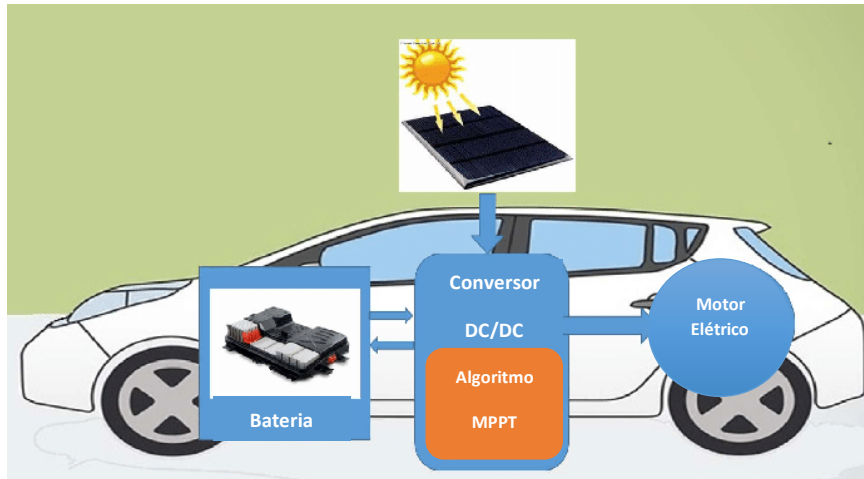


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Carregamento de um Veículo Elétrico através de Energia Solar Fotovoltaica

DAVID JOSÉ MARQUES FERNANDES

(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Energia

Orientadores:

Professor Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa
Professor Doutor Miguel Cabral Ferreira Chaves

Júri:

Presidente: Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto
1º Vogal: Doutor Luís José Lamy Rocha da Encarnação
2º Vogal: Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa

Dezembro de 2023

“Nothing is sufficient for the person who finds sufficiency too little.”

Epicurus, in “The Art of Happiness”

Dissertação realizada sob a orientação de:

Professor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa

Professor Adjunto do Departamento de
Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

Professor Miguel Cabral Ferreira Chaves

Professor Coordenador do Departamento de
Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

Resumo

O presente trabalho irá aprofundar o conhecimento sobre as diferentes tipologias de veículos elétricos disponíveis, o processo de conversão de energia solar para energia elétrica, o funcionamento das suas baterias e as formas ecológicas de fornecimento de energia solar de forma a carregar as mesmas.

Pretende-se efetuar em primeiro lugar o estudo teórico do sistema fotovoltaico a implementar no tejadilho de um veículo elétrico, com o intuito de proporcionar uma alternativa complementar ao carregamento da fonte de armazenamento do veículo, através da incidência de radiação solar.

Numa segunda fase será estudado o sistema de conversão de corrente contínua para corrente contínua, utilizando conversores DC-DC, mais concretamente a utilização de conversores elevadores e quadráticos. É escolhido também em simultâneo o tipo de controlo associado ao sistema de conversão. As combinações permitirão determinar, assim, qual a tipologia de modelo mais eficiente para o carregamento das baterias.

De forma a validar os modelos do sistema, recorreu-se ao software de simulação Matlab/Simulink. Para o sistema de armazenamento será estudado o modelo matemático de uma bateria de iões de Lítio e para a sua simulação é disponibilizado um modelo de bateria no próprio software de simulação.

Palavras-chave:

Veículos Elétricos, Conversores DC-DC, Algoritmos MPPT, Carregamento de Veículos Elétricos, Painéis Fotovoltaicos.

Abstract

The aim of this work is to deepen the knowledge of the diverse types of electric vehicles available, the process of converting solar energy into electrical energy, how their batteries work and the ecological ways of supplying solar energy to charge them.

Firstly, the aim is to conduct a theoretical study of the photovoltaic system to be implemented on the roof of an electric vehicle, with the aim of supplying a complementary alternative to charging the vehicle's storage source, through the incidence of solar radiation.

In a second phase, the system for converting direct current to direct current will be studied, using DC-DC converters, specifically the boost and quadratic converters. At the same time, the type of control associated with the conversion system will also be chosen. The combinations will allow us to find the most efficient type of model for charging the batteries.

The software Matlab/Simulink was used to implement and run the proposed conversion systems. For the storage system, the mathematical model of a lithium-ion battery will be studied, and for the simulation, a model is available in the simulation software itself.

Keywords:

Electric Vehicles, DC-DC Converters, MPPT Algorithms, Electric Vehicle Charging, Photovoltaic Panels.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero destacar e agradecer aos meus orientadores, Paulo José Duarte Landeiro Gambôa e Miguel Cabral Ferreira Chaves, pela disponibilidade, indicações e tempo dispensado na elaboração da presente tese que contribuíram em muito para a melhorar e permitiram uma maior fluidez na construção deste trabalho.

Ao meu pai que sempre olhou por mim, à minha mãe e irmã pelo incentivo e apoio que me deram ao longo do trabalho efetuado e a todos os colegas e docentes que, ao longo deste percurso académico, contribuíram para a melhor pessoa que sou hoje.

Um agradecimento especial aos meus amigos Tiago Moura, Luís Carlos, Sarah Bachelier e Pedro Valadas, a todos os elementos da Matrioska, ao Richard Warner e à Mariana Monteiro que me ajudaram e estiveram comigo nos bons e nos maus momentos e um agradecimento também ao professor Armando Rico pelo papel que teve na minha preparação para o ensino superior.

Por fim, resta-me agradecer ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa pelos 5 anos de licenciatura e de mestrado, onde me foram disponibilizadas instalações e equipamentos laboratoriais para poder usufruir em pleno das unidades curriculares do curso.

Lista de Acrónimos

AC – Corrente Alternada (*Alternate Current*)

BEV – Battery Electric Vehicle

DC – Corrente Contínua (*Direct Current*)

CCS – Sistema de Carregamento Combinado (*Combined Charging System*)

EUA – Estados Unidos da América;

HEV – Veículo Elétrico Híbrido (*Hybrid Electric Vehicle*)

HFCEV – Veículos Elétricos a Hidrogénio (*Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle*)

IGBT – Transístor Bipolar de Porta Isolada (*Insulted Gate Bipolar Transistor*)

KP – Kyoto Protocol

kHz – Quilohertz

MOSFET – Transístor de Efeito de Campo Metal-Oxido-Semicondutor
(*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)

MPP – Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point*)

MPPT – Localizador do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking*)

NS – Número de células em série

NOCT – Temperatura da célula de operação normal em graus Celsius [°C]

PHEV – Veículo Elétrico Híbrido com sistema Plug-in (*Plug-In Hybrid Electric Vehicle*)

PID – Proporcional Integral Derivativo

PI – Proporcional Integral

PTN – Pressão e Temperatura Normais

PV – Pannel Fotovoltaico

PWM – Modulação por Largura de Impulso (*Pulse Width Modulation*)

REE – Rede de Energia Elétrica

RMS – Raiz do Valor Quadrático Médio (*Root Mean Square*)

SCR – Silicon Controlled Rectifier

SOC – Estado de Carga (*State of Charge*)

TBJ – Transístor Bipolar de Junção

VE – Veículos Elétricos

VMCIH – Veículo com Motor de Combustão Interna a Hidrogénio

Simbologia

A – Tensão exponencial [V]

atm – unidade de medida de pressão (atmosferas)

B – Capacidade exponencial [Ah^{-1}]

C – Condensador do conversor elevador [F]

C_0 – Condensador de saída do conversor elevador e do conversor quadrático [F]

C_1 – Condensador do conversor quadrático [F]

D – Díodo do conversor elevador

D_1, D_2, D_3 – Díodos do conversor quadrático

dP/dU – Derivada da potência em função da tensão

E_0 – Tensão constante na bateria [V]

f_{PWM} – Frequência de comutação do MOSFET [Hz]

f_s – Frequência de comutação [Hz]

γ – Estado lógico do interruptor ($\gamma=0$ aberto, $\gamma=1$ fechado)

G – Radiação incidente na célula [W/m^2]

G_{ref} – Radiação incidente na célula nas condições de referência [W/m^2]

I^* – Dinâmica de corrente de baixa frequência [A]

i – Corrente da bateria [A]

I – Corrente entregue à carga [A]

I_D – Corrente que circula no díodo [A]

I_i – Corrente à entrada do conversor [A]

I_L – Corrente fotovoltaica [A]

I_{max} – Corrente no ponto de máxima potência [A]

I_{mppt} – Corrente no ponto de máxima potência [A]

I_o – Corrente à saída do conversor [A]

I_{or} – Corrente inversa de saturação para as condições de referência [A]

I_p – Corrente da carga no painel fotovoltaico [A]

I_{sc} – Corrente de curto-circuito [A]

it – Capacidade extraída [Ah]

I_0 – Corrente inversa de saturação [A]

K – Constante de Boltzman [J/K]

k – Constante de polarização [Ah-1] ou resistência de polarização [Ω]

kg – Quilograma

K_i – Ganho integral

km – Quilómetro

K_p – Ganho proporcional

K_w – Ganho diferencial

kWh –quilowatt-hora

L – Bobine do conversor elevador [H]

L_1, L_2 – Bobines do conversor quadrático [H]

Li-ion – Baterias de iões de Lítio

MJ – Unidade de energia, Mega Joule

m – Fator de idealidade do painel fotovoltaico

m' – Fator de idealidade da célula

$NOCT$ – Temperatura da célula de operação normal [$^{\circ}$ C]

NS – Número de células ligadas em série

P_{max}, P_{mp} – Potência no ponto de máxima potência [W]

Q – Capacidade máxima da bateria [Ah]
 q – Carga do eletrão [C]
 Q_b – Carga da bateria [Ah]
 R_p – Resistência em paralelo [Ω]
 R_s – Resistência em série [Ω]
 R_0 – Resistência de carga [Ω]
 S – Interruptor do conversor elevador e quadrático
 T – Temperatura na célula fotovoltaica [K]
 T_{ref} – Temperatura de referência da célula fotovoltaica em Kelvin (K)
 T_s – Período de comutação dos conversores [s]
 t_{on} – Período de comutação em que o interruptor está aberto [s]
 U – Tensão de entrada do conversor quadrático [V]
 U_c – Tensão de comando [V]
 U_b – Tensão na bateria [V]
 U_i – Tensão de entrada do conversor elevador [V]
 U_o – Tensão de saída do conversor elevador [V]
 V – Tensão aos terminais do painel fotovoltaico [V]
 V_{C1} – Tensão no condensador C_1 no conversor quadrático [V]
 V_{ca} – Tensão de circuito aberto [V]
 V_{L1} – Tensão na Bobine L_1 do conversor quadrático [V]
 V_{L1av} – Tensão média na bobine L_1 do conversor quadrático [V]
 V_{L2} – Tensão na Bobine L_2 do conversor quadrático [V]
 V_{L2av} – Tensão média na bobine L_2 do conversor quadrático [V]
 V_{max} – Tensão no ponto máximo de potência [V]

V_0 – Tensão de saída do conversor elevador e quadrático [V]

V_{0av} – Tensão média de saída do conversor elevador [V]

V_t – Potencial térmico [V]

V_{Tref} – Potencial térmico para as condições de referência [V]

ω – Frequência própria ou natural do sistema [rad/s]

Wh/km – Watt hora por quilómetro, unidade de consumo

Wp – Watt-pico, unidade de média utilizada nos painéis solares

z – Zero da função transferência do circuito com suspensão de ação integral

Δi_{Li} – Ondulação da corrente de entrada [%]

ΔU_o – Ondulação da tensão de saída [%]

ε – Hiato de silício [eV]

θ_{amb} – Temperatura ambiente [°C]

θ_c – Temperatura da célula [°C]

ξ – Coeficiente de amortecimento

δ – Ciclo de trabalho

\$/Wp – Dólar por watt de pico

ÍNDICE

1.	Introdução	1
1.1.	Motivação	1
1.2.	Objetivos.....	1
1.3.	Estrutura.....	2
2.	Estado da Arte	3
2.1.	Veículos Elétricos	3
2.1.1.	Evolução ao longo da história.....	3
2.1.2.	Tipos de Veículos Elétricos	5
2.1.3.	Vantagens ambientais.....	6
2.1.4.	Desvantagens ambientais.....	7
2.1.5.	Modelos atuais	7
2.2.	Carregamento de Veículos Elétricos	8
2.2.1.	Baterias	8
2.2.2.	Hidrogénio e células de combustível.....	10
2.2.3.	Princípio de funcionamento	11
2.2.4.	Tipologia de carregadores de Veículos Elétricos	12
2.2.5.	Modos de carregamento.....	15
2.3.	Aproveitamento de energia solar.....	15
2.3.1.	Evolução histórica.....	16
2.3.2.	Funcionamento da célula fotovoltaica.....	17
2.3.3.	Tipologia de tecnologia fotovoltaica.....	18
2.4.	Conversores DC/DC.....	21
2.4.1.	Tipologia de conversores DC/DC	21
2.5.	Algoritmos de Localização do Ponto de Potência Máxima	26
3.	Modelo do Sistema	31
3.1.	Produção fotovoltaica.....	31
3.1.1.	Princípio de funcionamento	31
3.1.2.	Painel Fotovoltaico em estudo	31
3.1.3.	Módulo matemático.....	32
3.1.4.	Dimensionamento do Painel Fotovoltaico	39
3.1.5.	Simulação das curvas corrente-tensão (I-V)	39
3.2.	Conversores DC/DC.....	40
3.2.1.	Conversor elevador.....	41
3.2.2.	Conversor quadrático.....	45
3.2.3.	Dimensionamento dos conversores	49

3.3.	Controladores.....	50
3.3.1.	Ponto de Máxima Potência (MPPT).....	50
3.3.2.	Controlo de tensão.....	53
3.3.3.	Controlo de corrente.....	57
3.3.4.	Dimensionamento dos controladores.....	59
3.3.4.1.	Controladores de tensão e corrente	59
4.	Sistema de Armazenamento de Energia no VE.....	61
4.1.	Armazenamento	61
4.2.	Modelo matemático.....	62
4.3.	Bateria implementada.....	64
5.	Resultados Obtidos para o Sistema Global	65
5.1.	Sistema de conversão 1 – Resultados obtidos.....	65
5.2.	Sistema de conversão 2 – Resultados obtidos.....	73
5.3.	Sistema de conversão 3 – Resultados obtidos.....	80
6.	Conclusões	89
6.1.	Conclusões gerais.....	89
6.2.	Perspetivas de trabalhos futuros.....	92
	Bibliografia.....	93
	Anexos.....	97
	Anexo A – Evolução da eficiência energética	97
	Anexo B – Catálogo do Painel Fotovoltaico em estudo	99
	Anexo C – Código Matlab utilizado para as simulações.....	101
	Anexo D – Modelo do Painel Fotovoltaico implementado em Simulink.....	103
	Anexo E – Curvas do Painel Fotovoltaico.....	105
	Anexo F – Modelo do conversor elevador implementado em Simulink.....	107
	Anexo G – Modelo do conversor quadrático implementado em Simulink.....	109
	Anexo H – Gráfico da radiação média em Portugal no ano de 2022 [29].....	111
	Anexo I – Temperaturas máximas e mínimas médias em Portugal no ano 2022 [29].....	113
	Anexo J – Simulink da junção do controlador de corrente, tensão e MPPT.....	115
	Anexo K – Catálogo da bateria de 400V [30].....	117
	Anexo L – Catálogo da bateria de 800V [42].....	119
	Anexo M – Dimensões Volvo C40 Recharge [39].....	121

Lista de Tabelas

Tabela 1: Principais características de veículos elétricos sem painel fotovoltaico integrado [43].	7
Tabela 2: Principais características de veículos elétricos com painel fotovoltaico integrado[43].	7
Tabela 3: Principais características tecnológicas das baterias mais comuns [6].	10
Tabela 4:Densidade do hidrogénio em diferentes condições [45].	11
Tabela 5:Comparação entre células de 1ª e 2ª geração [3].	20
Tabela 6: Parâmetros do painel em estudo.	31
Tabela 7: Parâmetros do dimensionamento do PV.	39
Tabela 8: Parâmetros do dimensionamento do conversor elevador.	49
Tabela 9: Parâmetros do dimensionamento do conversor quadrático.	49
Tabela 10: Pontos de funcionamento e respetivas implicações.	52
Tabela 11: Dimensionamento do controlo de tensão para o conversor elevador.	59
Tabela 12: Dimensionamento do controlo de tensão para o conversor quadrático.	59
Tabela 13: Vantagens e desvantagens das baterias de íões de Lítio [33].	61
Tabela 14: Características para a bateria de 400 V [https://www.ctsbattery.com/].	64
Tabela 15: Características para a bateria de 800 V [https://www.ctsbattery.com/].	64
Tabela 16: Resumo dos dados obtidos para os três sistemas de conversão.	90

