia.

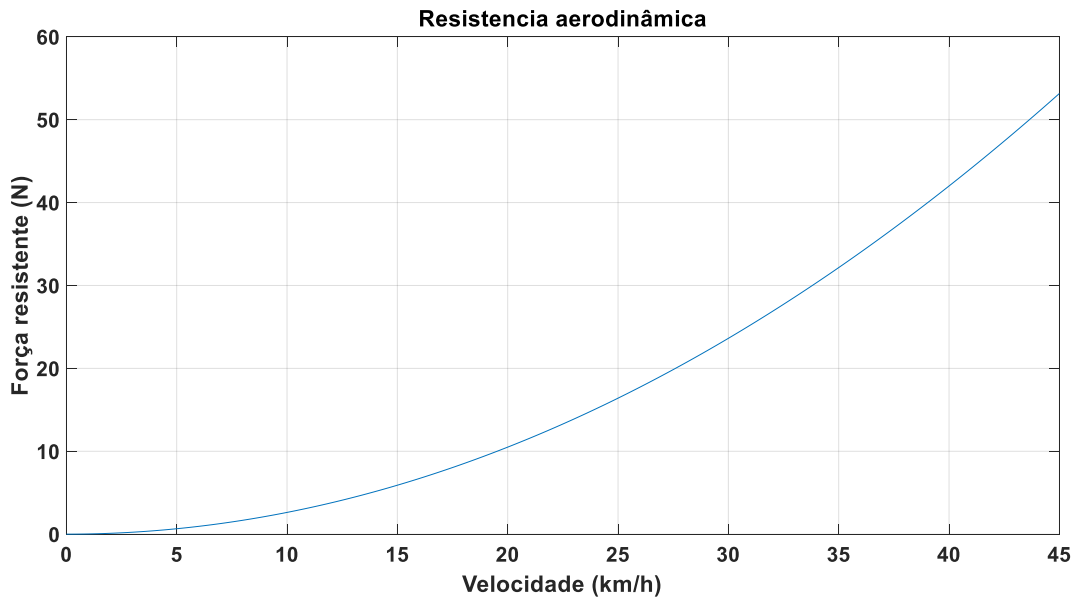


Figura 66- Resistência aerodinâmica em função da velocidade.

4.1.3 Força Resistente Gravítica

Na curva da Figura 67 encontra-se a evolução da força resistente pela ação da gravidade, do veículo projetado. A força resistente ao movimento causada pela inclinação é a mais significativa de todas as outras forças, a partir dos **2%** de inclinação. Sendo as mais habituais inclinações entre **0-5%**, atinge uma força máxima de aproximadamente **180 N**. Assim, sublinha a importância de manter uma massa o mais reduzida possível, de forma a aumentar a eficiência energética e autonomia. O aumento da altitude implica um aumento da energia potencial gravítica, mas a regeneração de um automóvel elétrico ainda é muito limitada, devido à capacidade de absorção de potência por parte das baterias. É estipulado uma inclinação máxima de **15%** visto estar mais adaptado à realidade em Portugal.

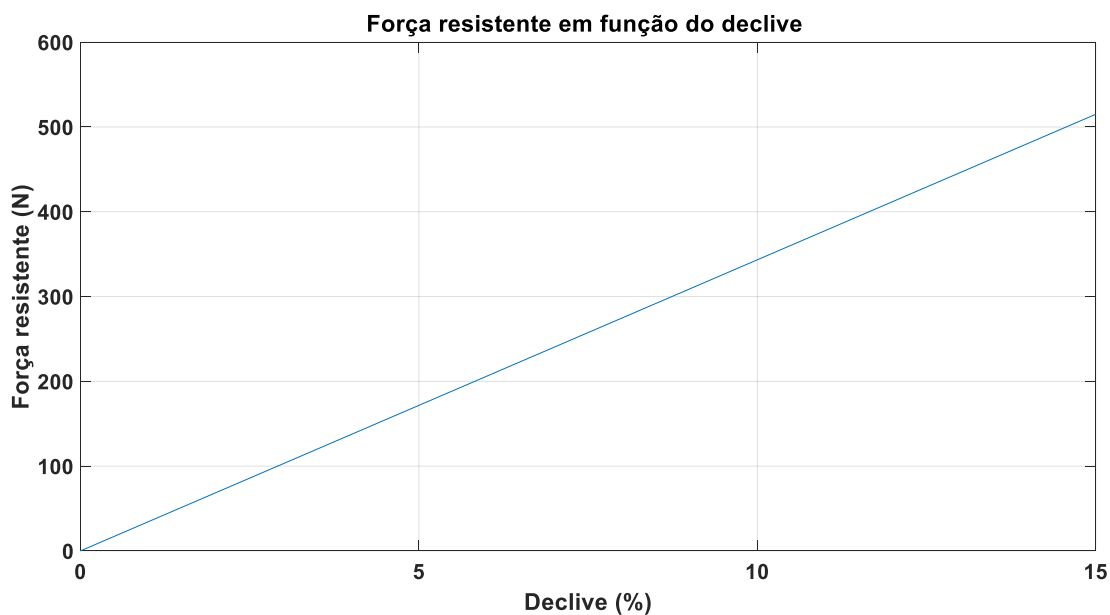


Figura 67- Força resistente gravítica em função do declive.

4.1.4 Resultante das Forças Resistentes

Nas curvas da Figura 68, estão representadas as potências necessárias para igualar a resultante de todas as forças resistentes ao movimento. A força resistente resultante é constituída pela resistência aerodinâmica, resistência ao rolamento e pela ação da força da gravidade quando existe declive no percurso. Para diferentes declives, é de notar a grande diferença de potência necessária entre um percurso sem inclinação e com inclinação. A **25 km/h** sem inclinação (**d=0%**) seriam necessários **250 W** de potência útil para manter a velocidade constante. Por outro lado, se **d= 5%** a potência seria aproximadamente **6 vezes** superior. Ao chegar à última etapa de análise é de concluir que as pequenas dimensões do veículo e a utilização de pneus de bicicleta à correta pressão de enchimento, irá tudo contribuir para um baixo atrito. Sendo o grande influenciador da resistência ao movimento do veículo a sua massa, o impacto é enorme quando é necessário percorrer um percurso com alguma inclinação, é de sublinhar a importância de utilizar materiais o mais leve possíveis desde o chassis, carroçaria, painéis solares e baterias. Só desta forma se pode atingir a maior autonomia possível.

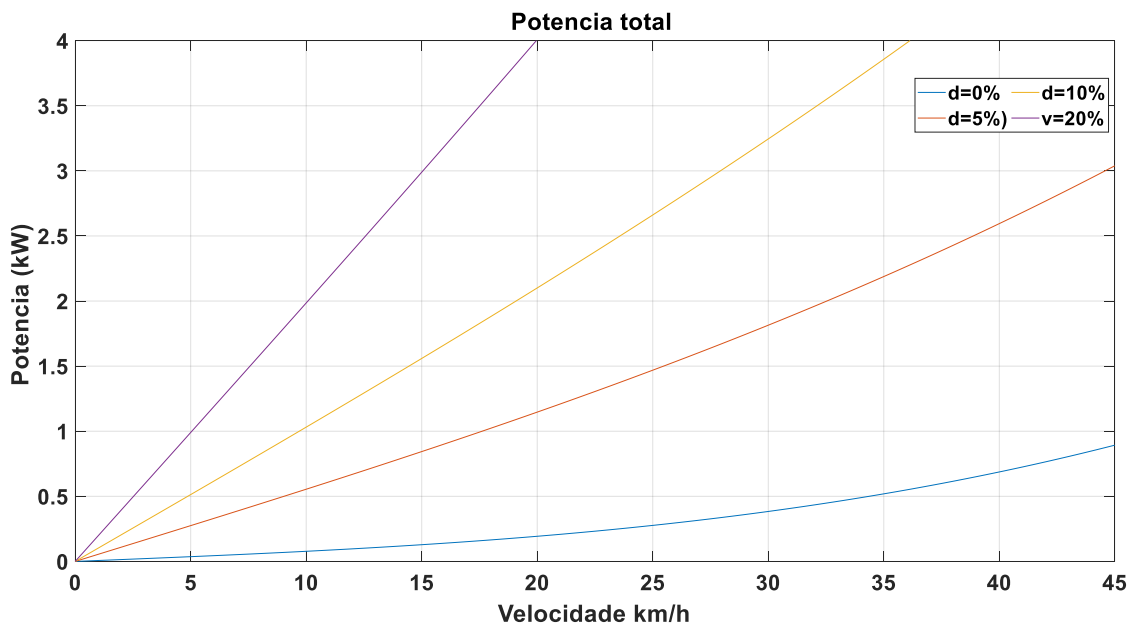


Figura 68- Potência total necessária para o movimento a diferentes declives em função velocidade.

Para o funcionamento do veículo projetado em regime permanente, pode determinar-se a velocidade ótima de circulação. Na curva da Figura 69, observa-se a distância que é possível percorrer por kWh de energia elétrica, em função da velocidade.

A velocidade ótima de circulação encontra-se aproximadamente nos **7,5 km/h**, é possível percorrer uma distância próxima dos **110 km**, mas resulta numa velocidade bastante baixa sem utilidade prática. Porém, para velocidades iguais ou superiores a **25 km/h**, valores de velocidade aceitáveis para uma circulação urbana, são atingidos resultados satisfatórios na distância percorrida. Uma vez que, **1 kWh** representa cerca de **10,3%** da carga da bateria do veículo projetado, é praticável até a sua circulação à velocidade máxima.

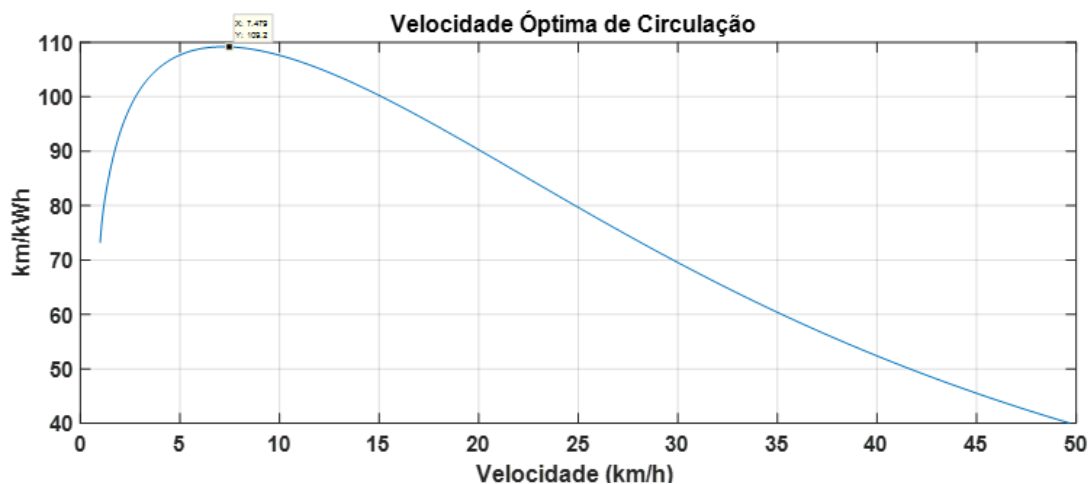


Figura 69- Distância percorrida por kWh em função da velocidade.

4.2 Simulação Fotovoltaica

De forma a que a obtenção dos resultados da simulação de geração fotovoltaica sejam o mais próximos possível à realidade, é necessário utilizar uma divisão em diferentes grupos. Os grupos de painéis irão ser os mesmos dos que estão representados na Figura 63. A aproximação do posicionamento dos painéis fotovoltaicos é feita como está ilustrado na Figura 70, é desprezada a curvatura que o painel flexível efetua na realidade. A parte frontal do veículo está posicionada à esquerda da figura por dois painéis com uma ligeira inclinação, o veículo está direcionado para Oeste. Foi escolhido Oeste, devido a ser uma das direções mais comuns de circulação das estradas do Algarve. Efetivamente, no Algarve circula-se para Oeste ou Este predominantemente.



Figura 70- Disposição dos painéis fotovoltaicos para simulação.

A disposição detalhada de cada grupo de painéis está na Tabela 8. O azimute, ou orientação, é o ângulo dos módulos fotovoltaicos relativo à direção de sul. -90° é direção Este, 0° é sul e 90° é Oeste. A inclinação é o ângulo que o painel faz com a superfície horizontal do solo.

Tabela 8- Posicionamento dos grupos de painéis fotovoltaicos			
Grupo	Potência	Inclinação	Azimute
Grupo 1- Frente	216 W	10°	90°
Grupo 2- Tejadilho	320 W	0°	90°
Grupo 3- Traseira	144 W	20°	-90°
Grupo 4- Lado esquerdo	144 W	90°	0°
Grupo 4- Lado direito	144W	90°	180°

Para a concretização da simulação é utilizada a ferramenta PVGIS [12], que consiste numa base de dados mundial da radiação solar que atinge a superfície terrestre ao longo do ano, e permite também um cálculo fiável da geração fotovoltaica num determinado local. Através desta ferramenta, o sistema desde o painel fotovoltaico à bateria do carro elétrico em estudo, pode ser simulado como um sistema off-grid. Sendo o veículo um objeto móvel, é necessário escolher a sua localização para efeitos de simulação, o qual se situará na EN-125 perto de Albufeira.

4.3 Simulação Dinâmica do Veículo Elétrico

O Simulador é constituído por vários componentes como é visível na Figura 71. À esquerda o controlador de velocidade seguido do Motor BLDC, Transmissão, Ciclo de condução, Rodas e Aerodinâmica. Do motor até às rodas existe uma interação bidirecional para a conversão de binários e velocidades que são necessárias para cálculo e monitorização do veículo, para isso é necessária a disponibilidade de todos os dados tanto em relação ao veio do motor como à superfície da roda. O bloco para o ciclo de condução pertence à biblioteca do simulink.

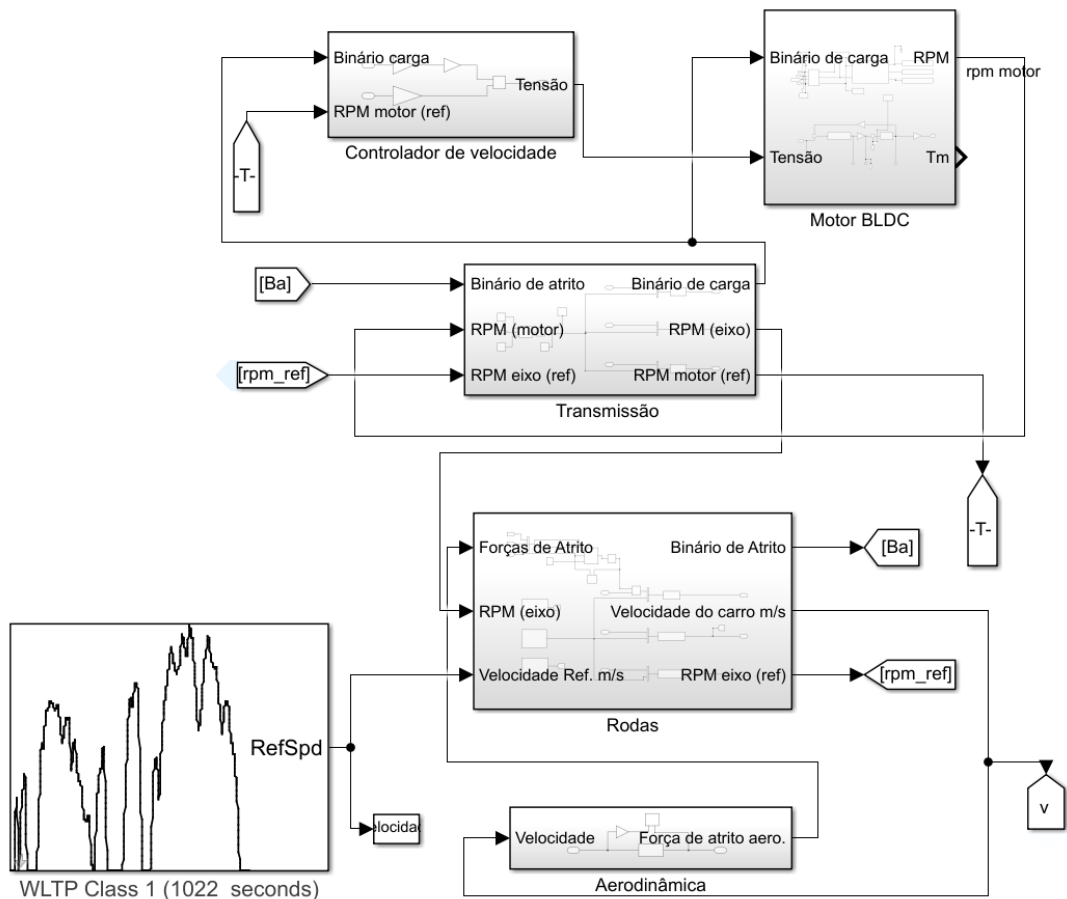


Figura 71- Constituição do simulador do veículo.

4.3.1 Rodas

O início e também o final dos cálculos culmina com um bloco designado por “rodas” como está representado na Figura 72. Este bloco representa o modelo das rodas do carro. Tem como primeira entrada as forças de atrito aerodinâmico. No seu interior é calculado a resistência ao rolamento, é feita a conversão das forças de atrito total da roda para o eixo (Binário de atrito), assim como da velocidade de rotação do eixo. Para as rodas, dependendo do seu raio, sabe-se a velocidade do veículo para uma dada velocidade de rotação do seu eixo. Dada uma velocidade de referência de deslocamento, é efetuada uma conversão ao contrário da referida anteriormente. Isto é, da velocidade do carro para a velocidade do eixo. Devido á baixa velocidade de circulação do veículo, pode considerar-se que o escorregamento do pneu para com o pavimento é nulo.

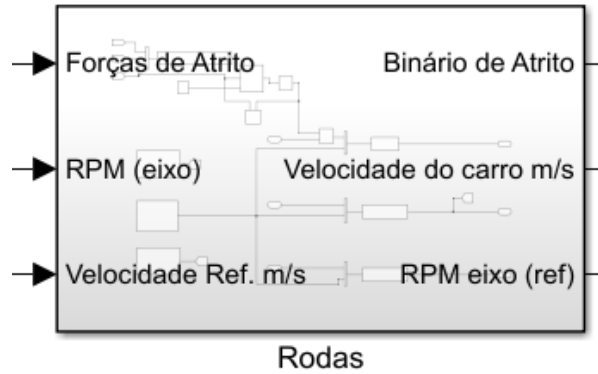


Figura 72-Bloco de simulação das rodas.