Lista de Figuras

Figura 1: Primeiro Veículo Elétrico - Flocken Elektrowagen [www.efahrer.chip.de].....	3
Figura 2: Evolução temporal dos preços do barril entre 1995 e 2018 [SUNO artigos – Preço do Petróleo, 2022].	4
Figura 3: Geração de eletricidade entre janeiro e setembro de 2022 [https://www.ren.pt].	6
Figura 4: Esquema, simplificado, de uma bateria de íões de Lítio [7].	8
Figura 5: Comparação simplificada de uma bateria e uma célula de combustível [36].	11
Figura 6: Esquema simplificado de um veículo movido a hidrogénio como célula de combustível [12].	12
Figura 7: Conector SAE J1772 [23].	13
Figura 8: Conectores Mennekes [23].	13
Figura 9: Conector CHAdeMo [23].	14
Figura 10: Conector CCS [23].	14
Figura 11: Extrato da patente da primeira célula solar [37].	17
Figura 12: Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica [20].	18
Figura 13: Tipos de células solares [www.energyinformation].	19
Figura 14: Conversor Flyback [38].	21
Figura 15: Conversor Forward [38].	22
Figura 16: Conversor Full-Bridge [38].	22
Figura 17: Conversor Buck [38].	23
Figura 18: Conversor Boost [38].	24
Figura 19: Conversor Buck-Boost [38].	24
Figura 20: Conversor Cuk [5].	25
Figura 21: Conversor SEPIC [27].	25
Figura 22: Conversor Zeta [27].	26
Figura 23: MPP para uma tensão constante, à esquerda temperatura constante e à direita temperatura variável [8].	26
Figura 24: Controlo MPPT, do tipo perturbação e observação, para uma procura de passo pequeno [8].	27
Figura 25: Controlo MPPT, do tipo perturbação e observação, para uma procura de passo grande [8].	27
Figura 26: Potência de saída do painel e a respetiva derivada em relação à tensão de saída do painel [8].	28
Figura 27: Esquema equivalente de uma célula fotovoltaica [19].	32
Figura 28: Esquema equivalente simplificado [19].	33
Figura 29: Esquema real de uma célula fotovoltaica [10].	33
Figura 30: Esquema real do painel fotovoltaico [26].	34
Figura 31: Influência das resistências internas nas curvas I-V do painel [28].	37
Figura 32: Simulação das curvas do painel fotovoltaico para as condições $G=G_{ref}=1000\text{ W/m}^2$ e $T=T_{ref}=25^\circ\text{C}$	40
Figura 33: Conversor elevador de tensão a utilizar em simulação. Adaptação da representação em [17].	41
Figura 34: Evolução temporal da tensão (em cima) e da corrente (em baixo) no elemento indutivo [14].	42

Figura 35: Ganho do conversor em função do ciclo de trabalho [16].	43
Figura 36: Modelo do conversor quadrático a simular [34].	45
Figura 37: Evolução do sinal DP/DV em função da potência e tensão [15].	50
Figura 38: Evolução do sinal DP/DV em função da potência e corrente [15].	51
Figura 39: Diagrama de blocos do controlo MPPT.	53
Figura 40: Diagrama PWM associado ao MPPT.	53
Figura 41: Circuito à saída do conversor.	54
Figura 42: Esquema de blocos com o controlador proporcional integral com o intuito de controlar a tensão [8].	55
Figura 43: Esquema de blocos com o controlador proporcional integral com suspensão da ação integral.	56
Figura 44: Esquema de blocos com o controlador proporcional integral com suspensão da ação integral, de forma a controlar a corrente.	58
Figura 45: Diagrama de blocos do PWM para determinar o ciclo de trabalho.	58
Figura 46: Modelo genérico da bateria recarregável [41].	62
Figura 47: Características típicas de descarga de uma bateria [41].	63
Figura 48: Característica típica de carga [41].	64
Figura 49: Sistema de conversão 1.	66
Figura 50: Curvas à saída do controlador MPPT.	66
Figura 51: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 1.	67
Figura 52: Curvas à saída do conversor quadrático no sistema de conversão 1.	67
Figura 53: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 1.	68
Figura 54: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 1.	69
Figura 55: Curvas à saída do conversor quadrático no sistema de conversão 1.	69
Figura 56: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 1.	70
Figura 57: Curvas à saída do painel fotovoltaico do sistema de conversão 1.	71
Figura 58: Curvas à saída do conversor quadrático do sistema de conversão 1.	71
Figura 59: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 1.	72
Figura 60: Sistema de conversão 2.	73
Figura 61: Curvas à saída do controlador de corrente e tensão.	74
Figura 62: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 2.	74
Figura 63: Curvas à saída do conversor quadrático no sistema de conversão 2.	75
Figura 64: Curvas à saída da bateria no sistema de simulação 2.	75
Figura 65: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 2.	76
Figura 66: Curvas à saída do conversor quadrático no sistema de conversão 2.	77
Figura 67: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 2.	77
Figura 68: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 2.	78
Figura 69: Curvas à saída do conversor quadrático no sistema de conversão 2.	79
Figura 70: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 2.	79
Figura 71: Sistema de conversão 3.	80
Figura 72: Curvas à saída do controlador de corrente e tensão.	81
Figura 73: Curvas à saída do painel fotovoltaico para o sistema de conversão 3.	81
Figura 74: Curvas à saída do conversor elevador no sistema de simulação 3.	82
Figura 75: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 3.	82
Figura 76: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 3.	83
Figura 77: Curvas à saída do conversor elevador no sistema de conversão 3.	84
Figura 78: Curvas à saída da bateria no sistema de simulação 3.	84
Figura 79: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 3.	85

Figura 80: Curvas à saída do conversor elevador no sistema de conversão 3	86
Figura 81: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 3	86

1. Introdução

No âmbito da obtenção do grau de mestre na área de Energia do curso de Engenharia Eletrotécnica, realizou-se um projeto de conversão de energia solar em energia elétrica com o objetivo de proceder ao carregamento de uma bateria de um veículo elétrico.

Ao longo do presente capítulo será efetuada uma síntese do sistema de conversão a implementar e dos objetivos traçados para esta dissertação.

1.1. Motivação

Motivado pela crescente preocupação em reduzir as emissões de gases de efeito estufa resultantes da combustão no interior dos motores dos veículos “convencionais”, surge aquela que, à partida, será a solução alternativa aos veículos de motor a combustão: o veículo elétrico.

Apesar de não emitirem gases de efeito estufa, ainda existem algumas questões pertinentes a abordar no que diz respeito à sustentabilidade dos Veículo Elétrico (VE), sendo as mais relevantes relacionadas com o armazenamento de energia, autonomia das baterias e a forma como a energia utilizada no carregamento da bateria é produzida.

No que diz respeito ao carregamento das baterias dos VE, uma das soluções para um carregamento rápido e constante ao longo do dia passa pela travagem regenerativa que, mesmo assim, não é suficiente para garantir uma autonomia significativa, surgindo assim a hipótese de poder efetuar o carregamento por meio de um painel solar embutido no tejadilho do VE, aproveitando a luz solar diária.

Atualmente é possível obter rendimentos na ordem dos 23% [44] para conversão de energia solar em energia elétrica. Por essa razão, estamos perante uma tecnologia que permite aumentar a autonomia do VE e por sua vez reduzir o consumo de eletricidade.

1.2. Objetivos

A dissertação tem como objetivo o estudo teórico do sistema de conversão de energia solar em energia elétrica com o intuito de carregar a bateria de VE.

O sistema será projetado e dimensionado de forma a obter três sistemas de conversão. Deve salientar-se que a bateria não será alvo de estudo.

No âmbito da simulação do sistema em estudo recorreu-se ao *software* Matlab/Simulink e às respetivas ferramentas/bibliotecas disponíveis permitindo, assim, chegar a uma conclusão acerca de cada um dos sistemas implementados e qual o mais vantajoso.

1.3. Estrutura

A dissertação é composta por cinco capítulos. O primeiro capítulo reflete a introdução da dissertação em estudo, descrevendo de forma breve e sucinta o tema a ser estudado, os objetivos traçados para o trabalho e a estrutura do mesmo.

No segundo capítulo é abordado o estado de arte, onde se efetua um estudo de enquadramento histórico, futuro dos VE e do seu carregamento, o aproveitamento da luz solar, os conversores DC/DC e os algoritmos *Maximum Power Point Tracker (MPPT)*.

O terceiro capítulo aborda o modelo do sistema, onde é abordada a produção fotovoltaica, referindo-se o painel fotovoltaico escolhido para o estudo e o modelo matemático associado ao mesmo. São abordados também os dois tipos de conversores utilizados para os diferentes sistemas em estudo e por fim é analisado o controlo de tensão, corrente e o uso do algoritmo MPPT.

No quarto capítulo são abordados os resultados obtidos, construindo e simulando os diferentes sistemas de conversão com recurso ao *software* Matlab/Simulink. A comparação entre dados obtidos permite selecionar qual a solução mais rentável.

No capítulo cinco é realizada uma análise aos dados obtidos, retiradas as respetivas conclusões e apresentadas perspectivas de trabalho futuro.

É apresentada, também, a bibliografia consultada e analisada durante a realização desta dissertação, e no final do documento, um conjunto de anexos com informação adicional.

2. Estado da Arte

2.1. Veículos Elétricos

Num passado recente, presenciamos uma marcante metamorfose no cenário automobilístico, catalisada pela crescente consciência ambiental e pelos avanços tecnológicos. Nesse contexto, os VE emergiram como protagonistas, encarnando uma transformação revolucionária no paradigma convencional de transporte. A abordagem contemporânea neste subcapítulo compreende uma análise aprofundada da evolução dos VE ao longo da história, as vantagens e desvantagens ambientais e conhecimento de modelos atuais.

2.1.1. Evolução ao longo da história

Embora atualmente se possa olhar para os veículos elétricos com uma visão futurista, a ideia geral de um veículo elétrico já existe há quase 2 séculos, datando de 1828, quando o engenheiro e físico húngaro *Ányos Jedlik* sugeriu o modelo do primeiro motor elétrico.

Contudo é *Robert Anderson*, empresário e químico escocês, considerado o pai do carro elétrico. Entre os anos de 1832 e 1839, este trabalhou e apresentou um protótipo conhecido por ser a evolução de um carro tradicional alimentado por células elétricas.

As limitações tecnológicas ao nível da bateria e o facto de não serem recarregáveis tornou pouco prático o uso de VE, sendo assim ultrapassados pelos comuns veículos a combustão.

O avanço mais notório veio em 1859, quando o cientista francês *Gaston Planté* apresentou o modelo de baterias recarregáveis de chumbo-ácido, aperfeiçoado posteriormente em 1881 por *Camille Faure*, que conseguiu aumentar a capacidade de recarga das baterias.

O primeiro projeto de um VE foi colocado em prática pelo do empresário e “inventor” alemão *Andreas Flocken*. Tendo como base uma charrete de quatro rodas com um motor de 0,7 kW e uma bateria de 100 kg, este veículo chegava aos 15 km/h.



Figura 1: Primeiro Veículo Elétrico - Flocken Elektrowagen [www.efahrer.chip.de].

O auge da produção de VE foi atingido em 1912. Contudo, os carros a combustão acabariam por ganhar maior preponderância devido ao arranque automático, à produção em cadeia, às inúmeras reservas de petróleo existentes e às infraestruturas primitivas de geração e distribuição de eletricidade, pois os VE eram apenas utilizados em meios urbanos devido à sua baixa velocidade e reduzido alcance.

No final dos anos 50, a produção mundial de petróleo excedia a procura e, conseqüentemente, o preço pago pelas companhias petrolíferas às nações produtoras diminuía consideravelmente. No entanto, a descida dos preços não cobria os custos de exploração, pelo que no início dos anos 70 a procura de petróleo começou a exceder a produção e, por conseguinte, o preço do barril aumentou, chegando mesmo a atingir a marca dos 30 dólares [11].

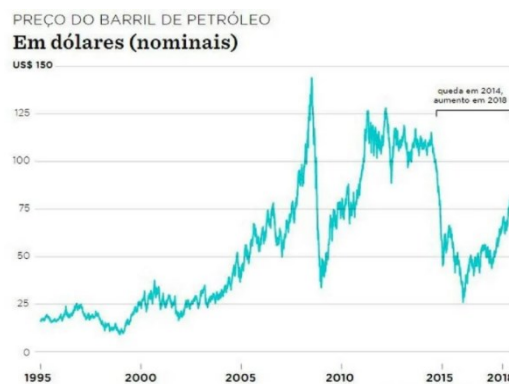


Figura 2: Evolução temporal dos preços do barril entre 1995 e 2018 [SUNO artigos – Preço do Petróleo, 2022].

As subidas de preços, que pode ser observável na Figura 2, criaram de tal forma problemas de inflação nas nações industrializadas que os governos e os bancos aumentaram as taxas de juro. Tal levou a um agravamento das dívidas por parte dos países afetados, o que fez com que estes tomassem medidas que visassem diminuir a dependência do petróleo.

A alta dependência aliada ao uso abundante de combustível fóssil aumentou bastante as emissões quantificadas de gases com o efeito estufa (GEE). Foi assim que, em 1997, se assinou o primeiro tratado jurídico internacional, o Protocolo de Quito (KP) [18], com o intuito de limitar as emissões de gases poluentes por parte dos países desenvolvidos.

Assim, foram implementados vários objetivos e metas para a redução de veículos de combustão em circulação, surgindo a oportunidade para que os VE ressurgissem no mercado e pudessem ver desenvolvida a sua tecnologia.

Em dezembro do mesmo ano em que o KP foi assinado surge o Toyota Prius, com bateria de hidrato metálico de níquel, que inicialmente apenas foi comercializado no Japão, mas que três anos depois, em 2000, passaria a ser comercializado no mundo inteiro.

Em 2004, a Tesla Motors, sediada na Califórnia, iniciou o desenvolvimento do Tesla Roadster, ficando o mesmo disponível para os seus clientes em 2008. Foi o primeiro veículo a ser produzido em série com a particularidade de ser constituído por baterias de iões de Lítio, permitindo ao veículo uma autonomia de 320 km por carga.

Os restantes fabricantes automóveis acabariam por apresentar os seus próprios modelos de VE. Em dezembro de 2010 é apresentado o Chevrolet Volt sendo este um PHEV, com a particularidade do recurso a um motor de combustão a funcionar como gerador com o intuito de carregar a bateria do veículo. Na mesma altura surge o modelo Nissan Leaf, um veículo sem qualquer tipo de emissões de gases poluentes ou de efeito estufa, sendo um veículo totalmente elétrico.

Devido à elevada procura e ascensão deste tipo de veículos no mercado, deu-se um desenvolvimento considerável na tecnologia, o que permitiu uma redução de custos no que diz respeito à produção de VE e um aperfeiçoamento na tecnologia das baterias de iões de Lítio, aumentando a sua durabilidade e desempenho [1].

2.1.2. Tipos de Veículos Elétricos

No mercado existem vários tipos de VE, distinguidos entre si maioritariamente pelo seu modo de funcionamento, que por sua vez irá refletir-se no seu impacto ambiental. Atualmente, os mais encontrados em circulação, segundo [24] são:

Veículos Híbridos (HEV):

- Neste tipo de veículos o motor elétrico tem menor autonomia e funciona apenas como apoio à propulsão a combustão, sendo o desenvolvimento de velocidade assegurado pelo motor a combustão. Através do sistema de travagem regenerativa é possível recarregar a bateria devido ao calor gerado pelo atrito entre as pastilhas e o disco do freio de travagem, sendo convertido em energia elétrica.

Veículo híbrido plug-In ou PHEV (Plug-In Hybrid Electric Vehicle):

- Usufruindo da tecnologia híbrida referida acima, a diferença vem no aumento da capacidade das baterias e também na possibilidade de carregamento através da REE. A autonomia deste VE atinge os 50 km, recorrendo aos motores de combustão apenas se necessário.