Dentro do bloco “Rodas” é possível alterar três características do veículo: a sua massa; a pressão dos pneus; e o raio da roda. Todas estas são variáveis que irão afetar o desempenho do carro. A resistência ao rolamento é inserida nos cálculos somente quando a velocidade for ligeiramente maior que zero, de modo a simular o atrito estático. A função principal é a conversão de binários e velocidades do eixo para a superfície do pneu e vice-versa. A sua composição pode ser observada na Figura 73.

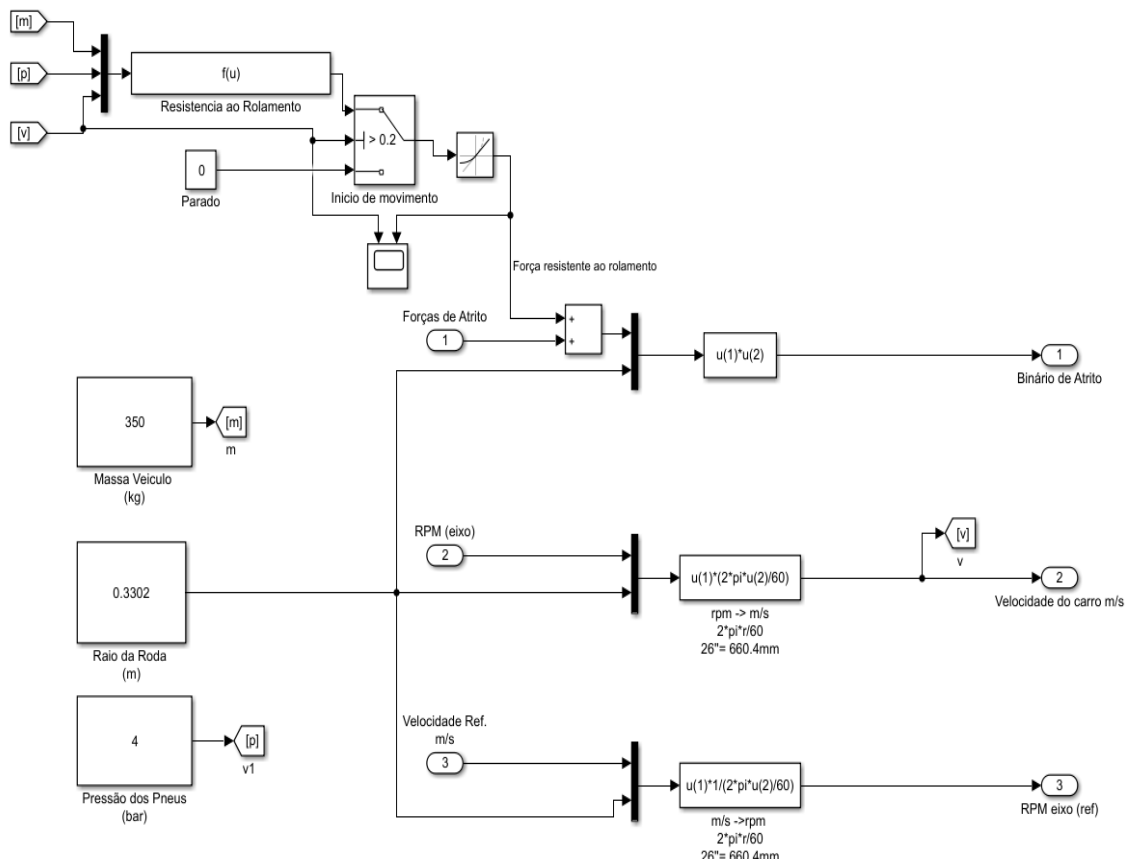


Figura 73- Simulação das Rodas.

Os cálculos de conversão efetuados neste bloco estão expressos nas equações (51), (52) e (53):

$$T_{re} = (F_{rol} + F_{ar} + F_g)r \quad (51)$$

Onde:

T_{re} é o binário resistente aplicado no eixo do veículo;

r o raio da roda.

São somadas e convertidas as forças resistentes ao movimento num binário aplicado no eixo de tração do veículo, este binário resistente segue para a transmissão mecânica.

$$ne_{ref} = \frac{v_{ref}}{2\pi r} 60 \quad (52)$$

Onde:

ne_{ref} , é o valor de referência em rotações por minuto do eixo;

v_{ref} o valor de referência da velocidade deslocamento do veículo.

É efetuada a conversão da velocidade de deslocamento de referência do veículo, para r.p.m. (rotações por minuto) do eixo. Este valor de referência segue para o bloco da transmissão mecânica. O oposto ocorre com o valor real de rotação do eixo ne , que é convertido para a velocidade de deslocamento real do veículo v .

$$v = ne \frac{2\pi r}{60} \quad (53)$$

Onde:

ne , valor em r.p.m. do eixo.

4.3.2 Transmissão

A transmissão é responsável pelo fornecimento da potência mecânica entre o motor e o eixo das rodas motoras. A potência mecânica ao veio do motor elétrico é transmitida ao eixo de tração através de duas rodas dentadas com uma relação de transmissão com o valor de **7**, é neste bloco que é realizada essa conversão de velocidades e binário. Com este valor o veículo pode deslocar-se eficientemente. Para o qual através da análise das forças de atrito com inclinação, não ultrapassa o valor de potência nominal do motor, com inclinações com valor de até perto de **10%**. Assim, quando é necessário efetuar subidas acentuadas com inclinação ou para o arranque esta relação de transmissão é bastante satisfatória, garantindo também o normal funcionamento do motor sem a ocorrência de grandes correntes de sobrecarga.

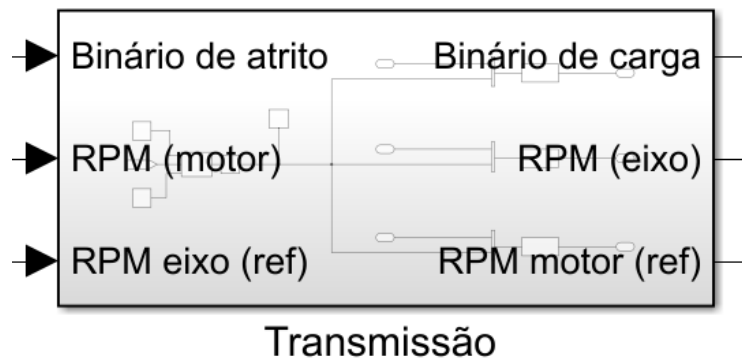


Figura 74-Bloco de simulação da transmissão.

Através de (13) são feitas as conversões necessárias neste bloco, aplicando o rendimento de **0,98** de uma transmissão por corrente no binário resistente. As conversões do binário resistente e velocidade de referência do eixo em r.p.m., são efetuadas do eixo para o veio do motor. De forma inversa é convertida a velocidade do motor em r.p.m. para o eixo de tração. O binário resistente é assim convertido para o binário de carga T_L , do modelo matemático do motor de corrente contínua, como está ilustrado na Figura 43.

A conversão de velocidade do motor para o eixo é efetuada a partir de (54).

$$n_e = \frac{n}{7} \quad (54)$$

Onde:

n é a velocidade em r.p.m. do veio do motor.

A conversão de velocidade referencia do eixo para o veio do motor é efetuada a partir de (55).

$$n_{ref} = 7 n e_{ref} \quad (55)$$

Onde:

n_{ref} é a velocidade de referência em r.p.m. do veio do motor.

A passagem do binário resistente no eixo de transmissão para o binário de carga no veio do motor, é feita através da equação (56).

$$T_L = \frac{T_{re}}{0,98} \frac{1}{7} \quad (56)$$

4.3.3 Motor Elétrico

O bloco central da simulação do veículo elétrico é o motor elétrico. É utilizado um motor brushless de magnetos permanentes. Este modelo matemático possui como entradas o binário de carga e a tensão de alimentação, como está representado na Figura 75. A partir do modelo matemático dinâmico do motor, da Figura 43, todo o binário de carga resultante das forças resistentes ao movimento vai ser refletido até ao veio do motor, assim como o momento de inércia equivalente de todo o veículo.

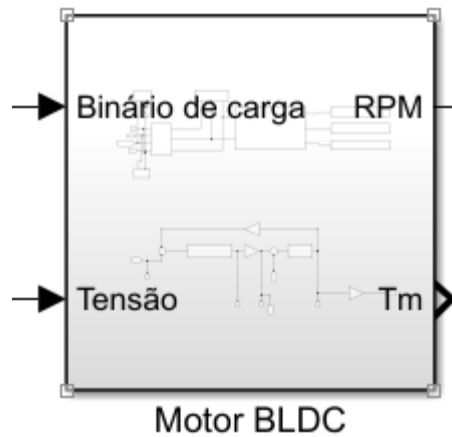


Figura 75- Bloco de simulação do motor.

São determinados os parâmetros do modelo matemático do motor escolhido, através das especificações técnicas fornecidas pelo fabricante na Tabela 6. Sabe-se que o potencial elétrico é de **10 V/ 1000 r.p.m.**, assim, através de (26) obtém-se:

$$k\phi = \frac{E}{\omega} = \frac{10 \cdot 60}{2\pi \cdot 1000} = \mathbf{0,0955 \text{ V/rad} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Sabendo o valor de $k\phi$ do motor, é possível determinar o valor da f.e.m. à velocidade nominal de **2000 r.p.m.**

$$E = k\phi \cdot \omega = 0,0955 \cdot \frac{2000 \cdot 2\pi}{60} = \mathbf{20 \text{ V}}$$

Assim, a partir da equação (23) é determinado o valor de R_a , considerando os valores nominais de tensão e corrente.

$$R_a = \frac{U - E}{I_a} = \frac{24 - 20}{102,7} = \mathbf{38,95 \text{ m}\Omega}$$

O momento de inércia equivalente do veículo no veio do motor J_c , é calculado a partir de (57):

$$J_c = m \cdot \left(\frac{r}{k_r}\right)^2 + J_m \quad (57)$$

Onde:

k_r é a razão de transmissão

J_m o momento de inércia do rotor

Substituindo os valores obtém-se:

$$J_c = 350 \cdot \left(\frac{0,330}{7}\right)^2 + 21,4 \cdot 10^{-4} = \mathbf{0,779 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}$$

Sendo que, todos os parâmetros necessários para a simulação do veículo projetado estão calculados, encontram-se determinados todos os parâmetros do modelo dinâmico deste veículo.

4.4 Autonomia com o Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure

4.4.1 Sem Geração de Energia

Para o melhor enquadramento do automóvel projetado com a realidade, irá ser submetido ao teste de veículos classe 1 WLTP. O WLTP será simulado no Simulink-Matlab. Este teste de referência mundial proporciona, atualmente, os melhores resultados comparativamente com o desempenho e consumo no dia-a-dia de um condutor. O veículo irá estar submetido à simulação de percursos urbanos em que existem acelerações, travagens e paragens a baixa e média velocidade, e também a percursos extraurbanos de maior velocidade. Neste caso, irá ser testado como um carro elétrico normal em que a única fonte de energia é a carga completa das baterias instaladas.

Percorrendo no total uma distância de **8,09 km** foi despendido **215 Wh** de energia, o que irá determinar os valores dos resultados do teste WLTP de autonomia e consumo médio que estão na Tabela 9.

Tabela 9- Resultados da simulação WLTP Classe I	
Autonomia	347 km
Consumo Médio	2,657 kWh/100 km

4.4.2 Com Geração Fotovoltaica

Considerando que o automóvel está em locais sem obstrução da luz solar, irá gerar energia e acumulá-la nas baterias. Os valores médios diários de cada mês do ano estão no gráfico da Figura 76. Com estes valores de energia obtidos facilmente, sem necessidade da imobilização do automóvel para carregamento através da rede elétrica, irá ser possível percorrer uma distância razoável diariamente só através da energia gerada.

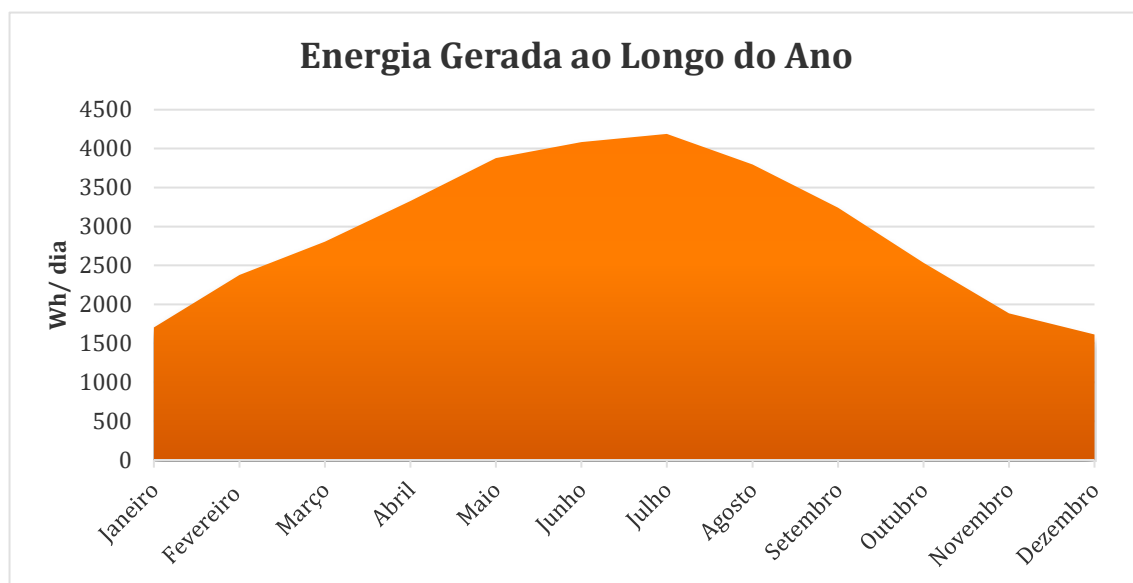


Figura 76- Energia média diária de geração fotovoltaica no veículo.

Baseado nos resultados do teste WLTP e a energia que pode ser gerada pelo automóvel projetado, irá ser possível determinar a autonomia diária que o veículo pode percorrer. Dentro de estes valores de autonomia da Figura 77, o veículo possui a capacidade de regenerar através da geração fotovoltaica a energia despendida. No final é totalizado **47866 km** que podem ser feitos por ano somente através da energia do sol.

Considerando que em média os condutores fazem **20 000 km** anuais, grande parte do ano até haveria excesso de energia produzida, só seria necessária ligação à rede elétrica nos meses de inverno.

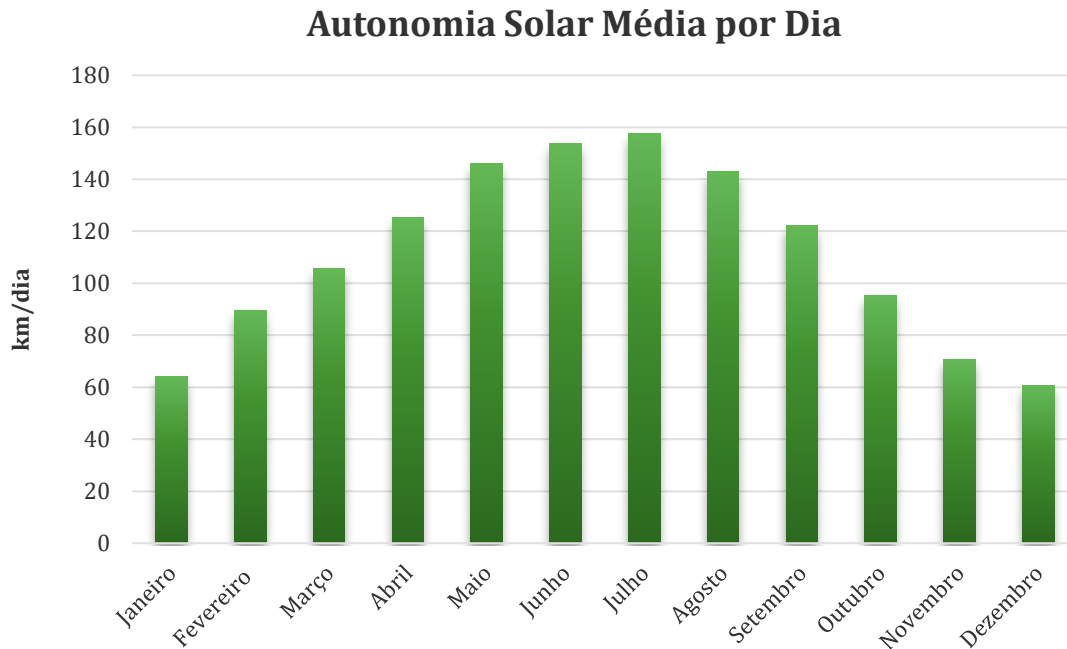


Figura 77- Autonomia média diária utilizando exclusivamente a energia fotovoltaica gerada.

4.5 Autonomia Infinita

Vai ser analisada a performance do carro para os valores de velocidade em que é possível circular sem interrupção, indefinidamente. Sem qualquer paragem para recarregar as baterias recorrendo à rede elétrica, a energia absorvida irá estar na totalidade dependente da capacidade de geração fotovoltaica. Para o cálculo do gasto de energia diário é utilizado o simulador dinâmico do veículo construído no Simulink-Matlab.

Os resultados seguintes têm grande dependência no fornecimento da energia solar, a base de dados do PVGIS já funciona há mais de 10 anos e é atualizada periodicamente, utiliza métodos de cálculo de geração fotovoltaica bastante precisos e fiáveis. Os valores de energia gerada apresentados já têm em consideração todas as perdas

desde o painel fotovoltaico à bateria, e é considerado em condições ideais de circulação, sem inclinação e ausência de vento.

4.5.1 De Junho a Agosto

É até aos **20 km/h** de velocidade de cruzeiro que começa a ser possível efetuar a circulação com autonomia infinita na época de verão, de Maio a Agosto, porém em Julho é o único mês em que é possível o movimento a **21 km/h**. Entre Junho e Agosto a bateria é na grande parte dos dias recarregada na totalidade, e quando não o é irá sempre estar nas condições de fornecer a energia necessária ao movimento do veículo sem qualquer paragem. É garantido que dentro deste período nunca vai atingir a descarga completa. Em Maio poderá haver até 3 dias do mês (**11%**) em que a circulação tenha que ser interrompida por algumas horas, devido à possibilidade de descarga da bateria. O consumo de energia a cada 24 horas será de aproximadamente **4000 Wh**, o estado de carga da bateria no decorrer da simulação está no gráfico da Figura 78.