Veículos com bateria elétrica (BEV):

- Os veículos 100% elétricos funcionam exclusivamente através de um motor elétrico, estando a energia de alimentação armazenada nas suas baterias. A bateria pode ser carregada através do sistema de travagem regenerativa ou em postos de carregamento.

Veículos elétricos a hidrogénio (HFCEV):

- Estes veículos são alimentados através de hidrogénio comprimido que é canalizado para uma célula de combustível, com a particularidade de não se dar a combustão do gás, mas sim a transformação da energia do combustível em energia elétrica que, por sua vez, irá alimentar o motor elétrico do veículo. Não há emissão de gases poluentes para a atmosfera e o único resultado desta reação é água (H_2O) e calor.

2.1.3. Vantagens ambientais

Sem poluição e sem ruído, os VE não só contribuem para uma melhor qualidade do ar como reduzem bastante a poluição sonora nas cidades. A pegada ambiental dos VE ocorre mediante a forma como a energia é produzida. Da Figura 3, observa-se que em Portugal, mais de 70% da energia elétrica tem como origem fontes renováveis.

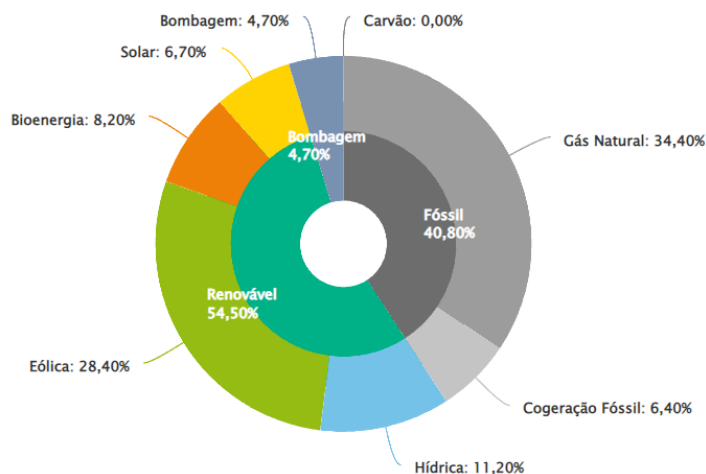


Figura 3: Geração de eletricidade entre janeiro e setembro de 2022 [<https://www.ren.pt/>].

Em contrapartida, nos veículos híbridos inevitavelmente existirão emissões por parte do motor de combustão interna. Contudo, devido às dimensões menores, comparativamente ao veículo convencional as emissões serão, também, inferiores.

2.1.4. Desvantagens ambientais

Apesar das vantagens associadas aos veículos elétricos, estes também estão associados a poluição. As baterias em si são um fator a considerar no que à poluição diz respeito, a exploração de Lítio tem um impacto considerável no meio ambiente. Existe ainda o problema relativo ao ciclo de vida das baterias, devido ao processo de reciclagem das mesmas.

Apesar da produção de VE ser mais prejudicial para o ambiente do que carros tradicionais, o impacto sobre o ecossistema ao longo do tempo é compensado pela não emissão de gases com efeito estufa. A forma como a energia de carregamento dos VE é produzida também poderá contribuir para as desvantagens, sendo importante promover estações de carregamento com produção de energia renovável.

2.1.5. Modelos atuais

O presente subcapítulo tem como propósito, explorar a atualidade de modelos de veículos elétricos que, na sua estrutura, contêm um painel fotovoltaico integrado no seu tejadilho.

Existem alguns modelos disponíveis no mercado, nas Tabelas 1 e 2 serão demonstradas as principais características de alguns modelos de VE disponíveis sem painel fotovoltaico integrado, Tabela 1, e com painel fotovoltaico integrado, Tabela 2.

Tabela 1: Principais características de veículos elétricos sem painel fotovoltaico integrado [43].

Marca do veículo	Modelo do veículo	Potência da bateria	Tensão na bateria	Capacidade da bateria
Honda	e	100 kW	400 V	88,75 Ah
BMW	iX xDrive50	385 kW	400 V	278,75 Ah
KIA	EV6 GT	430 kW	800 V	96,75 Ah
SKODA	Enyaq iV 80	150 kW	400 V	205 Ah

Tabela 2: Principais características de veículos elétricos com painel fotovoltaico integrado [43].

Marca do veículo	Modelo do veículo	Potência da bateria	Tensão na bateria	Capacidade da bateria
Mercedes-Benz	VISION EQXX	183 kW	900 V	111,11 Ah
Hyundai	IONIQ 5	225 kW	800 V	90,75 Ah
Fisker Ocean	One	420 kW	400 V	282,5 Ah
Sono Motors	Sion	120 kW	400 V	135 Ah

2.2. Carregamento de Veículos Elétricos

Neste subcapítulo será explorado os principais aspectos relacionados com o carregamento de VE, destacando as baterias, o hidrogénio e células de combustível, os princípios de funcionamento e as tipologias de carregamento de VE.

2.2.1. Baterias

O futuro descarbonizado passa, entre outros fatores, pelo armazenamento da energia excessiva que é produzida em relação à que é consumida no momento. Nas horas de maior intensidade solar, a energia produzida pode exceder a consumida, sendo possível armazenar e utilizar posteriormente nas horas onde a produção é menor ou nula.

As baterias mais competitivas atualmente, íões de Lítio, são constituídas por um ânodo (elétrodo negativo) e um cátodo (elétrodo positivo), conforme representado na Figura 4. Os íões saem do cátodo para o ânodo e quando a bateria é ligada os íões de Lítio movem-se do ânodo para o cátodo através de um eletrólito, dando-se assim a diferença de potencial que produz a corrente. No carregamento, os íões de Lítio retornam ao ânodo.

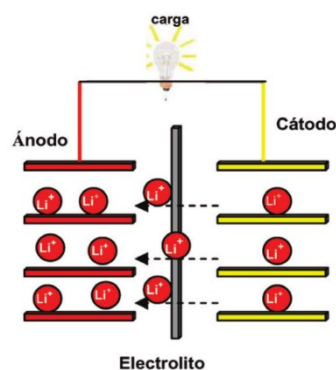


Figura 4: Esquema, simplificado, de uma bateria de íões de Lítio [7].

Na escolha da bateria indicada devem ser tidas em conta características tais como a capacidade, o tempo de descarga, a energia específica, a densidade energética, o ciclo de vida útil, a taxa de auto-descarga e a profundidade de descarga. Atualmente consideram-se as seguintes baterias [8]:

- **Baterias de chumbo-ácidas:** Mais comuns, mais baratas e dos modelos mais antigos. Utilizadas como baterias de tração em VE, altamente poluentes devido ao chumbo utilizado, com uma recarga lenta.
- **Baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd):** Predominantes no setor automóvel, apresentam elevado custo, destacando-se pelo excelente desempenho a baixas temperaturas. No entanto, o tempo de vida útil é afetado pelos ciclos de recarga.
- **Baterias de hidreto de metal níquel (NiMH):** Mais ecológicas comparativamente às de chumbo, pois não contêm metais pesados, sendo constituídas por ferro, níquel, cobalto, manganês e alumínio. Atualmente são utilizadas em HEV e VE devido à sua elevada durabilidade e capacidade de reserva.

- **Baterias de íões de Lítio (Li-Ion):** Mais recentes, com energias específicas elevadas, maior número de ciclos de vida, exigem pouca manutenção, apresentam maior facilidade de reciclagem comparativamente a outros modelos e têm um ciclo de vida de 8 anos. A sua margem de melhoramento devido ao desenvolvimento tecnológico a que ainda pode estar sujeita torna-a na melhor opção a colocar em VE. Estas baterias apresentam uma elevada densidade de energia com um custo de produção também elevado.
- **Baterias de polímero de Lítio:** Devido ao elevado custo e número reduzido de ciclos de vida útil, não são as mais utilizadas atualmente. Contudo, este modelo de bateria possui uma densidade de energia mais elevada e uma maior potência comparativamente ao modelo íões de Lítio. A capacidade não é afetada pelos ciclos de recarga.
- **Baterias de íões de Lítio com cátodo LiFeP04:** Este tipo de bateria de íões de Lítio não utiliza cobalto, tem um custo de produção mais elevado, apresenta um ciclo de vida mais longo e apresenta uma densidade de energia mais baixa.
- **Baterias de sódio-enxofre:** Este modelo à temperatura ambiente apresenta elevada densidade de energia e um longo ciclo de vida útil, proporcionando uma tecnologia competitiva e de baixo custo para o armazenamento estacionário de energia a larga escala.

Destaca-se ainda um acumulador de nano titanato desenvolvido pela *Altair Nanotecnologias*, empresa americana que essencialmente substitui o carbono ou a grafite existente nas baterias convencionais de íões de Lítio por nano titanato, de forma a aumentar os ciclos de utilização, recorrendo-se de tecnologia nanoescópica. Estes acumuladores apresentam um elétrodo constituído por partículas não estruturadas, o que por sua vez irá encurtar a distância dentro do elétrodo, acelerando assim a carga e descarga. Estes acumuladores apresentam um tempo de vida útil na ordem dos 20 anos, com carregamento rápido na ordem dos minutos e conseguem operar a elevadas temperaturas (240C°).

Por fim, existem também em fase de desenvolvimento tecnológico sistemas de armazenamento com bateria de fluxo, que atualmente se apresentam como a melhor solução para sistemas de armazenamento vinculado a fontes de energia renováveis, pois a energia armazenada e a energia fornecida não são intrinsecamente restritas. Estes modelos são constituídos por matérias-primas menos essenciais em termos de disponibilidade e têm um impacto ambiental menor em comparação às baterias que utilizam Lítio. Apresentam ainda o benefício de se poderem descarregar totalmente sem qualquer dano, na Tabela 3 encontram-se representadas as principais características das baterias mais comuns.

Tabela 3: Principais características tecnológicas das baterias mais comuns [6].

	Chumbo-ácido	Iões de Lítio	Níquel-Cádmio	NiMH
Ciclo de vida	200 a 300	500 a 1000	1500	300 a 500
Impacto ambiental	Alto	Baixo	Alto	Médio/Alto
Tensão da célula	2 V	3,6 V	1,3V	1,2 V
Efeito de memória	Não	Não	Sim	Pouco
T° de Operação	-15° a 50°	-20° a 50°C	-20° a 50°	-20° a 60°
Tempo de Carregamento	Longo	Curto	Médio	Médio
Densidade de Energia (Wh/kg)	30 – 50	110 – 160	45-80	60-120
Custo típico da bateria	21€ (7,2 V)	84€ (7,2 V)	42€ (6V)	50€ (7,2V)
Custo por ciclo	0,08 €	0,12 €	0,03€	0,10€
Custo a longo prazo	Alto	Baixo	Médio	Médio

2.2.2. Hidrogénio e células de combustível

A utilização do hidrogénio como energia do futuro, mediante a forma como é produzido, possibilita a redução por completo das emissões de gases com efeito estufa, permitindo a existência de um ciclo energético limpo. Contudo, um dos grandes entraves à utilização do hidrogénio para fins energéticos para além dos custos associados, atualmente, é o seu armazenamento de forma económica devido à sua reduzida densidade energética. Sendo o hidrogénio um gás ultraleve, este ocupa um volume bastante superior comparativamente a outros gases em condições PTN. Assim, para armazenar 1 kg de hidrogénio, seria necessário um volume de 11 m³, quantidade essa que permitiria a um HFCEV percorrer 100 km [13].

2.2.3. Princípio de funcionamento

As células de combustível convertem a energia química de um combustível diretamente para energia elétrica e calor. O seu funcionamento assemelha-se ao de uma bateria eletroquímica, mas a energia armazenada e a potência não estão no mesmo volume, pelo que desde que os reagentes entrem na célula, tendo em conta que o combustível é fornecido, é possível produzir, de forma ininterrupta, energia elétrica.

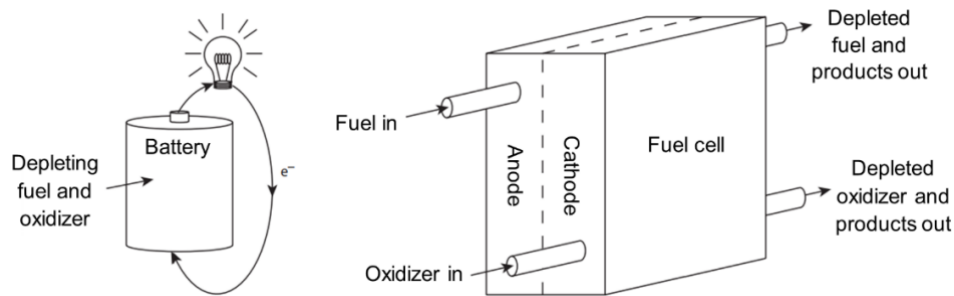


Figura 5: Comparação simplificada de uma bateria e uma célula de combustível [36].

Estas células são constituídas por dois elétrodos, um eléctrodo negativo (ânodo) e um eléctrodo positivo (cátodo), que se encontram comprimidos em volta de um eletrólito, conforme representado na Figura 5. Assim, o hidrogénio é fornecido ao ânodo e ao cátodo será fornecido oxigénio. No ânodo há um catalisador que irá separar as moléculas de hidrogénio em prótons e eletrões, onde os eletrões percorrem um circuito externo, criando um fluxo de eletricidade. Em contraste, os prótons migram do eletrólito para o cátodo, unindo-se com o oxigénio e com os eletrões, produzindo água e calor. Na Tabela 4 é demonstrado os diferentes valores de densidade para o hidrogénio em diferentes condições.

Tabela 4: Densidade do hidrogénio em diferentes condições [45].

	Densidade		Densidade de Energia (LHV)			
	(kg/L)	(Kg/m ³)	MJ/Kg	MJ/L	kWh/kg	kWh/m ³
H₂ a 20°, 1 atm	0,0000899	0,0899	120	0,01006	33,3	2,79
H₂ a 20°, 350 bar	0,025	25	120	2,8	33,3	775,86
H₂ a 20°, 700 bar	0,039	39	120	4,4	33,3	1210,34
H₂ líquido no ponto de ebulição, 1 atm	0,0708	70,8	120	7,92	33,3	2197,24
Petróleo	0,702	702	42,7	31,2	11,86	8666,67
Diesel	0,855	855	41,9	36,5	11,64	10138,88

De seguida são apresentados métodos para armazenar a quantidade necessária de hidrogénio para poder ter uma autonomia considerável, tendo em conta o peso, volume, os ciclos de carga e descarga associados (>1500 ciclos), eficiência e custos. Atualmente um HFCEV necessitará de ter armazenados entre 5 e 13 Kg de hidrogénio para poder igualar a performance de um veículo a combustão interna.

- **Hidrogénio comprimido:** Método mais acessível e económico no que diz respeito ao uso em veículos. Atualmente existem tanques de hidrogénio reforçados com fibra de carbono de 350 bar e 700 bar, contudo a sua produção é baixa e o custo é consideravelmente elevado. Ao comprimir o hidrogénio a 350 bar e a 750 bar será necessária uma energia adicional entre 7 e 15%, o que poderá ser reduzido caso o hidrogénio seja produzido a temperaturas elevadas.
- **Hidrogénio na forma líquida:** De forma a armazenar o hidrogénio líquido, é necessário manter uma temperatura de -253°C a uma pressão ambiente.
- **Hidretos de metal:** Os hidretos têm a capacidade de absorver gases leves nas cavidades das moléculas de água ligadas com hidrogénio. Este método envolve técnicas de absorção e adsorção (adesão de moléculas de um fluido a uma superfície sólida) de hidrogénio por um metal, sendo possível formar hidretos de metal através da reação do hidrogénio com ligas metálicas específicas. Contudo, a densidade de energia do hidrogénio é bastante reduzida quando armazenada em hidretos de metal. Acrescentando ainda o facto de ser necessário muito tempo para reabastecer, o seu peso considerável e ainda uma taxa de libertação de hidrogénio consideravelmente lenta, este método torna-se, atualmente, não adequado para aplicações automóveis [21].

Na Figura 6 é demonstrado o esquema simplificado de um veículo movido a hidrogénio.