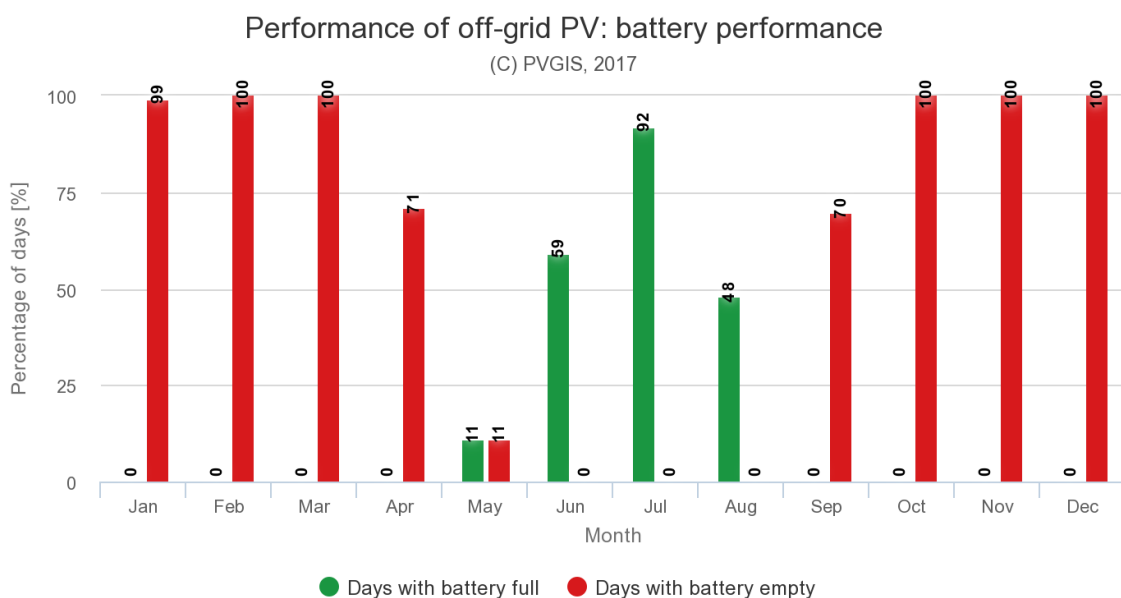


Figura 78- Estado de carga na bateria para 20 km/h.

4.5.2 De Abril a Setembro

Efetuando um decréscimo de **25%** na velocidade inicial de 20 km/h é possível efetuar uma poupança de energia de **33,5%**, o que torna possível garantir a circulação contínua em seis meses do ano como está visível no gráfico da Figura 79. Nos meses de Abril e Setembro onde antes não era praticável um movimento contínuo, depois da redução na velocidade, já é assegurada a circulação ininterrupta. Porém, o gasto de energia de **3180 Wh** a cada 24 horas, é ainda elevado com o que se pode esperar em geração fotovoltaica nos meses de Março e Outubro. Em **20%** dos dias, cerca de 6 dias, a deslocação do automóvel é forçada a ser interrompida por descarga completa das baterias, sendo necessária uma nova redução no consumo para alargar o alcance do carro ao longo do ano.

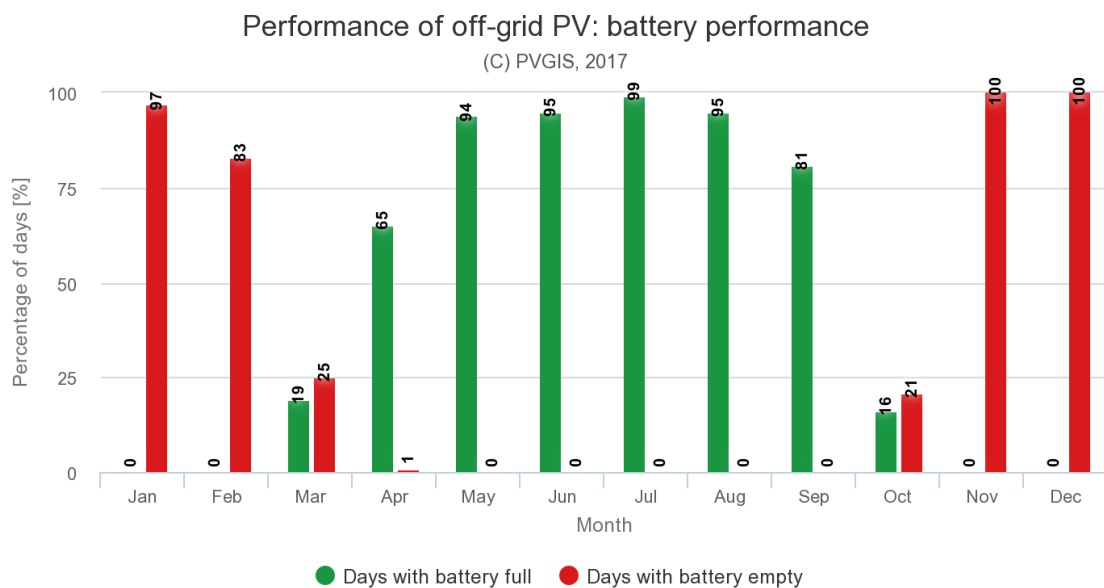


Figura 79- Estado de carga na bateria para 15 km/h.

4.5.3 De Fevereiro a Novembro

Após uma nova redução no consumo de energia despendida diariamente, em cerca de **39%**, o que implicou uma diminuição na velocidade em **5 km/h**, aproximadamente **33,33%**, possibilitou estar muito próximo de atingir todos os meses do ano. Mas, o veículo ainda é forçado a parar aproximadamente **40%** dos dias nos meses de Janeiro e Dezembro, como está no gráfico da Figura 80. Mesmo com uma velocidade já relativamente baixa e um consumo diário de **1937 Wh**. A curta duração das horas de sol no dia, junto com uma menor intensidade da radiação solar e maior probabilidade de ocorrência de condições meteorológicas que obstruem a luz solar. O conjunto destas adversidades vai dificultar a missão do carro elétrico de gerar e armazenar energia suficiente, necessária não só para o movimento nas horas de sol, mas também a sua continuidade nas noites longas de inverno.

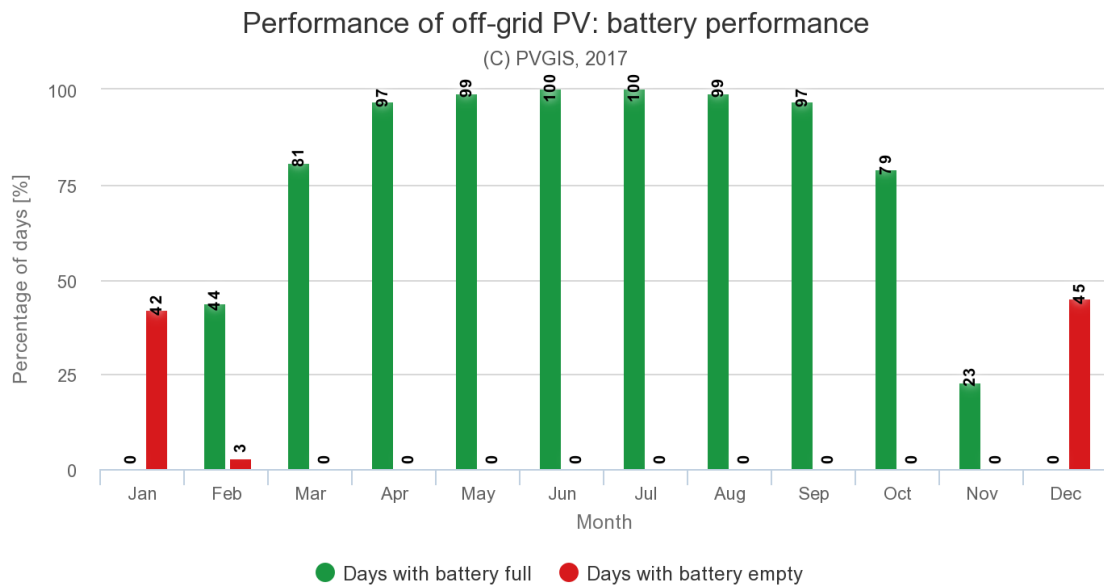


Figura 80- Estado de carga na bateria para 10 km/h.

4.5.4 Movimento ao Longo do Ano

Com uma ligeira descida na velocidade de deslocamento do carro elétrico é finalmente possível atingir autonomia infinita o ano inteiro. O consumo diário do veículo situa-se nos **1577 Wh**.

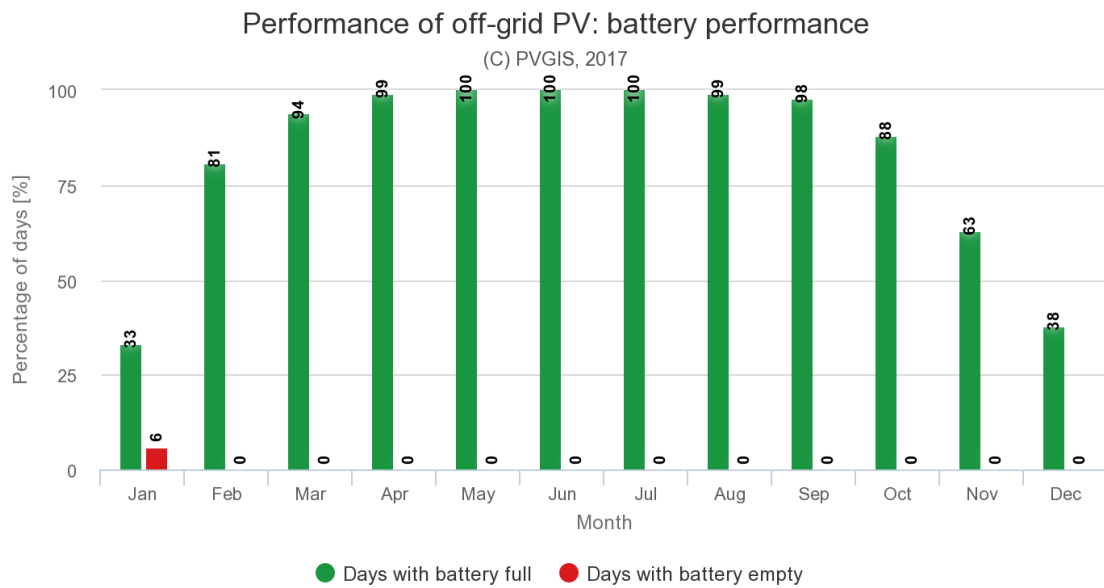


Figura 81- Estado de carga na bateria para 10 km/h.

Ao concluir as simulações, é possível determinar as condições que possam garantir a circulação do carro sem qualquer paragem todos os dias do ano. No gráfico da Figura 82, está o perfil de velocidade que viabiliza juntamente com um movimento ilimitado, percorrer a maior distância possível. A velocidade é adaptada para aproveitar ao máximo as diferenças de energia que é fornecida pelo sol e convertida pelos painéis fotovoltaicos [8]. Nos meses de maior geração a velocidade é maior e nos meses de inverno a velocidade diminui, deste modo o consumo de energia irá estar sempre o mais próximo da energia gerada.

Velocidade para Autonomia Infinita

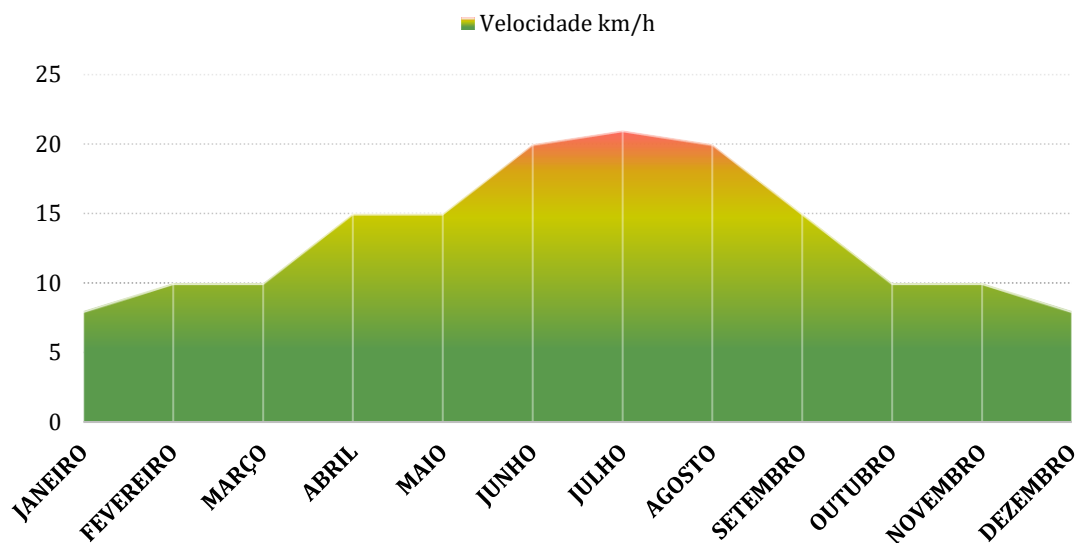


Figura 82- Velocidade ao longo do ano para autonomia infinita.

A velocidade de movimento do veículo dentro destas condições, irá ser sempre relativamente lenta, ao longo do ano irá tomar valores entre os **21 km/h** e **8 km/h**. Como se trata de um movimento de **24h** sem qualquer interrupção o ano inteiro, é compreensível que irá percorrer uma distância considerável. No gráfico da Figura 83, está a distância diária percorrida em cada mês do ano. Valores que vão desde os **192 km** nos dias de Janeiro e Dezembro, a **504 km** por dia no mês de Julho. São distâncias bastante satisfatórias considerando apenas o uso da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos. No final do ano irá totalizar uma distância de aproximadamente **118 368 km**, sem paragens ou qualquer outra fonte de energia externa. Se não existisse desgaste dos componentes, poderia dizer-se que este carro elétrico iria continuar ano após ano a sua viagem sem fim.

Distância Percorrida em 24h

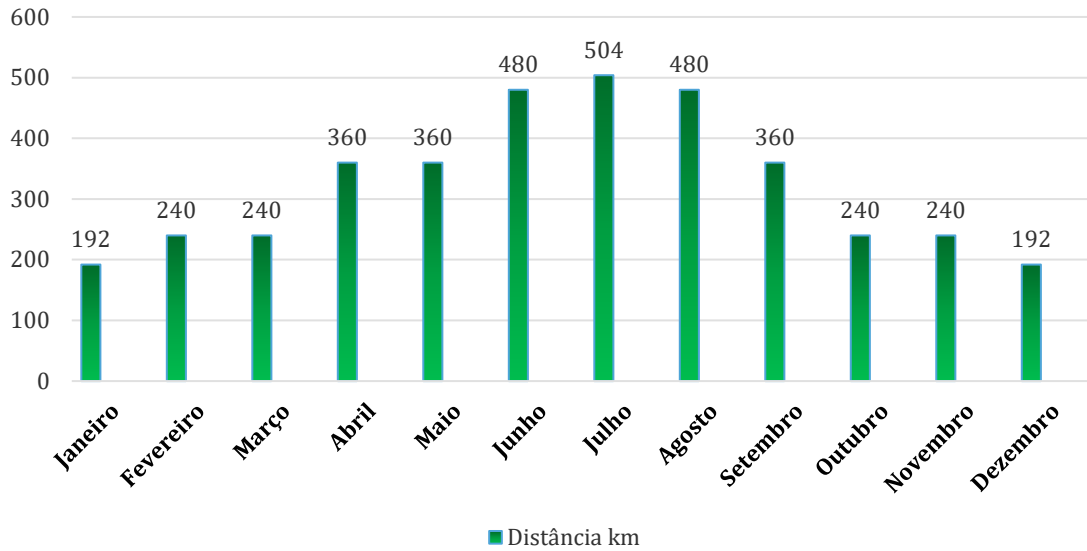


Figura 83- Distância diária percorrida ao longo do ano exclusivamente com energia fotovoltaica.

4.6 Travessia do Algarve

De forma a obter resultados mais próximos da utilização do veículo no Algarve, é efetuada a simulação de uma travessia pela região. Com partida em Vila Real de Santo António e como destino final, a vila de Sagres (Figura 84). Este percurso tem como principais objetivos entender melhor o impacto que as diferentes inclinações e a circulação numa estrada real, têm no desempenho do veículo.

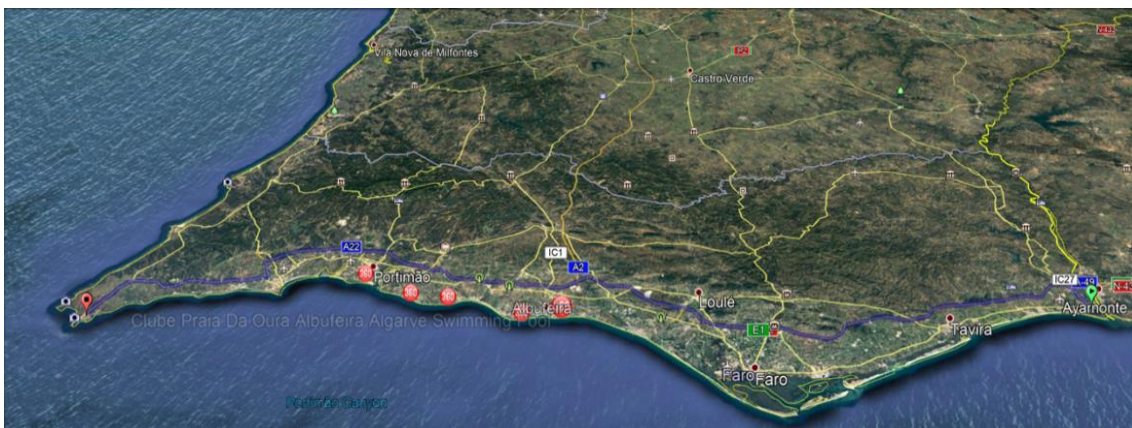


Figura 84- Percurso Sagres- Vila Real de Santo António.

A distância a percorrer é de aproximadamente **165 km**, todo este percurso tem um perfil de inclinações extraído com recurso ao software *Google Earth*, que está representado na Figura 85. A partir destes dados é possível a sua utilização como entrada no simulador do veículo, e assim, simular um percurso bastante próximo ao real.

A regeneração de energia elétrica que ocorre naturalmente num veículo elétrico, quando está a circular em desaceleração ou com declive negativo, ou seja, numa descida, está excluído dos resultados. A velocidade do vento é considerada nula, devido à predominância dos ventos na região ter direção Sudeste ou Noroeste, o que provocará na maioria ventos laterais desprezáveis.