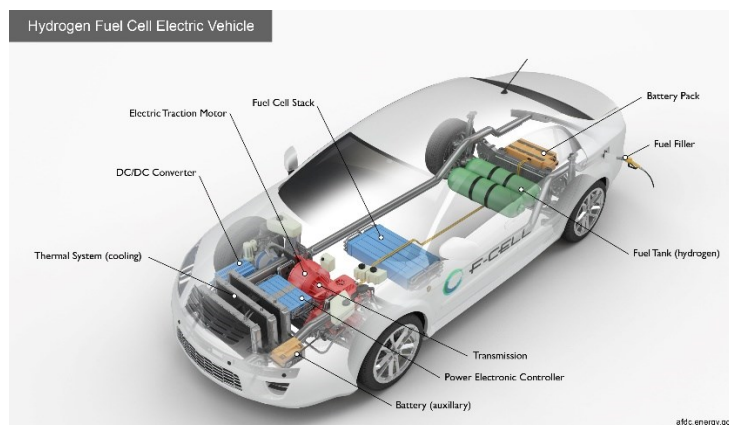


Figura 6: Esquema simplificado de um veículo movido a hidrogénio como célula de combustível [12].

2.2.4. Tipologia de carregadores de Veículos Eléctricos

Os carregadores de VE podem estar instalados dentro da estrutura do veículo (*onboard*) ou podem ser instalados no local onde se pretende carregar o veículo, sendo um equipamento individual (*offboard*). É importante que os carregadores possam otimizar a taxa de carga para prolongar ao máximo o tempo de vida útil da bateria. São apresentados de seguida e com base em [23] os vários tipos existentes.

- **Tipo 1:** Carregadores monofásicos, SAE J1772, mais comuns nos EUA, com uma potência de 19,2 kW onde a tomada tem pinos de fase, neutro e terra, existindo para além destes pinos 2 conectores de auxílio a uma ligação estável. É possível encontrar em alguns VE uma segunda conexão CHAdeMO, permitindo carregamento rápido.



Figura 7: Conector SAE J1772 [23].

- **Tipo 2:** Também conhecidos por Mennekes ou IEC 62196, representados na Figura 8, permitem usar potências mais baixas ou superiores, usando tensão monofásica ou trifásica, funcionando simultaneamente como carregador do tipo 1 ou como carregador rápido.



Figura 8: Conectores Mennekes [23].

- **CHAdMo:** Criado em colaboração com as cinco grandes marcas japonesas em 2010, possui uma potência máxima de 60 kW e uma tensão de 500V, sendo usado para carregamentos rápidos que, mediante a capacidade da bateria, carrega cerca de 80% da bateria em 20 minutos.



Figura 9: Conector CHAdMo [23].

- **Conector CCS:** Pode ser usado para carregamentos rápidos a uma potência até 50 kW em corrente contínua. Em corrente alternada, permitem fazer carregamentos lentos ou rápidos. Estes carregadores têm dois tipos, sendo eles o CSS Tipo 1 e CSS tipo 2.



Figura 10: Conector CCS [23].

A configuração interna dos carregadores é definida de acordo com [25] por:

- **Linear Charger:** Consiste numa fonte de alimentação que converte energia AC em energia DC de baixa potência, e num elemento regulador linear que limita a corrente que flui para a bateria. A fonte de alimentação é composta por um transformador que baixa a tensão de 115 VAC para uma tensão mais próxima do ideal de forma a alimentar a bateria e um retificador que suaviza o sinal sinusoidal AC existente para um sinal de tensão DC constante.

- **Switch Mode Chargers:** A energia AC de uma tomada *schuko*, por exemplo, é convertida em energia DC de alta tensão através de um retificador, e posteriormente convertida em energia DC de baixa tensão através de um conversor DC-DC.
- **Ferroresonant Chargers:** Este carregador funciona através de um transformador ferroresonante, que reduz a tensão da tomada de parede para um valor menor de tensão regulada, controlando simultaneamente a corrente da carga. A energia AC é convertida para energia DC própria para a bateria, através de um retificador.
- **SRC Chargers:** Funciona através de impulsos que comutam um semiconductor. Numa fase inicial do carregamento são fornecidas correntes elevadas à bateria, e na fase final do carregamento a corrente é controlada com o objetivo de manter um nível de tensão mais reduzido.

2.2.5. Modos de carregamento

Os modos de carregamento dos VE são um fator importante no tempo de vida útil das baterias, sendo através destes que se consegue obter maior eficiência. Existem de acordo com [4] quatro modos de carregamento:

- **Modo 1:** Realizado através de uma tomada doméstica (Schuko). Sistema simples de carregamento, mais indicado para motos de menor potência, bicicletas elétricas, *hoverboards* e trotinetes elétricas, não sendo de todo adequado para o carregamento de VE. O carregamento demora entre 6 e 8 horas.
- **Modo 2:** Carregamento monofásico com uma potência inferior a 3,7 kW. Neste modo, a ligação da rede ao VE é efetuada através de um cabo de carregamento adequado ao fornecimento de energia. Utiliza-se também uma tomada do tipo Schuko exclusiva ao carregamento de VE, demorando este entre 6 e 8 horas.
- **Modo 3:** Carregamento adequado aos HEV ou VE. O carregamento é feito através de uma *WALLBOX*, a alimentação é efetuada por corrente alternada (AC) e é necessário um conector específico que pode ser do tipo 1. O carregamento demora entre 3 e 4 horas.
- **Modo 4:** Realizado em CC, permite carregar pelo menos 80% da bateria em menos de 30 minutos. Para este modo é utilizado um conector do tipo CHAdeMO ou do tipo CCS, sendo necessário existir no VE um de dois conectores, tipo 1 ou tipo 2. Este é o modo considerado para valores acima do 50 kWh, podendo ser utilizados dois tipos de carregamentos -super-rápido ou ultrarrápido- sendo que o último não é aconselhado para carregamentos frequentes, pois pode danificar a bateria e reduzir substancialmente o tempo de vida útil. O carregamento demora cerca de 20-30 minutos.

2.3. Aproveitamento de energia solar

O aproveitamento da energia solar representa não só uma alternativa promissora, mas uma revolução na forma como obtemos e utilizamos a energia. Neste subcapítulo será explorado o contexto histórico do aproveitamento de energia solar, o princípio de funcionamento e as tecnologias associadas.

2.3.1. Evolução histórica

Observado pela primeira vez em 1839 por *Alexandre Edmond Becquerel*, [2] o efeito fotovoltaico consiste na geração de corrente elétrica ou tensão elétrica a partir da exposição de um material semiconductor à radiação solar. A célula fotovoltaica absorve os fótons presentes na radiação solar, que por sua vez libertam elétrons que fluem através das células.

Em 1877, *William Grylls Adams* e *Richard Evans Day* recorrem-se das propriedades fotocondutoras do selênio com o intuito de desenvolver o primeiro dispositivo de produção de eletricidade através da exposição a radiação solar. O dispositivo tratar-se-ia de um filme de selênio depositado num substrato de ferro com um segundo filme de ouro, semitransparente, que seria o contacto frontal. Numa fase inicial, a eficiência de conversão era baixa, na ordem dos 0,5%.

A primeira célula fotovoltaica, representada na Figura 11, foi criada em 1953 por *Calvin Fuller*, que desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício com o objetivo de controlar as suas propriedades elétricas (processo hoje conhecido por “*dopagem*”). Neste processo, uma barra de silício é dopada com uma pequena concentração de gálio, tornando-se condutora e tendo as cargas móveis positivas (tipo P). *Gerald Pearson* mergulhou a barra de silício dopado numa solução quente de Lítio, criando assim na superfície da barra uma zona com excesso de elétrons livres com carga negativa (tipo N). Na região onde o silício “tipo N” entra em contacto com o silício “tipo P” (junção P-N), surge um campo elétrico permanente.

Pearson verificou que ao expor essa amostra à luz solar era produzida corrente elétrica, criando, dessa forma, a primeira célula solar de silício, com uma eficiência de conversão de 4%. Contudo, verificaram-se ainda vários obstáculos devido à dificuldade em soldar contactos elétricos ao material constituinte. Mesmo à temperatura ambiente, verificava-se que o Lítio migrava para o interior do silício, fazendo com que a junção P-N ficasse cada vez mais profunda e inacessível aos fótons presentes na radiação solar, o que por sua vez diminuiria a eficiência da célula.

O problema em torno da soldagem dos contactos físicos persistia, e foi aí que *Fuller* substituiu o gálio por arsénio, formando um substrato do tipo n, seguido por uma difusão de boro, formando uma zona do tipo p à superfície. Estas modificações permitiram que as células pudessem ser soldadas, acabando por revelar uma eficiência de conversão na ordem dos 6%.

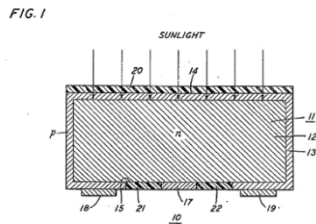


Figura 11: Extrato da patente da primeira célula solar [37].

A célula solar de *Chapin, Fuller e Pearson* teria a sua primeira aplicação ao alimentar uma rede telefónica local, no estado da Geórgia, tratando-se de um painel com nove células com 30 mm de diâmetro.

Mais tarde, o *COMSAT Laboratories* apresentou avanços tecnológicos consideráveis, sendo responsável pela “célula violeta”. Esta célula tinha uma zona do tipo n significativamente mais fina que as anteriores, permitindo eliminar as zonas inativas à superfície, o que melhorava a resposta no azul. Esta célula obteve uma eficiência recorde de 13,5%.

A eficiência de conversão ultrapassaria os 20% pela primeira vez nas células de silício monocristalino da Universidade de New South Wales (Austrália), enquanto os 25% de eficiência foram atingidos por *Dick Swanson* e a sua equipa, em células com concentradores que focavam a radiação solar numa área mais pequena onde se encontrava a célula solar.

Na Alemanha surgia assim a “lei das tarifas garantidas”, que resultou no crescimento exponencial do mercado de eletricidade solar verificado no final dos anos noventa e princípios do século XX. Assim, em 1999, o total acumulado de painéis solares atingiria a fasquia do primeiro gigawatt, três anos mais tarde seria o dobro. Antes ainda, em 1998, verificou-se uma eficiência recorde de 24,7% em células de silício monocristalino.

Configurações mais complexas foram testadas (como exemplo as células em cascata, que consistem na sobreposição de várias células semicondutoras, cada uma otimizada para um dado comprimento de onda de radiação, atingindo rendimentos de conversão superiores a 34%)[35].

2.3.2. Funcionamento da célula fotovoltaica

O princípio de funcionamento da célula fotovoltaica consiste na conversão direta de energia solar em energia elétrica, apresentando um funcionamento semelhante ao de um díodo fotossensível, baseando-se nas propriedades dos materiais semicondutores.

A célula fotovoltaica é composta por duas camadas de material semiconductor dopadas: por uma camada N onde existe excesso de elétrons periféricos e uma camada P, onde existe um déficit de elétrons. Desta forma, cria-se uma diferença de potencial entre as duas camadas.

Os elétrons existentes na camada N, periféricos, ao serem expostos a radiação solar captam a energia dos fótons, saltando a barreira potencial, criando uma corrente contínua. Para a condução desta corrente existem dois elétrodos nas camadas de semicondutores: o elétrodo superior apresenta uma forma em grelha com o intuito de deixar passar os raios luminosos e sobre este elétrodo é deposta uma camada antirreflexo, aumentando a quantidade de luz absorvida[20].

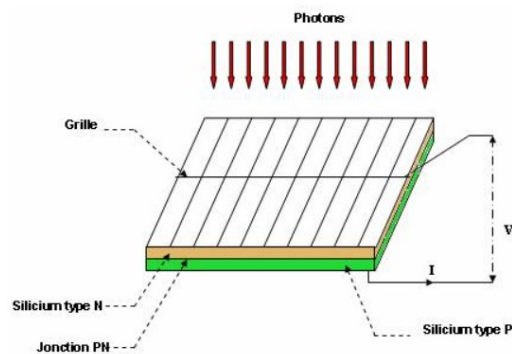


Figura 12: Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica [20].

2.3.3. Tipologia de tecnologia fotovoltaica

Atualmente é possível dividir em três categorias a tecnologia fotovoltaica, sendo elas de primeira, segunda e terceira geração. Na tecnologia de primeira geração, as células são feitas a partir de silício cristalino, englobando-se nesta tecnologia as soluções monocristalinas, policristalinas e amorfas. As tecnologias de segunda geração correspondem às soluções de película fina, podendo ser incluída também a solução de amorfa. Por fim existem as tecnologias de terceira geração, que englobam novos conceitos de células solares, ainda que em fase experimental na sua maioria, destacando-se a sua utilização na área espacial.

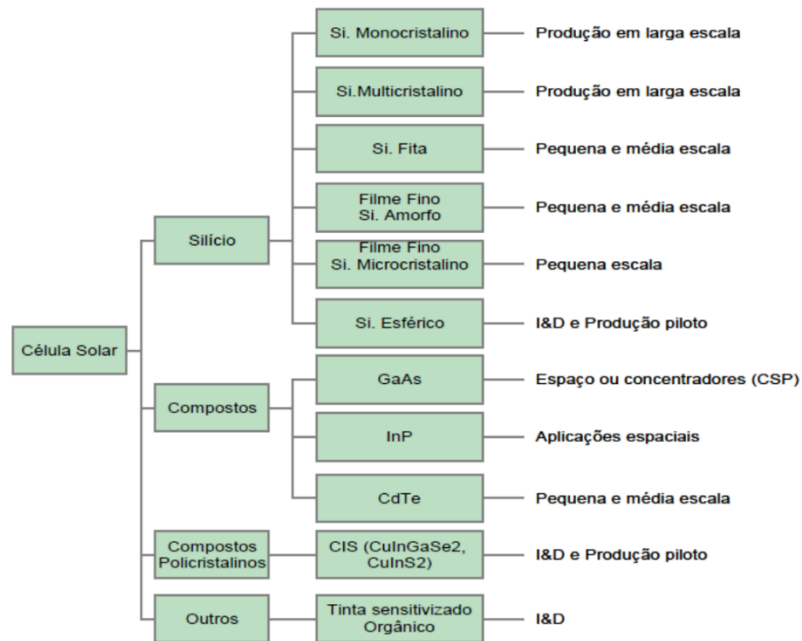


Figura 13: Tipos de células solares [www.energyinformation].

No contexto dos tipos de células solares observadas na Figura 13, tem-se em consideração a existência de três tipologias de tecnologia de geração fotovoltaica, segundo [9]:

- **1ª Geração:**

Mais usada no mercado, composta por silício cristalino de elevada pureza, que está presente em 90% dos geradores instalados no mundo e encontra-se subdividida em dois tipos:

- Células de Silício Monocristalino (c-Si), obtidas a partir do corte de um lingote de silício puro monocristalino, utilizado em todo o tipo de aplicações terrestres de média e elevada potência. Devido à forma como é obtido apresenta um preço elevado, mas possui maior longevidade e uma eficiência na ordem dos 24%;
- Células de Silício Multicristalino (p-Si), obtidas através de um lingote de silício e constituídas por um número muito elevado de cristais, sendo uma alternativa mais barata comparativamente à célula de silício monocristalino, apresentando uma eficiência na ordem dos 16%.

- **2ª Geração:**

É uma tecnologia que veio responder a uma necessidade de redução no consumo de silício, devido ao facto de a oferta ser inferior à procura, permitindo que surgissem os filmes finos, partículas semicondutoras com uma espessura muito pequena. Devido ao seu peso reduzido, podem ser integradas em fachadas de edifícios. O processo de fabrico é dispendioso, pois requer um elevado grau de pureza nos materiais empregues, juntamente com elevadas temperaturas. Estas células apresentam uma melhor

capacidade de absorção de luz solar devido à espessura do semicondutor se encontrar na ordem das unidades de micron. Nesta tecnologia, as células mais utilizadas são:

- Células de Telureto de Cádmio (CdTe), apresentam uma eficiência na ordem dos 16%, a sua produção é limitada devido à pouca abundância de telúrio e a utilização do metal tóxico, cádmio, apresenta, também, uma forte desvantagem;
- Células de Cobre-Índico-Gálio-Selénio, apresentam uma constituição formada por várias camadas ultrafinas de diferentes materiais semicondutores e uma eficiência compreendida entre os 12% e 18%, variando consoante a área da célula.