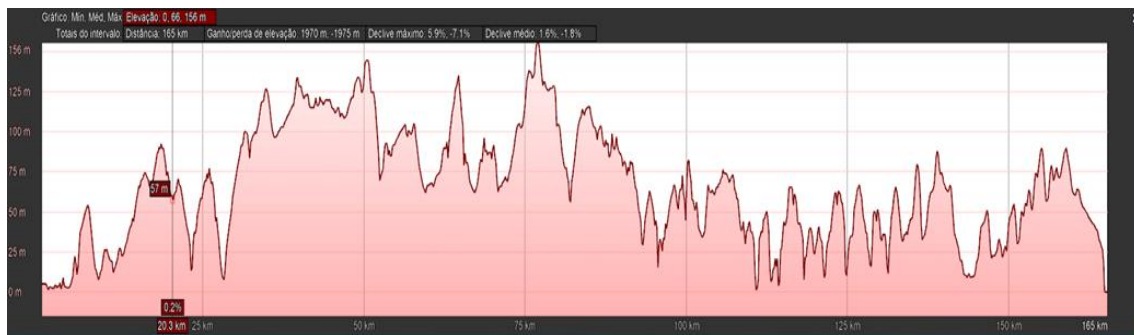


Figura 85- Perfil de inclinações do percurso

A energia despendida após a conclusão do percurso é de aproximadamente **4 kWh**. Para uma distância de 165 km e uma velocidade de **45 km/h** o consumo de energia médio consumido pelo veículo é de **2,42 kWh**. Valor este, ligeiramente menor que o resultante do teste WLTP.

Sendo esta viagem realizada entre os meses de Junho e Agosto, a energia consumida pode ser na totalidade gerada e armazenada pelo veículo. O que irá proporcionar um balanço nulo da energia despendida, se for considerado a não necessidade de uma fonte de energia externa.

5 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Neste trabalho projetou-se um veículo alimentado com geração fotovoltaica. Não foi feita uma abordagem detalhada dos vários constituintes do veículo. O objetivo deste projeto foi o estudo do funcionamento de um automóvel que tenha a possibilidade de atingir uma autonomia infinita (Autonomia infinita significa que a geração fotovoltaica é suficiente para o movimento do veículo e para carregar as baterias a serem utilizadas nos momentos em que não há sol, à noite).

O desempenho do automóvel projetado, foi bastante satisfatório em todas as situações a que foi sujeito em simulação. Proporciona a possibilidade de circulação com total independência energética, em vários cenários na região do Algarve. Até, pode existir a opção de ser utilizado como gerador fotovoltaico, quando a bateria está carregada, contribuindo para o fornecimento de energia elétrica. Assim, este veículo satisfaz as necessidades do condutor comum, no meio urbano e suburbano típico da região.

Existe uma interceção entre o período de maior afluência turística da região e de maior geração fotovoltaica, nos meses de verão. Portanto, este veículo com a capacidade de atravessar à sua velocidade máxima, toda a zona costeira a sul com um balanço energético nulo, segundo os resultados da simulação para um dia de verão. Prova-se bastante útil para uma livre circulação na via pública, dentro das condições normais de utilização, não necessita de parar para ser abastecido.

Como trabalho futuro, propõe-se o projeto de um protótipo onde se possa, na realidade, comprovar o conceito apresentado.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1]- Kwai-Cheung Chan, Director for Program Evaluation in Physical Systems Areas “*Electric Vehicles: Likely Consequences of U.S. and Other Nations' Programs and Policies*” 30 de Dezembro de 1994, United States General Accounting Office, Washington D.C.
- [2] - Decreto de lei nº 265-A/2001 de 28 de setembro
- [3] - <https://wltpfacts.eu/>, visitado em Dezembro de 2018
- [4] - https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_vehicle, visitado em Novembro de 2018.
- [5] - <https://csr.honda.com/environment/renewable-energy/>, visitado em Novembro de 2018
- [6] - <https://solarteameindhoven.nl/stella-vie/stella-lux/>, visitado em Novembro de 2018
- [7] - <https://www.hyundai.news/eu/> , visitado em janeiro de 2019
- [8] – Solar Fuels and Artificial Photosynthesis. Royal Society of Chemistry 2012 <http://www.rsc.org/ScienceAndTechnology/Policy/Documents/solar-fuels.asp> , visitado em Janeiro de 2019
- [9]- <https://physics.info/photoelectric/> visitado em Janeiro de 2019
- [10] - <https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/solar-cell2.html>, visitado em Janeiro de 2019
- [11]- <https://www.fondriest.com/environmentalmeasurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation>, visitado em Janeiro de 2019
- [12] - http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP, PVGIS base de dados de energia fotovoltaica
- [13]- <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels>, visitado em Abril de 2019

- [14]- Ranabhat, K., et all, (2016) “*An Introduction to Solar Cell Technology*”, Journal of Applied Engineering Science, Vol. 14, pp. 481-491;
- [15]- Askari Mohammad Bagher, Mirzaei Mahmoud Abadi Vahid, Mirhabibi Mohsen. “*Types of Solar Cells and Application*”. American Journal of Optics and Photonics. Vol. 3, No. 5, 2015, pp. 94-113. doi: 10.11648/j.ajop.20150305.17
- [16]- Vivek Tamrakar, S.C. Gupta and Yashwant Sawle, “*Single-Diode Pv Cell Modeling And Study Of Characteristics Of Single And Two-Diode Equivalent Circuit*” , Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ) Vol 4, No 3, August 2015, Department of Electrical Engineering, M.A.N.I.T. Bhopal, Madhya Pradesh, India
- [17]- Amine, ATTOU. (2014). “*Photovoltaic Power Control Using MPPT and Boost Converter*”. Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering. SSN: 2147-284X.
- [18]- Pereira R., Melício R., Mendes V., Joyce A., (2014) “*PV System with Maximum Power Point Tracking: Modeling, Simulation and Experimental Results*”, ELSEVIER, Procedia Technology 17, pp. 495-501
- [19] - Aléxio Filipe Braga Chaves,(2018), “*Simulação Generalizada de Sistemas Eólicos e Solares*”, Projeto para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e Eletrónica, Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve
- [20]- https://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries, visitado em Maio de 2019
- [21]- Kyeung-cheol Bae, Seong-chon Choi, Ji-hwan Kim, Chung-yuen Won, Yong-chaeh Jung, “*LiFePO4 dynamic battery modeling for battery simulator*” South Korea, 2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)
- [22]- Borong Wu, Yonghuan Ren and Ning Li, “*LiFePO4 Cathode Material*” School of Chemical Engineering and Environment, Beijing Institute of Technology China
- [23]- <https://evwest.com/support/Voltronix%20180Ah%20Battery%20Cell.pdf>, visitado em Janeiro de 2019
- [24] - Prof. Dr. Carlos Cabral, “*Fundamentos de Máquinas Eléctricas de Corrente Alternada*”, Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve
- [25] - Prof. Dr. Carlos Cabral, “*Fundamentos de Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua*”, Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve

- [26] - <https://www.motioncontrol.com/motors/dc-motor/>, visitado em março de 2019
- [27]-<https://www.renesas.com/eu/en/support/technical-resources/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview.html>, visitado em março de 2019
- [28] - Flores, Paulo & Gomes, J & Dourado, Nuno & Marques, Filipe. (2017). Sistemas de Transmissão de Movimento. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Mecânica
- [29]- <http://old.digitaleng.news/de/leading-the-way-in-aerodynamic-design/>, visitado em Outubro 2018
- [30]- https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_equation, visitado em Outubro 2018.
- [31]- users.isr.ist.utl.pt/~alex/micd0506/motordc, visitado em Fevereiro 2019.
- [32]- <https://evwest.com/support/Voltronix%20180Ah%20Battery%20Cell.pdf>, visitado em Novembro de 2018.
- [33]- Y. Jiang, J. A. A. Qahouq, "*Evaluation of output current PV MPPT controller with different step sizes and multiple panels or cells*" 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, 2012, pp. 1872-1876

7 ANEXOS

7.1 Anexo A

Orçamento

	Produto:	Quantidade:	Preço por uni.	Preço total:
Painéis Solares				
	Painel SR 72Q	6	468 €	2 808 €
	Painel SR 108L	2	725 €	1 450 €
	Painel SR 160 L	2	1 060 €	2 120 €
Baterias				
	Bateria Voltronix V-LYP180Ah	15	215 €	3 225 €
Motor				
	BLDC 2kW Motor	1	650 €	650 €
	Controlador ATOTH-G	1	570 €	570 €
Carroçaria				
	Tubo Alumínio	8	60 €	480 €
	Veio Alumínio	1,4	85 €	119 €
Diversos				
	Montagem e Diversos	1	1 500 €	
	Total			11 422 €

7.2 Anexo B

	SR 160 L	SR 160 Q	SR 144	SR 108	SR 72 L	SR 72 Q	SR 62
Maximum power [W]	160	160	144	108	72	72	62
Length Y [mm]	1523	1046	1364	1046	1364	728	1205
Width X [mm]	683	996	683	683	365	683	365
Thickness [mm]	2	2	2	2	2	2	2
Weight [kg]	2.40	2.40	2.10	1.70	1.20	1.20	1.10
Max power Voltage V_{mp} [V]	18.6	18.6	16.7	12.6	8.4	8.4	7.2
Max power Current I_{mp} [A]	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
Open circuit voltage V_{oc} [V]	23.0	23.0	20.4	15.3	10.2	10.2	8.9
Short circuit current I_{sc} [A]	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
NOCT [°C]	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2	45 ± 2
Operating temperature [°C]	-40/+85	-40/+85	-40/+85	-40/+85	-40/+85	-40/+85	-40/+85
Temp. coeff. P_{max} [%/°C]	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38
Temp. coeff. V_{oc} [%/°C]	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27
Temp. coeff. I_{sc} [%/°C]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Columns x Rows (cells n°)	4x9 (36)	6x6 (36)	4x8 (32)	4x6 (24)	2x8 (16)	4x4 (16)	2x7 (14)
Maximum system voltage [V]	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V	1000 V
Maximum reverse current [A]	12 A	12 A	12 A	12 A	12 A	12 A	12 A
Safety class	A	A	A	A	A	A	A