• **3ª Geração:**

Para a tecnologia desta geração - ainda que numa fase inicial - estudos teóricos sugerem que se podem atingir grandes eficiências a um custo de produção mais baixo. Nesta geração, as células de maior relevo são:

- Células Sensibilizadas por Corantes, que se baseiam num mecanismo foto-electro-químico rápido e regenerativo, sendo compostas por elétrodos de dióxido de titânio (TiO_2) com corante;
- Células Orgânicas, que são células compostas por materiais orgânicos como dadores e recetores de eletrões e lacunas, apresentando uma eficiência na ordem dos 8% comparativamente a outras tecnologias. É necessária uma área maior para atingir níveis de potência semelhantes. Por outro lado, a grande vantagem é que na sua produção são utilizados materiais mais económicos.

Tabela 5: Comparação entre células de 1ª e 2ª geração [3].

	Monocrystalline	Polycrystalline	Amorphous	CdTe	CIS/CIGS
Typical module efficiency	15-20%	13-16%	6-8%	9-11%	10-12%
Best research cell efficiency	25%	20,4%	13,4%	18,7%	20,4%
Area required for 1 kWp	6-9 m ²	8-9 m ²	13-20 m ²	11-13 m ²	9-11 m ²
Lowest price	0,75 \$/W	0,62 \$/W	0,69 \$/W	-	-
Temperature resistance	Performance drops 10-15% at high temperatures.	Less temperature resistant than monocrystalline.	Tolerates extreme heat.	Relatively low impact on performance.	

A Tabela 5, representa em resumo a comparação entre as células de 1ª e 2ª geração, onde é tido em conta parâmetros como a eficiência dos módulos, área necessária para obter 1 kWp e o respetivo preço associado, para o presente projeto serão consideradas as células de primeira geração de tecnologia fotovoltaica.

2.4. Conversores DC/DC

Têm como finalidade converter uma tensão ou corrente contínua com determinado valor médio noutra tensão ou corrente contínua com valor médio diferente. A conversão é efetuada aplicando tensão contínua pulsada a um componente indutivo como uma bobina ou um transformador com uma determinada frequência, permitindo armazenar o fluxo de corrente para que mais tarde possa ser libertado para uma saída.

Existem, assim, dois tipos de conversores: os isolados e os não isolados. Nos conversores isolados, trabalha-se com transformadores de alta frequência, tornando possível utilizar o ciclo de trabalho (*Duty-cycle*), ou um intervalo de comutação com uma gama mais alargada de valores, mediante as tensões de entrada e saída [31].

2.4.1. Tipologia de conversores DC/DC

- **Conversores isolados:**

- Flyback – Conversor redutor-elevador, representado na Figura 14, contém apenas um transístor e o seu funcionamento baseia-se no estado de um interruptor. Quando o interruptor está fechado, a tensão de entrada magnetiza o primário do transformador. Quando está aberto, a energia armazenada no transformador é transferida para a saída e por sua vez o condensador, C , fornece energia à carga.

Este tipo de conversores permite um elevado rácio de conversão de tensão através da multiplicação do rácio de espiras do enrolamento primário pelo das espiras do enrolamento secundário do transformador, $n = \frac{N_1}{N_2}$, sendo também capaz de garantir isolamento.

Esta topologia de conversor não necessita de um filtro indutivo.

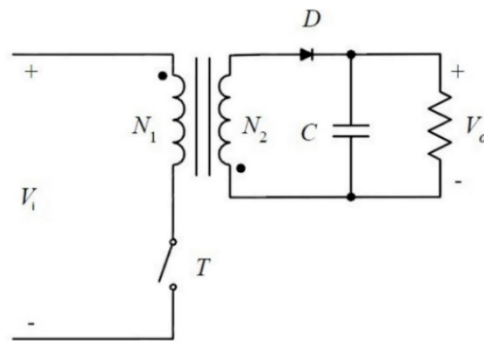


Figura 14: Conversor Flyback [38].

- **Forward** – Redutor isolador, representado na Figura 15, onde o seu funcionamento depende de um interruptor que, quando se encontra fechado, o diodo D_1 se encontra em condução e o diodo D_2 ao corte, o que levará ao aumento da corrente no elemento indutivo. Quando se encontra aberto, o diodo D_2 entra à condução e o diodo D_1 encontra-se ao corte, pelo que a corrente no elemento indutivo irá diminuir, uma vez que a energia previamente armazenada será conduzida para a saída.

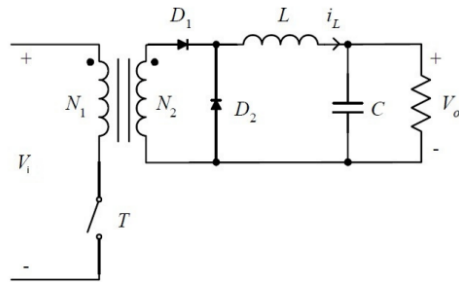


Figura 15: Conversor Forward [38].

- **Full-Bridge** – Conversor de ponte completa, representado na Figura 16, onde os interruptores conduzem aos pares alternadamente, entre o par T_1 e T_2 e o par T_3 e T_4 . Quando o par T_1 e T_2 conduz, o diodo D_1 ficará à condução, ficando o diodo D_2 ao corte e vice-versa. Entre as comutações dos pares de transistor, dá-se um intervalo de tempo onde os diodos D_1 e D_2 estão à condução simultaneamente.

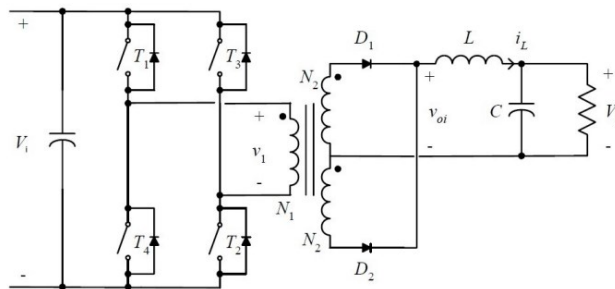


Figura 16: Conversor Full-Bridge [38].

- **Conversores não isolados:**

- **Buck** – Conversor redutor, representado na Figura 17, apresenta à saída um valor de tensão inferior comparativamente à entrada. Quando o interruptor, S, se encontra fechado, a energia é transferida da fonte para a bobina, aumentando assim a corrente à saída. Quando $I_0 > \frac{V_0}{R}$, a energia será transferida para o condensador. Aquando da abertura do interruptor, o diodo irá conduzir, permitindo que a corrente flua para a bobina. Na bobina, a energia armazenada será então entregue ao condensador e à carga e o condensador será carregado enquanto o valor instantâneo da corrente na bobine for maior do que a corrente na carga. Quando a corrente for menor, o condensador irá

descarregar, anulando a diferença e mantendo uma corrente constante na carga. Podem-se verificar dois modos de funcionamento: o modo contínuo, quando a corrente na bobina não chega a 0 durante a condução do diodo, e o caso inverso, denominado de modo descontínuo.

Este tipo de conversor não consegue imitar pequenas impedâncias em comparação com as impedâncias da carga, então não consegue atingir os valores de corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico. É assim possível minimizar a baixa corrente de ondulação à saída e a alta corrente de ondulação à entrada.

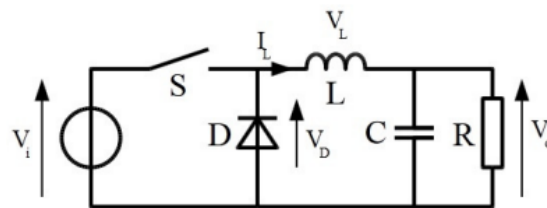


Figura 17: Conversor Buck [38].

- **Boost** – Conversor elevador, representado na Figura 18, produz impedâncias menores comparativamente às impedâncias produzidas na carga R, o que por sua vez tornará mais difícil atingir a tensão de circuito aberto fornecida pelo módulo fotovoltaico. Assim, para valores baixos de tensão de entrada, a tensão de saída será maior para um conversor elevador elevado. Para obter um ganho de tensão infinito, o ciclo de trabalho terá de ser igual a 1.

Pela Figura 18 observa-se que o conversor elevador tradicional é composto por um elemento capacitivo, o condensador C, e um elemento indutivo, a bobine L. No intervalo de tempo em que o interruptor está ligado, o condensador irá passar a corrente para a carga e simultaneamente a bobine é energizada através da corrente do módulo fotovoltaico.

No intervalo de tempo em que o interruptor está desligado, a energia que está armazenada no elemento indutivo, L, é fornecida à zona do conversor composta pelo condensador, C, e a carga, R.

Vários conversores “*step-up*” foram desenvolvidos para sistemas fotovoltaicos, existindo algumas topologias com a relação baixo custo *versus* alta eficiência:

- Conversor elevador com um indutor acoplado;
- Conversor elevador com um condensador comutado;
- Conversor elevador com um indutor e um condensador comutado;
- Conversor elevador com indutor acoplado e um condensador comutado.

O sistema fotovoltaico trifásico juntamente com o controlo MPPT reduz os problemas de recuperação inversa do diodo e o tamanho do filtro. O interruptor eletrónico de potência com RDS elevado é utilizado em conversores de três níveis, onde o valor nominal é pequeno comparativamente ao conversor elevador convencional.

Outra tipologia de conversores elevadores que emprega a técnica de comutação suave reduz as perdas associadas à ativação e desativação, aumentando simultaneamente a eficiência em comparação com o conversor elevador com comutação “dura”.

A tipologia com um elemento indutivo acoplado e um elemento capacitivo comutado permite que a bobine magneticamente acoplada ao conversor elevador equilibre a tensão de entrada para o RDS-on baixo. A energia de fuga do elemento indutor é “reciclada” no seu output. Outra vantagem da energia de fuga do elemento indutor é que evita a sobretensão, e esta configuração em particular permite uma maior eficiência, na ordem dos 98%.

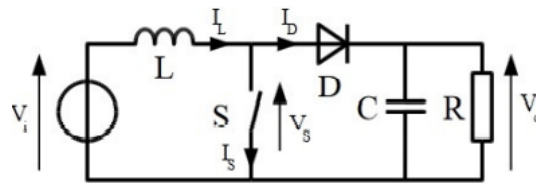


Figura 18: Conversor Boost [38].

- Buck-Boost – Conversor redutor-elevador, Figura 19, obtido através da associação em cascata dos dois conversores anteriormente referidos com o mesmo “*ciclo de trabalho*”. A tensão à saída pode ser igual, maior ou menor que a tensão na entrada. Quando o interruptor S está fechado, a bobine armazena energia e o diodo está inversamente polarizado. Quando o interruptor liga, a energia previamente armazenada na bobina irá fluir para a carga.

As tensões elevadas nos comutadores requerem interruptores de alta tensão com resistências elevadas, o que provoca perdas de condução.

Esta topologia de conversores pode operar de forma bidirecional, onde a saída pode ser uma tensão “*step-up*” ou “*step-down*”, mediante o que é necessário. A necessidade de menos dispositivos para o funcionamento é a principal vantagem destes conversores.

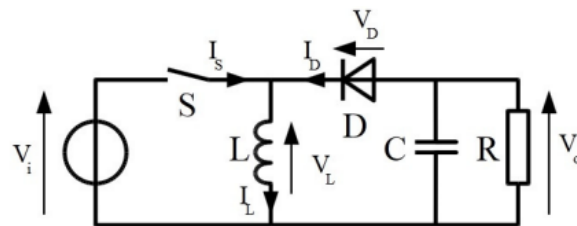


Figura 19: Conversor Buck-Boost [38].

- Cuk – Conversor de acumulação capacitiva, representado na Figura 20. Esta topologia é utilizada para obter o ponto de máxima potência no modelo fotovoltaico, quando é implementada lógica *fuzzy* ou utilizado o algoritmo de controlo direto. Este conversor possui perdas mais baixas no interruptor, obtendo melhor eficiência comparativamente a outros conversores.

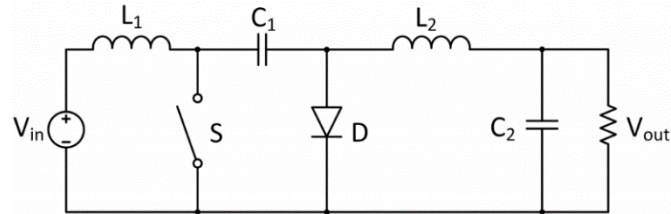


Figura 20: Conversor Cuk [5].

- SEPIC – Este conversor, representado na Figura 21, proporciona baixo ruído à entrada e minimiza os efeitos de acumulação energética no elemento indutivo C_1 . A transferência de energia é feita principalmente entre o elemento capacitivo C_1 e o elemento indutivo L_2 . A principal vantagem desta topologia advém da ligação à terra do terminal de comutação, permitindo isolamento à entrada e à saída do conversor.

Este conversor é apenas usado em montagens onde a bateria apresenta tensões elevadas.

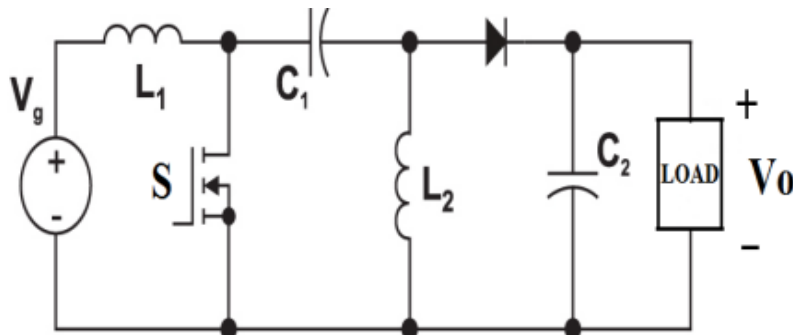


Figura 21: Conversor SEPIC [27].

- **Zeta** – Esta topologia, ilustrada na Figura 22, funciona trocando a energia entre o elemento capacitivo C_1 e o elemento indutivo L_1 . A principal desvantagem é a corrente de entrada de surto, referente à elevada corrente que flui para um dispositivo eletrônico ou sistema, nos instantes em que é ligado.

Este conversor fornece baixa ondulação de entrada, baixo ruído e apresenta um isolamento maior entre a entrada e a saída.

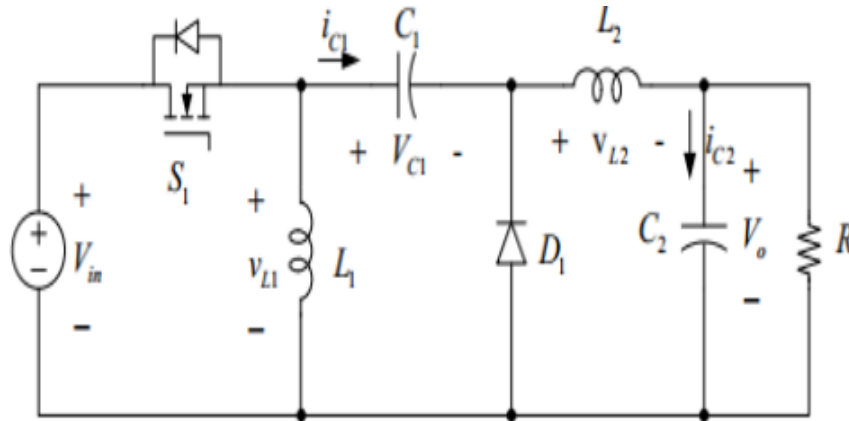


Figura 22: Conversor Zeta [27].

2.5. Algoritmos de Localização do Ponto de Potência Máxima

Para um módulo fotovoltaico, qualquer ponto de funcionamento que não seja o Ponto de Máxima Potência diminui a eficiência do sistema, pelo que o rendimento do módulo pode ser aumentado ajustando o nível de potência da carga, tendo em conta a curva de eficiência fotovoltaica. Seguidamente são apresentadas várias técnicas de controladores MPPT:

- **Tensão constante:** Neste método, o ciclo de trabalho é alterado de modo a obter uma tensão de saída constante. Na Figura 23 pode observar-se que a temperatura é mantida constante para qualquer valor de radiação, tendo um ponto MPP cuja tensão será sempre constante, independentemente da radiação. Assim, é possível procurar o MPP para uma temperatura constante. No entanto quando se verifica uma variação, a relação deixa de ser linear e para cada valor de radiação existe uma tensão diferente, tornando este método inaplicável.