Figura 1 – Tabela de especificações dos painéis fotovoltaicos

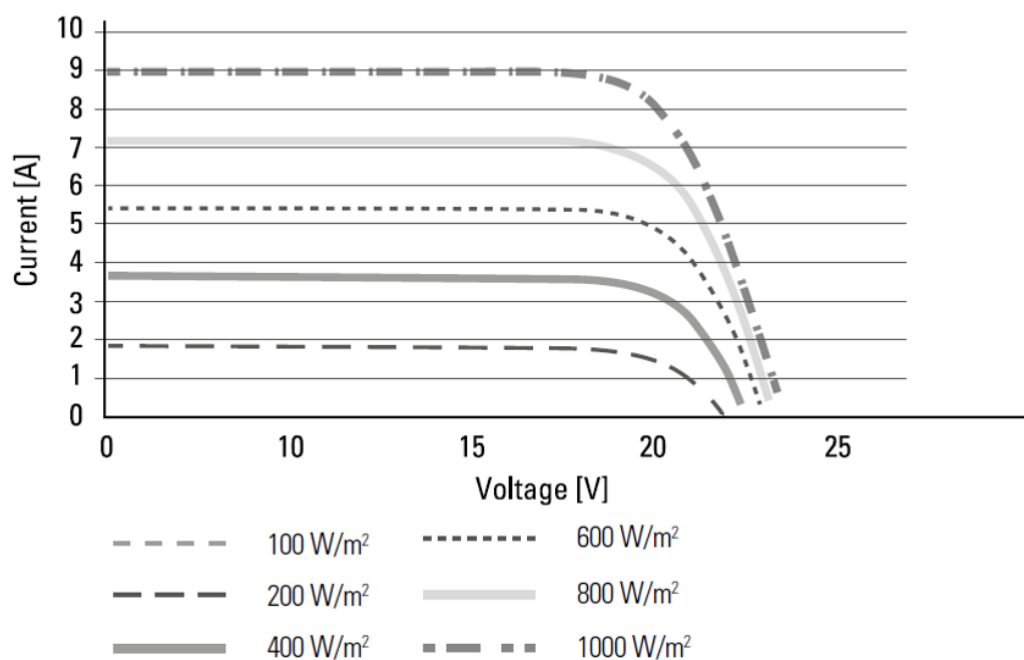


Figura 2 – Curva característica dos painéis fotovoltaicos para diferente radiação incidente.

7.3 Anexo C

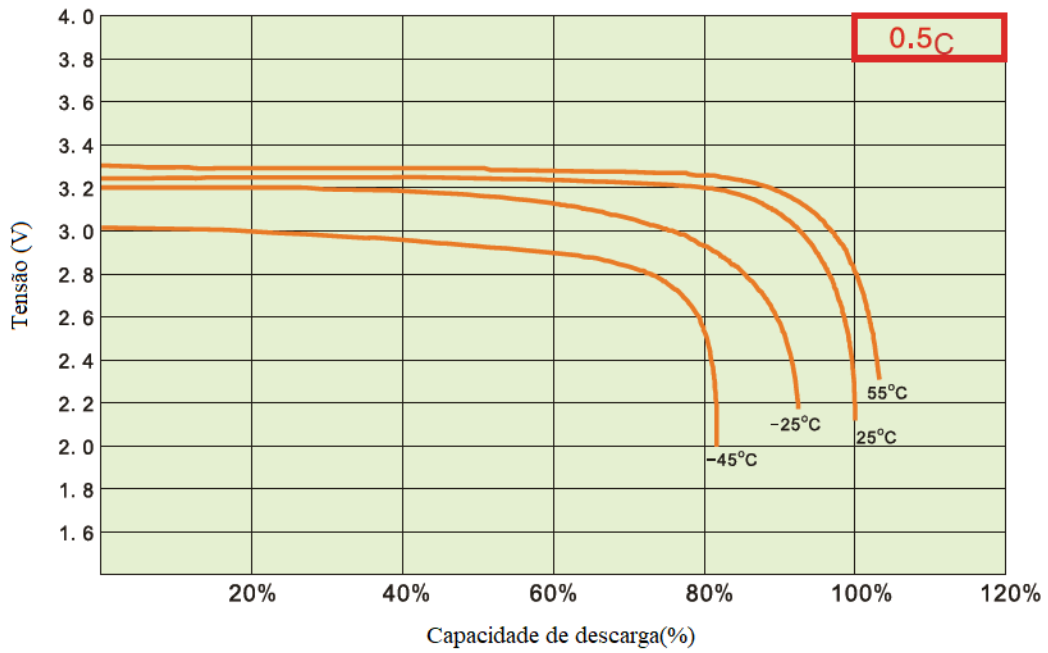


Figura 3 - Descarga para diferentes temperaturas.

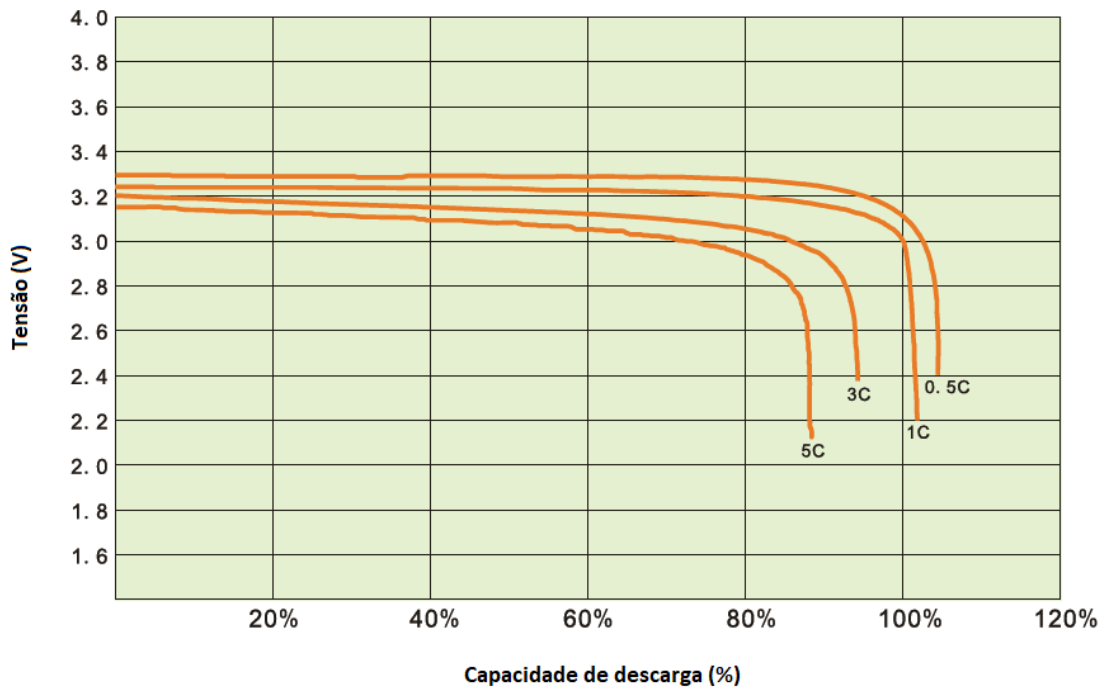


Figura 4 - Descarga para diferentes correntes.

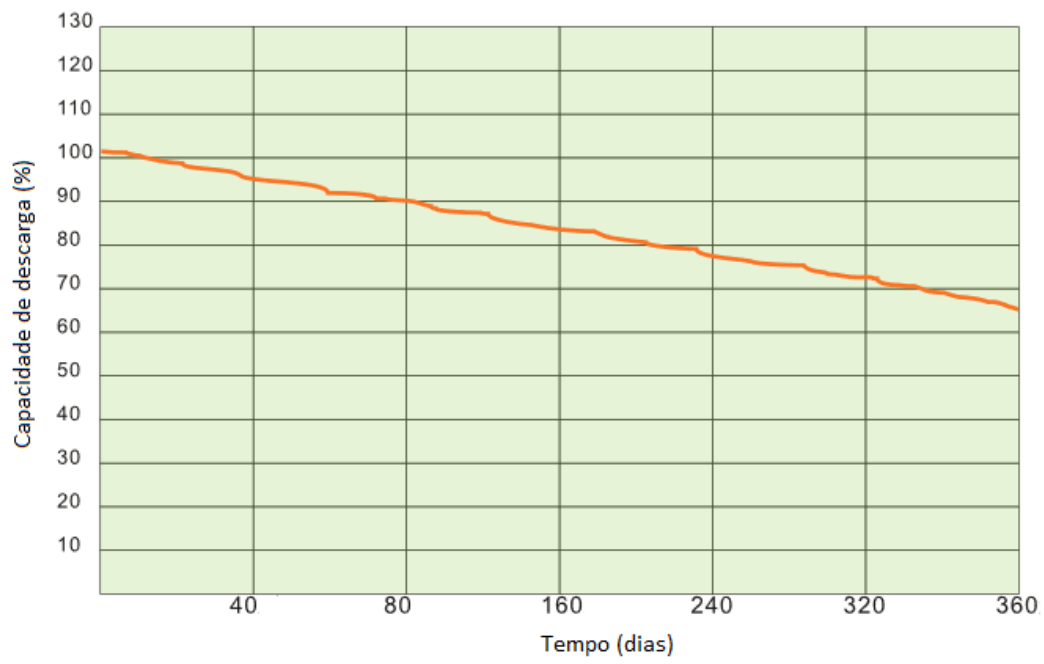


Figura 5 - Auto-descarga da bateria.