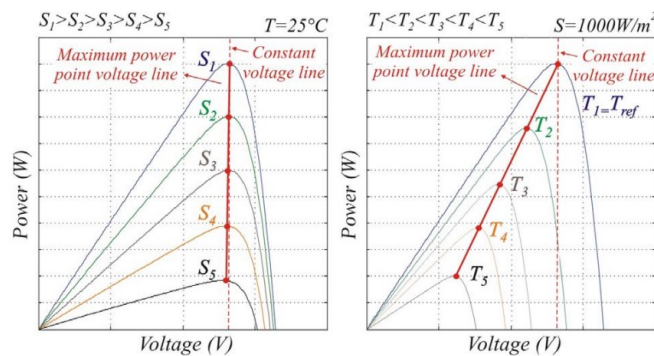


Figura 23: MPP para uma tensão constante, à esquerda temperatura constante e à direita temperatura variável [8].

- Perturbação e observação:** Este método não necessita de um conhecimento prévio das condições ambientais, no entanto é necessário um sensor de corrente e tensão. Através do produto destas grandezas é calculada a potência de saída do painel fotovoltaico, causando uma perturbação no ciclo de trabalho D . Após a perturbação, é observado o comportamento da potência e se se verificar um aumento mantém-se a perturbação na mesma direção, caso se verifique uma diminuição, a perturbação imposta terá o sentido oposto. A perturbação irá ditar a velocidade com que o ponto de máxima potência é atingido e a quantidade de oscilações observadas.

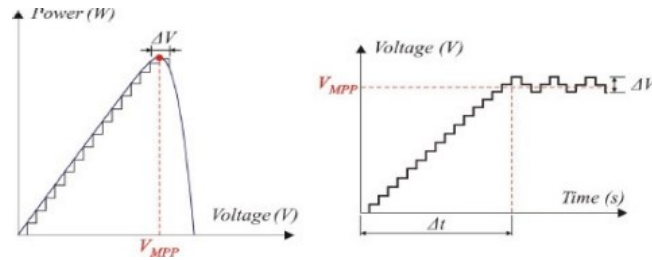


Figura 24: Controlo MPPT, do tipo perturbação e observação, para uma procura de passo pequeno [8].

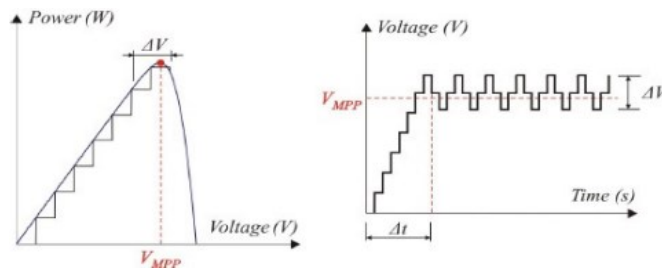


Figura 25: Controlo MPPT, do tipo perturbação e observação, para uma procura de passo grande [8].

Contudo, este método para certas circunstâncias é considerado instável, pois pode ser procurado um ponto de potência errado devido às rápidas variações atmosféricas.

- Condutância Incremental:** Será o método utilizado neste projeto e de modo análogo ao método explorado anteriormente, através das medições de tensão e corrente é calculada a potência de saída e a respetiva derivada em função da tensão $\left(\frac{dP}{dV}\right)$, através da seguinte equação:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = I_n + V \frac{I_{n-1} - I_n}{V_{n-1} - V_n} \quad (1)$$

Onde a V e I , representam a tensão e corrente do módulo fotovoltaico e n representa um instante no tempo.

O valor desta derivada irá influenciar o ciclo de trabalho D , assim se:

- $\frac{dP}{dV} > 0$, funcionamento à esquerda do ponto MPP, o ciclo de trabalho será aumentado;

2. $\frac{dP}{dV} < 0$, funcionamento à direita do ponto MPP, o ciclo de trabalho será reduzido;
3. $\frac{dP}{dV} = 0$, funcionamento no ponto MPP, o ciclo de trabalho será fixado no mesmo valor.

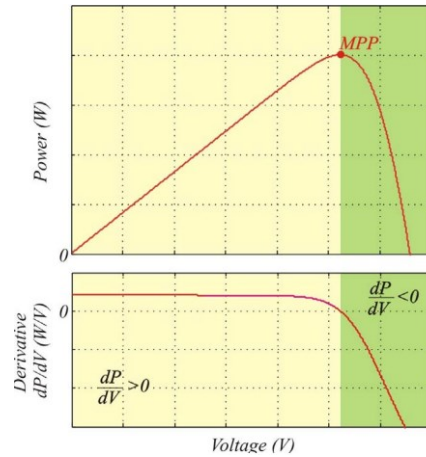


Figura 26: Potência de saída do painel e a respectiva derivada em relação à tensão de saída do painel [8].

Comparativamente ao método anterior, apesar de utilizar o mesmo número de sensores, apresenta uma resposta mais rápida e dinâmica pois não é influenciada pelas condições climáticas. É um método mais complexo e apresenta poucas oscilações em torno do ponto MPP.

- **Base pulsada de curto-circuito:** Este algoritmo é baseado na característica fotovoltaica de tensão-corrente, onde o ponto de corrente para a potência máxima, I_{mpp} , é diretamente proporcional à corrente de curto-circuito, I_{sc} , através do fator k_{sc} :

$$I_{mpp} = k_{sc} I_{sc} \quad (2)$$

O fator k_{sc} mantém-se contante num intervalo considerável de valores de temperatura e radiação, sendo que o valor do mesmo depende do módulo fotovoltaico escolhido, tendo-se então $k_{sc} = 0,92$.

Uma das desvantagens deste método advém do facto de ser necessário medir o valor de I_{sc} de forma periódica, contudo durante o curto-circuito não há transferência de potência para a carga.

- **Base pulsada de circuito aberto:** Analogamente ao método anterior este também é baseado na característica fotovoltaica de tensão-corrente, aplicando um raciocínio semelhante, neste método, o ponto de tensão para a potencia máxima, V_{mpp} , é diretamente proporcional à tensão de circuito aberto, V_{oc} , através do fator k_{oc} :

$$V_{mpp} = k_{oc} V_{oc} \quad (3)$$

O fator k_{oc} , como constatado anteriormente, mantém-se contante num intervalo considerável de temperatura e radiação, e o valor do mesmo depende, também, do tipo de módulo fotovoltaico escolhido. Para módulos mais recentes, tem-se um valor de $k_{oc} = 0,76$.

Este método tem como desvantagem o intervalo necessário para medir a tensão de circuito aberto, pois há uma dissipação de energia quando a carga se encontra desacoplada do dispositivo fotovoltaico.

3. Modelo do Sistema

No presente capítulo são abordados os modelos associados às ligações entre o painel fotovoltaico e a bateria, explorando o modelo ideal para a obtenção máxima de proveito energético, com o intuito de carregar a bateria.

3.1. Produção fotovoltaica

Neste subcapítulo serão explorados os fundamentos da produção fotovoltaica, destacando o princípio de funcionamento, o aprofundamento teórico do modelo matemático do painel escolhido e o respectivo dimensionamento.

3.1.1. Princípio de funcionamento

É um processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Este processo é possível através de células solares, tipicamente de silício.

A luz solar, ao incidir na célula solar, permite a absorção da energia dos fótons por parte do material semicondutor. Esta energia provoca excitação nos elétrons, fazendo com que os elétrons se movam e criem um fluxo de corrente elétrica.

3.1.2. Painel Fotovoltaico em estudo

No presente projeto foi escolhido o sistema WS150EFX-HV produzido pelo fabricante *Wattstunde* (<https://www.wattstunde.de/>), e o respectivo catálogo pode ser encontrado no anexo B. Seguidamente são apresentados na Tabela 6 os principais parâmetros a considerar.

Tabela 6: Parâmetros do painel em estudo.

Parâmetros	HG-L535-72CW
Potência Máxima, P_{max} (Wp)	535
Tensão Máxima, $V_{máx}$ (V)	41,50
Corrente Máxima, $I_{máx}$ (A)	12,90
Tensão de circuito aberto, V_{oc} (V)	50,05
Corrente de curto-circuito, I_{sc} (A)	13,83
Número de Células, NC	70
Comprimento, C (mm)	2282 ± 2
Largura, L (mm)	1137 ± 2
Temperatura de referência, T_{ref} (°C)	25
Radiação de referência, G_{ref} (W/m ²)	1000

3.1.3. Modelo matemático

O modelo equivalente associado a uma célula, representado na Figura 27, obtém-se a partir de junção PN, acrescentando o termo correspondente à corrente I_{ph} , proporcional à luminosidade, assim como um termo representativo dos fenômenos internos.

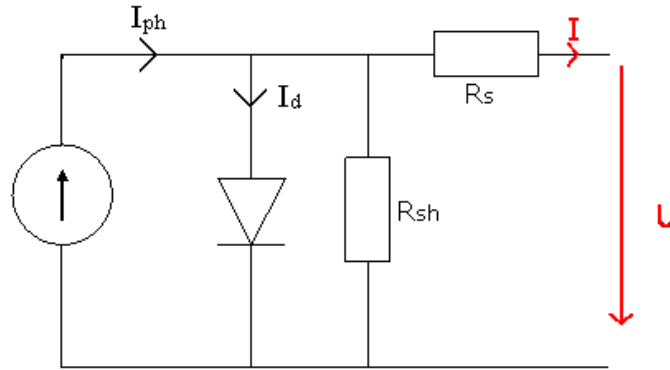


Figura 27: Esquema equivalente de uma célula fotovoltaica [19].

Assim a corrente na célula pode ser dada por:

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left[e^{\frac{q(U+R_s I)}{kT}} - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$I_d = I_{0d} \left[e^{\frac{q(U+R_s I)}{kT}} - 1 \right] \quad (5)$$

Onde:

I_{0d} – Corrente de saturação do díodo (A);

R_s – Resistência série (Ω);

R_{sh} – Resistência shunt (Ω);

k – Constante de boltzman ($k = 1,38 \times 10^{-23}$);

q – Carga do eletrão;

T – Temperatura dá célula ($^{\circ}\text{K}$).

O díodo é um módulo do comportamento da célula quando esta se encontra na obscuridade e a fonte de corrente representa a corrente I_{ph} gerada pela luminosidade.

Tendo em conta as duas resistências que modelizam as perdas internas:

- Resistência série R_s : Perdas por efeito Joule;
- Resistência shunt R_{sh} : Perdas devido a correntes parasitas que circulam na célula.

Considerando uma situação ideal, despreza-se o termo $R_s U$ face a U , trabalhando assim com um modelo simplificado, descrito pela equação:

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - \frac{U}{R_{sh}} \quad (6)$$

Sabendo ainda que $R_{sh} \gg R_s$, pode desprezar-se a corrente que por ela circula, ficando com:

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (7)$$

Sendo assim possível deduzir o esquema equivalente simplificado:

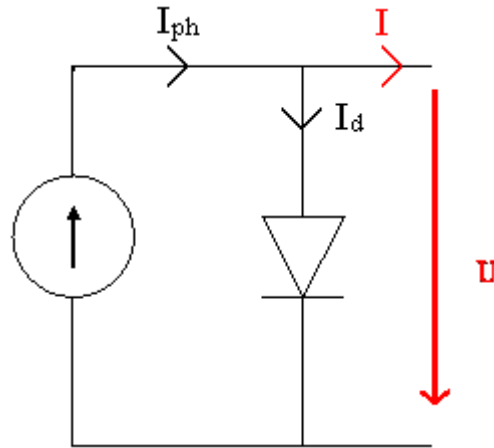


Figura 28: Esquema equivalente simplificado [19].

O esquema em estudo no projeto será o esquema real de uma célula fotovoltaica, ilustrado na Figura 29.

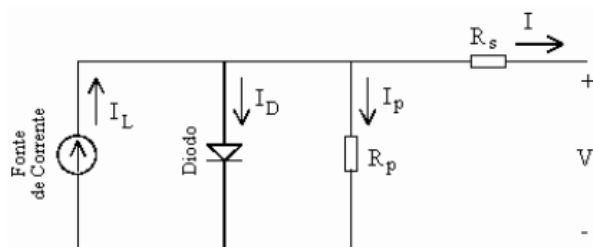


Figura 29: Esquema real de uma célula fotovoltaica [10].

Do esquema real de uma célula fotovoltaica, ilustrado em cima, é possível obter o esquema do painel fotovoltaico. Será necessário, então, ter em consideração o número de módulos em série e em paralelo

e a forma como os díodos em série e em paralelo serão associados mediante o número de células. O valor das resistências equivalentes será diferente consoante o número de células em série e em paralelo.

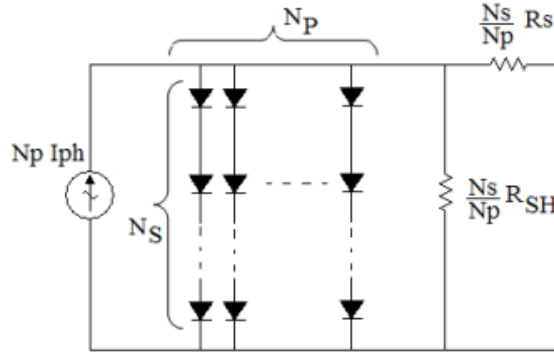


Figura 30: Esquema real do painel fotovoltaico [26].

Para efeitos de simplicidade, o dimensionamento será feito considerando o esquema real da célula fotovoltaica, representada na Figura 29.

Da análise dos nós, retira-se que:

$$I = I_L - I_D - I_P \quad (8)$$

Será então necessário calcular os parâmetros um a um, começando pela corrente que circula pelo díodo:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V+R_S I}{mV_t}} - 1 \right) \quad (9)$$

Onde o potencial térmico, V_t , e o respetivo valor de referência, V_{Tref} , são dados por (10) e (11):

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (10)$$

$$V_{Tref} = \frac{KT_{ref}}{q} \quad (11)$$

Sendo os parâmetros usados nas equações:

- I – Corrente entregue à carga [A];
- I_L – Corrente fotovoltaica [A];
- I_D – Corrente que circula pelo díodo [A];
- I_P – Corrente da carga em paralelo [A];
- I_0 – Corrente inversa de saturação [A];
- V – Tensão aos terminais do painel fotovoltaico [V];
- R_S – Resistência em série [Ω];
- m – fator de idealidade do painel fotovoltaico;
- V_t – Potencial Térmico [V];
- K – Constante de Boltzmann ($K = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

- T – Temperatura na célula fotovoltaica em Kelvin (K);
- T_{ref} – Temperatura de referência da célula fotovoltaica em Kelvin (K);
- q – Carga do elétron em Coulomb ($q = 1,6 \times 10^{-19}C$)

A corrente que circula pela carga em paralelo (Figura 29) é dada por:

$$I_p = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (12)$$

Substituindo a equação (12) na equação (8), obtém-se a equação (13).

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V + R_s I}{mV_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (13)$$

Resolvendo em ordem à tensão, V , a tensão aos terminais do painel fotovoltaico fica:

$$V = mV_T \ln \left(\frac{I_L - \frac{V + R_s I}{R_p} - I}{I_0} + 1 \right) \quad (14)$$

Considerando as unidades de grandeza aplicadas no dimensionamento do painel fotovoltaico, será necessário obter a relação da temperatura ambiente, θ_c , e da temperatura de trabalho da célula em Kelvin, T .

$$\theta_c = \theta_{amb} + \frac{G(NOCT - 20)}{800} \quad (15)$$

$$T = \theta_c + 275,15 \quad (16)$$

Os parâmetros são dados por:

- G – Radiação incidente na célula [W/m^2];
- $NOCT$ – Temperatura da célula de operação normal em graus Celsius [$^{\circ}C$];
- θ_{amb} – Temperatura ambiente [$^{\circ}C$];
- θ_c – Temperatura da célula [$^{\circ}C$].

De seguida serão calculados os fatores relacionados com a corrente inversa de saturação do díodo, I_0 . Primeiramente será obtida a corrente inversa de saturação do díodo para as condições de referência, I_{or} .

Para tal, deve ter-se em conta o esquema simplificado da célula fotovoltaica, Figura 28, funcionando em circuito aberto, onde $I = 0$ A e $I_L = I_{SC}$, ao aplicar a lei dos nós tem-se:

$$\begin{aligned}
I = I_L - I_{or} \left(e^{\frac{V_{ca}}{mV_{Tref}}} - 1 \right) &\Leftrightarrow 0 = I_{sc} - I_{or} \left(e^{\frac{V_{ca}}{mV_{Tref}}} - 1 \right) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow I_{or} = \frac{I_{sc}}{\left(e^{\frac{V_{ca}}{mV_{Tref}}} - 1 \right)} \quad (17)
\end{aligned}$$

O fator de idealidade é obtido tendo em consideração o esquema simplificado da célula fotovoltaica da Figura 28. Substituindo na lei dos nós as grandezas já obtidas, fica-se com:

$$I = I_L - I_d \Leftrightarrow I = I_L - I_o \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \Leftrightarrow I_{max} = I_{sc} - I_{or} \left(e^{\frac{V_{max}}{mV_{Tref}}} - 1 \right) \quad (18)$$

Resolvendo em ordem ao fator de idealidade m , e substituindo a corrente inversa de saturação do díodo para as condições de referência I_{or} pela equação (17), tem-se:

$$m = \frac{V_{max} - V_{ca}}{V_{Tref} \ln \left(1 - \frac{I_{max}}{I_{sc}} \right)} \quad (19)$$

O fator de idealidade da célula é dado por:

$$m' = \frac{m}{NS} \quad (20)$$

Onde os parâmetros usados nas equações são:

- I_{max} – Corrente no ponto máximo de potência [A];
- I_{or} – Corrente inversa de saturação para as condições de referência [A];
- I_{sc} – Corrente de curto-circuito [A];
- m' – Fator de idealidade da célula;
- NS – Número de células em série;
- V_{ca} – Tensão de circuito aberto [V];
- V_{max} – Tensão no ponto máximo [V].

Para a corrente inversa de saturação do díodo, serão tidas em conta as propriedades da célula fotovoltaica, pelo que se tem:

$$\begin{aligned}
\begin{cases} I_{or} = T_{ref}^3 e^{\left(-\frac{\varepsilon}{mV_{Tref}} \right)} \\ I_0 = T_{FV}^3 e^{\left(-\frac{\varepsilon}{mV_T} \right)} \end{cases} &\Leftrightarrow \frac{I_0}{I_{or}} = \frac{T_{FV}^3 e^{\left(-\frac{\varepsilon}{mV_T} \right)}}{T_{ref}^3 e^{\left(-\frac{\varepsilon}{mV_{Tref}} \right)}} \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow I_0 = I_{or} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{\varepsilon}{m' \left(V_{Tref} - V_T \right)}} \quad (21)
\end{aligned}$$

Onde os parâmetros são:

- ε – Hiato de silício [$\varepsilon = 1,12$ eV];

A corrente de curto-circuito varia linearmente com a radiação incidente, e pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$I_{sc} = I_{scr} \frac{G}{G_{ref}} \quad (22)$$

Para os restantes parâmetros a dimensionar, devem ter-se em consideração o esquema simplificado da célula fotovoltaica e os seus dois estados de funcionamento em circuito aberto e curto-circuito. Para o funcionamento em curto-circuito, será determinada a corrente da fonte, I_L .

Nas condições de curto-circuito a tensão será nula e a corrente no díodo também será nula.

Assim, considerando as condições de curto-circuito, tem-se:

$$I_L = I_{scr} \frac{G}{G_{ref}} = [I_{sc} + K_i(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (23)$$

Onde K_i é o coeficiente da corrente em função da temperatura.

Para o circuito aberto, a tensão aos terminais do painel representa o valor máximo de tensão gerada no circuito.

Condições de circuito aberto $I = 0$ A.

Considerando as condições indicadas acima, tem-se:

$$U = V_{ca} = mV_T \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_0} \right) \quad (24)$$

A eficiência do painel fotovoltaico diminui durante a operação devido à dissipação de potência por meio das resistências internas do circuito, a resistência série, R_s , e a resistência em paralelo, R_p .

As variações das resistências acima indicadas irão influenciar as curvas I-V, como se pode observar na Figura 31.

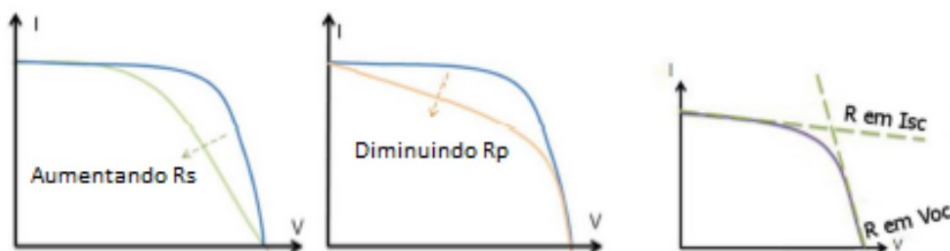


Figura 31: Influência das resistências internas nas curvas I-V do painel [28].

É de salientar ainda que, num modelo fotovoltaico ideal, a resistência em paralelo seria infinita, de forma a não oferecer um caminho alternativo à corrente. Por sua vez, a resistência em série seria nula para não provocar quedas de tensão.

O próximo passo será a determinação dos parâmetros observados na Figura 31, pelo que terá de se calcular a potência para o ponto ótimo de funcionamento do painel. É imposto que a resistência em série R_s seja nulo para se determinar o valor da resistência em paralelo.

$$\begin{aligned} P_{max} &= V_{max} I_{max} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_{max} &= V_{max} \left\{ I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{q}{kT} \frac{V_{max} + R_s I_{max}}{N_s} - 1 \right)} - \frac{V_{max} + R_s I_{max}}{R_p} \right] \right\} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow R_p &= R_{pmin} = \frac{V_{max}}{I_{sc} - I_{max}} - \frac{V_{ac} - V_{max}}{I_{max}} \end{aligned} \quad (25)$$

Tendo em conta o valor da resistência em paralelo e analisando a Figura 29, pode calcular-se o valor da resistência em série através do divisor de corrente:

$$I_L = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc} \Leftrightarrow R_s = \frac{I_L R_p}{I_{sc}} - R_p \quad (26)$$

3.1.4. Dimensionamento do Painel Fotovoltaico

Tendo obtido o modelo anterior, é possível dimensionar o painel fotovoltaico, pelo que para efeitos de cálculos é considerada uma radiação solar incidente, G , de 1000 W/m^2 e uma temperatura ambiente, θ_{amb} , de 25°C .

Os parâmetros determinados no subcapítulo acima estão apresentados na Tabela 7, juntamente com o número da equação utilizada.

Tabela 7: Parâmetros do dimensionamento do PV.

Parâmetro	Valor obtido	Equação nº
θ_{amb}	25°C	-
G	1000 W/m^2	-
$NOCT$	25°C	-
θ_c	$31,25^\circ\text{C}$	15
T	$304,4 \text{ K}$	16
T_{ref}	$298,15 \text{ K}$	16
V_t	$0,0257 \text{ V}$	10
V_{tref}	$0,0242 \text{ V}$	11
m	$164,20$	19
N_S	36	-
m'	$4,56$	20
I_{0r}	$9,30 \times 10^{-05} \text{ A}$	17
I_0	$9,89 \times 10^{-05} \text{ A}$	21
R_p	$30,56 \Omega$	25
I_L	$14,59 \text{ A}$	23
R_s	$0,1 \Omega$	26

3.1.5. Simulação das curvas corrente-tensão (I-V)

Para a simulação das curvas de corrente-tensão recorreu-se ao *software* de simulação “*MATLAB*” e “*Simulink*”. A versão utilizada é a R2016b. A simulação é implementada no “*Simulink*”, onde através da sua biblioteca é possível modelar e efetuar simulações gráficas. Já no “*MATLAB*” é implementado o código que irá definir os valores a serem lidos pelo sistema modelo em “*Simulink*”.

Para o código introduzido em “*MATLAB*”, tiveram-se em consideração as equações (8) a (26). O respetivo código pode analisar-se no anexo C e o sistema implementado encontra-se representado no anexo D, tornando possível a verificação da veracidade dos modelos obtidos.

As curvas características do painel corrente-tensão e potência-tensão encontram-se representadas no anexo E, para diferentes valores de radiação incidente e temperatura ambiente. De seguida, são apresentadas as curvas do painel para as condições de referência do fabricante.

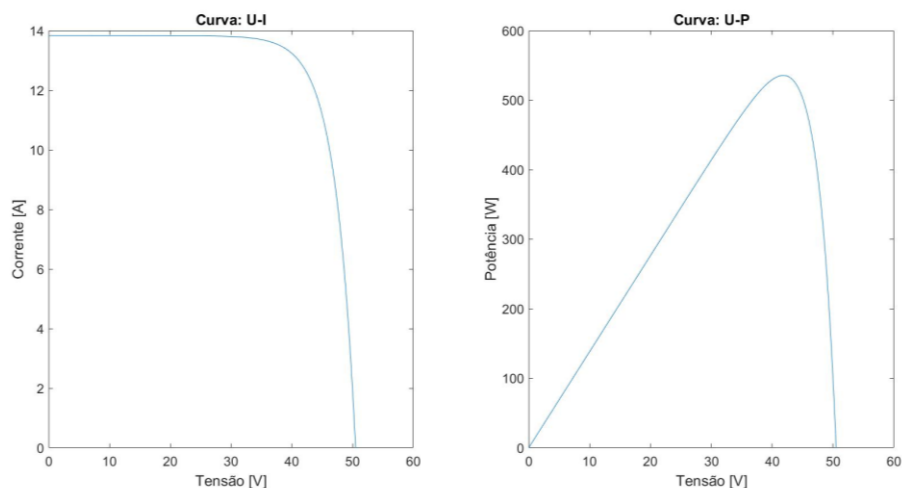


Figura 32: Simulação das curvas do painel fotovoltaico para as condições $G=G_{ref}=1000 \text{ W/m}^2$ e $T=T_{ref}=25^\circ\text{C}$. No eixo das abcissas, tensão com escala de 10 V/DIV . No eixo das ordenadas à esquerda, corrente com escala 2 A/DIV , à direita, potência com escala 100 W/DIV .

3.2. Conversores DC/DC

A obtenção do modelo de conversores existentes entre o painel fotovoltaico e a bateria explora a utilização de dois tipos de conversores não isolados, devido à existência de uma terra em comum que permite a passagem direta de corrente entre a entrada e a saída.

Os dois tipos de conversores utilizados, tratam-se do conversor elevador e do conversor quadrático. Este último é uma topologia associada aos conversores elevadores de tensão [8], [34].

O objetivo deste capítulo consiste na explicação do funcionamento de cada modelo de conversor considerado e o respetivo dimensionamento. Serão então exploradas três soluções distintas: a primeira utilizando um conversor quadrático com controlo MPPT, a segunda usando um conversor quadrático com controlo de corrente e tensão e a terceira utilizando um conversor elevador com controlo de tensão e corrente.

Aos conversores utilizados em cada modelo considerado é associado um tipo de controlo que, mediante a escolha, irá possibilitar um modo de funcionamento distinto entre eles. O tipo de controlo em análise irá atuar na abertura e no fecho dos interruptores dos conversores considerados.

Os interruptores em questão podem ser TBJ, transístores de junção bipolar, MOSFET, transístores de efeito de campo semiconductor de óxido metálico ou IGBT e transístores bipolares de porta isolada.

A utilização específica de interruptores irá depender do tipo de utilização, isto é, para tensões de operação inferiores a 250 V e para sistemas com potência até 500 W é recomendada a utilização de MOSFET. Caso o sistema seja alimentado por tensões de operação superiores a 1000 V e com potência acima de 5 kW , é preferível recorrer a IGBT.

Relativamente à comutação, para o MOSFET as frequências de comutação podem ser superiores a 200 kHz. Por outro lado, o IGBT apenas funciona com frequências de comutação até 20kHz [22].

3.2.1. Conversor elevador

O modelo do conversor elevador conforme [16], também denominado de *boost*, será implementado em software de simulação mediante a seguinte representação.

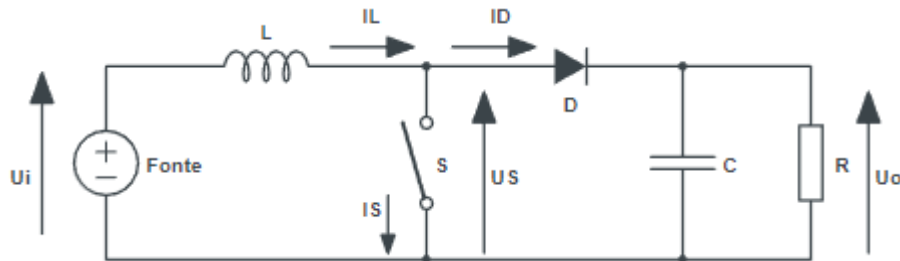


Figura 33: Conversor elevador de tensão a utilizar em simulação. Adaptação da representação em [17].

O conversor acima representado, permite elevar e regular a tensão de saída (U_o), sendo que o valor de tensão observado à entrada (U_i) será menor comparativamente ao valor de tensão observado à saída (U_o). A relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada ($\frac{U_o}{U_i}$) tem a designação de ganho. A variação do ganho é efetuada recorrendo ao ciclo de trabalho, representado por δ e assume valores compreendidos no intervalo $[0,1; 0,9]$.

O ciclo de trabalho também pode ser caracterizado pelo intervalo de tempo em que o interruptor (S) do conversor se encontra fechado ou aberto. O estado do interruptor dita o funcionamento do conversor em estudo.

Assim, quando o interruptor (S) se encontra fechado, o diodo (D) ficará polarizado inversamente. Visto que para estas condições a fonte de tensão (U_i) irá apenas “afetar” o elemento indutivo (L), a corrente sobre ela irá aumentar linearmente e dessa forma não irá existir passagem de corrente para a carga (R).

Por sua vez, no instante em que interruptor (S) abrir, o diodo já será polarizado diretamente e toda a energia armazenada pelo elemento indutivo (L) juntamente com a energia da fonte (U_i) será conduzida até ao elemento capacitivo (C) e até à carga (R), explicando assim o porquê do valor de tensão à saída (U_o) ser maior em relação ao valor de tensão à entrada (U_i).

O comportamento da tensão e da corrente no elemento indutivo mediante o estado do interruptor é ilustrado na Figura 34.

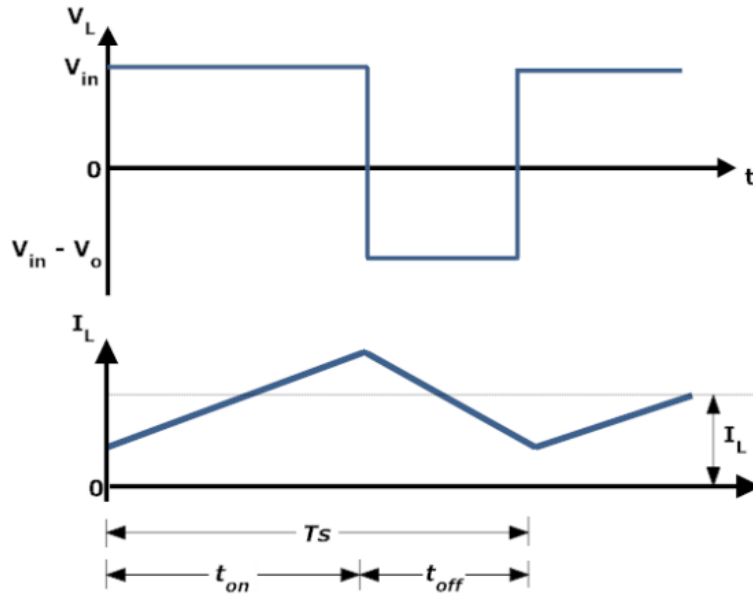


Figura 34: Evolução temporal da tensão (em cima) e da corrente (em baixo) no elemento indutivo [14].

A tensão média aos terminais da bobine, definida por V_L , pode ser definida num sistema de equações através da definição dos respetivos intervalos tendo em conta a Figura 34.

$$V_L(t) = \begin{cases} +U_i, & 0 < T < t_{on} \\ +U_i - U_o, & t_{on} < T < T_s \end{cases} \quad (27)$$

Atendendo à equação genérica do valor médio:

$$X_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (28)$$

Sendo X_{av} o valor médio de uma equação e $x(t)$ uma evolução temporal.

Aplicando à tensão média da bobine,

$$V_{Lav} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_L(t) dt \Rightarrow V_{Lav} = \frac{1}{T_s} \left[\int_0^{t_{on}} U_i dt + \int_{t_{on}}^{T_s} (U_i - U_o) dt \right] \quad (29)$$

Considere-se o ciclo de trabalho definido por δ que será o intervalo de tempo em que o interruptor está aberto e T_s como um período de abertura e fecho do interruptor. Sabendo que em regime permanente o valor médio é nulo, temos a seguinte equação:

$$0 = \frac{1}{T_s} [U_i \delta T_s + (U_i - U_o)(T_s - \delta T_s)] \quad (30)$$

Daqui obtém-se o ganho:

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 - \delta} \quad (31)$$

Com base na equação (31), obtém-se o gráfico da Figura 35, representativo do ganho em função do ciclo de trabalho. Sabendo previamente os valores de entrada, é possível efetuar uma análise dos valores de tensão que são pretendidos à saída.

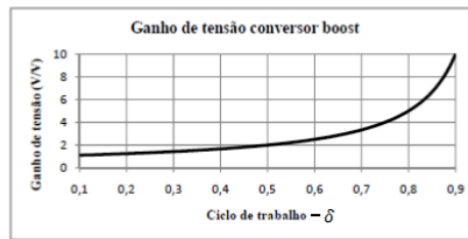


Figura 35: Ganho do conversor em função do ciclo de trabalho [16].

O ciclo de trabalho é descrito por:

$$\delta = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (32)$$

Sendo os parâmetros das equações:

- V_L – Tensão na bobina [V];
- U_i – Tensão de entrada no conversor [V];
- U_o – Tensão de saída do conversor [V];
- V_{Lav} – Tensão média na bobine [V];
- T_s – Período de comutação [s];
- t_{on} – Período de comutação em que o interruptor está aberto [s];
- δ – Ciclo de trabalho.

Definindo antecipadamente os valores de tensão à saída e considerando que os parâmetros serão determinados a partir de condições normais de funcionamento, é determinado o ciclo de trabalho tendo em conta a equação (31).

$$\delta = 1 - \frac{U_i}{U_o} \quad (33)$$

Será necessário obter a tensão de comando (U_c) para efetuar a comparação com uma onda portadora, definida por uma amplitude A e uma frequência de comutação f_s . Dessa comparação, surge a possibilidade de controlar o interruptor.

$$U_c = A\delta \quad (34)$$

Em condições de referência, sabe-se previamente o valor da corrente de entrada do conversor, possibilitando obter, segundo a equação (31), o valor de corrente à saída do conversor:

$$I_o = (1 - \delta)I_{in} \quad (35)$$

Através da lei de Ohm, é possível obter o valor da corrente de carga, R_0 .

$$I_o = \frac{U_o}{R} = \frac{U_i}{R} \frac{1}{1 - \delta} \Leftrightarrow R = \frac{U_i}{I_{in}(1 - \delta)^2} \quad (36)$$

Sendo os parâmetros das equações:

- U_i – Tensão à entrada do conversor [V];
- U_o – Tensão à saída do conversor [V];
- I_{in} – Corrente à entrada do conversor [A];
- I_o – Corrente à saída do conversor [A];
- R – Resistência de carga [Ω].

Serão considerados para efeitos de dimensionamento valores definidos num intervalo entre 10% e 20%, para a ondulação da corrente de entrada Δi_i e para a ondulação da tensão de saída ΔU_o do conversor.

Seguidamente, serão calculados os restantes elementos constituintes do conversor, a bobine e o conversor. O dimensionamento da bobine é efetuado considerando uma variável de funcionamento do conversor, definida por γ .

$$\gamma = \begin{cases} 0 \Rightarrow S \text{ ao corte e } D \text{ à condução,} & ton < T < T_s \\ 1 \Rightarrow S \text{ conduz e } D \text{ ao corte,} & 0 < T < ton \end{cases} \quad (37)$$

Assim é possível implementar a equação diferencial, que descreve o comportamento da corrente na bobine em função do tempo. Considerando ainda que a tensão de saída U_o é constante:

$$U_o = U_{oav} \quad (38)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{U_i - \gamma U_o}{L} \quad (39)$$

Ao integrar ambos os membros da equação e considerando o estado de funcionamento $\gamma = 0$, onde I_L irá corresponder ao valor inicial da corrente em cada intervalo de tempo T :

$$\begin{aligned} I_L(t) &= \frac{U_i}{L}(T - \gamma \delta T_s) - \frac{U_o}{L} \gamma (T - \delta T_s) + I_L(t_{on}) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow I_L(t) - I_L(\gamma t_{on}) &= \frac{U_i}{L}(T - \gamma \delta T_s) \Leftrightarrow \Delta I_L = \frac{U_i}{L} \delta T_s \end{aligned} \quad (40)$$

Resolvendo em ordem ao parâmetro indutivo (L), fica-se com:

$$L = \frac{U_i}{\Delta I_L} \delta T_s \quad (41)$$

Supondo que a tensão de saída U_o corresponde a uma variação linear de valor inicial definido por $U_o + \left(\frac{\Delta U_o}{2}\right)$ e ainda que $t_{on} = \delta T_s$:

$$\begin{aligned} I_o &= -C \frac{d}{dt} U_o \Leftrightarrow \frac{d}{dt} U_o = -\frac{I_o}{C} \Leftrightarrow U_o = \int -\frac{I_o}{C} dt \\ \Leftrightarrow U_o &= -\frac{I_o}{C} t + U_o + \frac{\Delta U_o}{2} \Leftrightarrow U_o - \frac{\Delta U_o}{2} = -\frac{I_o}{C} t + U_o + \frac{\Delta U_o}{2} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{I_o}{C} \delta T_s = \Delta U_o \Leftrightarrow C = \frac{I_o}{\Delta U_o} \delta T_s \end{aligned} \quad (42)$$

3.2.2. Conversor quadrático

Como já referido anteriormente, este conversor está associado às topologias de conversores elevadores, com a distinção do elevado ganho. Esquemáticamente, é possível descrever este conversor através de uma associação em série de dois conversores elevadores, utilizando apenas um interruptor de comando.

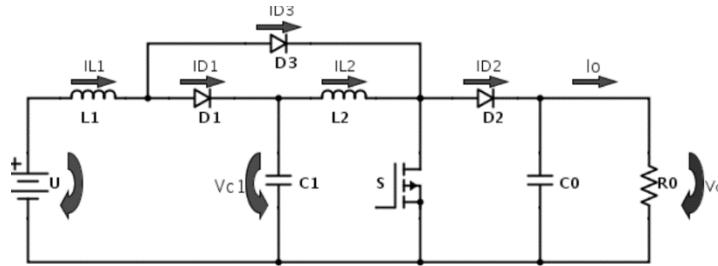


Figura 36: Modelo do conversor quadrático a simular [34].

Analogamente ao foi explicado anteriormente, este conversor apresenta dois estados de funcionamento que estão relacionados com o estado do interruptor (S).

Assim, no instante em que o interruptor (S) fecha, os díodos D_1 e D_2 ficam inversamente polarizados e o díodo D_3 fica diretamente polarizado, criando-se uma malha fechada onde a corrente circula pelo díodo D_3 . Simultaneamente, o condensador C_1 transfere a energia armazenada para o elemento indutivo L_2 e a carga (R_0) recebe energia apenas do condensador C_0 .

No instante em que o interruptor (S) abre, os estados dos díodos são permutados, com os díodos D_1 e D_2 agora diretamente polarizados e com o díodo D_3 inversamente polarizado. Com o interruptor (S) aberto, a corrente percorre o circuito todo, garantido a magnetização dos elementos indutivos (L_1 e L_2) e o carregamento do elemento capacitivo (C_0).

Para o dimensionamento, consideraram-se dois modos de funcionamento, que são acompanhados da respetiva análise de malhas:

1- MOSFET S fechado (on):

$$\begin{cases} -U + V_{L_1} = 0 \\ -V_{C_1} + V_{L_2} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} V_{L_1} = U \\ V_{L_2} = V_{C_1} \end{cases} \quad (43)$$

2- MOSFET S aberto (off):

$$\begin{cases} -U + V_{L_1} + V_{C_1} = 0 \\ -V_{C_1} + V_{L_2} + V_0 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} V_{L_1} = U - V_{C_1} \\ V_{L_2} = V_{C_1} - V_0 \end{cases} \quad (44)$$

De seguida, são considerados dois momentos de funcionamento definidos por:

$$\gamma = \begin{cases} 1, & 0 < t < ton \\ 0, & ton < t < T \end{cases}$$

Aplicando os momentos de funcionamento às equações (43) e (44), tem-se que:

$$V_{L_1} = \begin{cases} U, & \Rightarrow \gamma = 1 \\ U - V_{C_1}, & \Rightarrow \gamma = 0 \end{cases} \quad (45)$$

$$V_{L_2} = \begin{cases} V_{C_1}, & \Rightarrow \gamma = 1 \\ V_{C_1} - V_0, & \Rightarrow \gamma = 0 \end{cases} \quad (46)$$

Considerando regime permanente, o valor médio das tensões aos terminais da bobine L_1 e L_2 é dado por:

$$V_{L_{1av}} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\delta T} U dt + \int_{\delta T}^T (U - V_{C_1}) dt \right] = \frac{1}{T} [U\delta T + (U - V_{C_1})(T - \delta T)] = 0 \quad (47)$$

$$V_{L_{2av}} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\delta T} V_{C_1} dt + \int_{\delta T}^T (V_{C_1} - V_0) dt \right] = \frac{1}{T} [V_{C_1}\delta T + (V_{C_1} - V_0)(T - \delta T)] = 0 \quad (48)$$

$$V_{L_{1av}} = V_{L_{2av}} = 0 \quad (49)$$

Assim, tem-se que a relação $\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{V_0}{U}$ é dada por:

$$U_{in} = U_{out}(1 - \delta)(1 - \delta) \Rightarrow \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{(1 - \delta)^2} \quad (50)$$

O valor médio da corrente na carga, I_0 , em regime permanente, pode ser determinado através da lei de Ohm pelo valor médio da tensão, U_{out} , pois considera-se $V_{R_0} = U_{out}$.

$$I_0 = \frac{U_{out}}{R_0} = \frac{1}{(1 - \delta)^2} \frac{U_{in}}{R_0} \quad (51)$$

Em alternativa à equação (50), através de uma análise análoga, pode obter-se:

$$\frac{I_0}{I_{in}} = (1 - \delta)^2 \Leftrightarrow I_0 = I_{in}(1 - \delta)^2 \quad (52)$$

Da relação obtida na equação (50), é possível obter o fator ciclo:

$$\delta = 1 - \sqrt{\frac{U_{in}}{U_{out}}} \quad (53)$$

Tendo em consideração a natureza contínua das correntes presentes no conversor, estas apresentam oscilações devido aos elementos reativos que se encontram presentes no circuito.

É possível descrever o comportamento da corrente através de uma equação diferencial.

$$\frac{di_{L_1}}{dt} = \frac{V_{L_1}}{L_1} \quad (54)$$

Supondo que a corrente I tem uma variação linear:

$$\frac{\Delta L_1}{\Delta t} = \frac{V_{L_1}}{L_1} \quad (55)$$

Em regime permanente, para V_{L_1} , tem-se:

$$V_{L_1} = \begin{cases} U, & 0 < t < ton, \gamma = 1 \\ U - V_{c_1}, & ton < t < T, \gamma = 0 \end{cases} \quad (56)$$

Para o instante onde o MOSFET se encontra à condução, onde $\Delta t = \delta T$ e $T = \frac{1}{f_{PWM}}$:

$$\Delta i_{L_1} = \frac{\delta U_{in}}{L_1 f_{PWM}} \Rightarrow L_1 = \frac{\delta U_{in}}{\Delta i_{L_1} f_{PWM}} \Rightarrow \delta(1 - \delta)^2 \frac{V_o}{\Delta i_{L_1} f_{PWM}} \quad (57)$$

Para o elemento indutivo, L_2 , o raciocínio será análogo ao anterior:

$$V_{L_2} = \begin{cases} \delta U_{in}, & 0 < t < ton, \quad \gamma = 1 \\ V_{c_1} - V_o, & ton < t < T, \quad \gamma = 0 \end{cases} \quad (58)$$

Considerando, novamente, o instante onde o MOSFET está à condução:

$$\Delta i_{L_2} = \frac{\delta U_{in}}{L_2 f_{PWM}(1 - \delta)} \Rightarrow L_2 = \frac{\delta U_{in}}{\Delta i_{L_2} f_{PWM}(1 - \delta)} = \delta(1 - \delta) \frac{V_o}{\Delta i_{L_2} f_{PWM}} \quad (59)$$

Das equações (57) e (59), é possível retirar os respectivos parâmetros das bobinas:

$$\begin{cases} L_1 = \frac{U_{in} \delta}{\Delta i_{L_1} f_s} \\ L_2 = \frac{U_{in} \delta}{(1 - \delta) \Delta i_{L_2} f_s} \end{cases} \quad (60)$$

Para o cálculo dos elementos capacitivos do conversor, considera-se o intervalo onde o MOSFET conduz ($0 < t < ton$) e onde a resistência de carga R_0 é alimentada diretamente pelo condensador C_0 .

$$I_0 = \frac{V_o}{R_0} = C_0 \frac{d}{dt} V_o \quad (61)$$

Para uma variação lenta de V_o , $\Delta V_o \ll V_o$:

$$C_0 \frac{dV_o}{dt} \approx \frac{V_o}{R_0} = C_0 \frac{\Delta V_o}{\Delta t} \quad (62)$$

Através da equação (50) e resolvendo em ordem a V_0 :

$$\Delta V_o = \frac{\delta U_{in}}{(1 - \delta)^2 C_0 R_0 f_{PWM}} \quad (63)$$

Da equação (63), resolve-se em ordem a C_0 e fica-se com:

$$C_0 = \frac{\delta U_{in}}{(1 - \delta)^2 \Delta V_{C_0} R_0 f_{PWM}} \quad (64)$$

O comportamento do condensador pode ser descrito por:

$$i_{C_1} = C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} \quad (65)$$

Considerando o instante em que o MOSFET se encontra a conduzir, as correntes no elemento indutivo, L_2 , e no elemento capacitivo C_1 , serão iguais.

$$i_{C_1} = i_{L_2} = C_1 \frac{\Delta V_{C_1}}{\Delta t} \quad (66)$$

A corrente na bobina L_2 pode ser descrita por:

$$I_{L_2} = \frac{1}{(1 - \delta)} I_0 \quad (67)$$

É a partir desta equação (67) que se obtém a fórmula do tremor de tensão, ΔV_{C_1} :

$$\Delta V_{C_1} = \frac{\delta U_{in}}{(1 - \delta) C_1 R_0 f_{PWM}} \quad (68)$$

Resolvendo em ordem a C_1 :

$$C_1 = \frac{\delta U_{in}}{(1 - \delta) \Delta V_{C_1} R_0 f_{PWM}} \quad (69)$$

3.2.3. Dimensionamento dos conversores

Neste capítulo são apresentados em Tabelas os valores obtidos para o dimensionamento dos conversores considerados anteriormente.

- Conversor Elevador:

Tabela 8: Parâmetros do dimensionamento do conversor elevador.

Parâmetro	Valor	Equação n°
U_{in}	41,50 V	-
U_{out}	420 V	-
δ	0,90	33
I_{in}	12,9 A	-
I_0	1,27 A	35
R	329,50 Ω	36
L	37,4 mH	41
C	1,1 mF	42

Para o cálculo do elemento indutivo, L , considerou-se uma frequência de comutação, f_s , de 10 kHz onde se obtém um período de comutação, T_s , de 0,1 ms e um valor de ondulação da corrente de entrada, $\Delta i_{L_{in}}$, de 0,1 A.

Para o cálculo do elemento capacitivo, C , utilizou-se uma frequência de comutação, f_s , de 10 kHz, onde se obtém um período de comutação, T_s , de 0,1 ms e um valor de ondulação da tensão de saída, $\Delta i_{v_{out}}$, de 0,1 V.

- Conversor Quadrático:

Tabela 9: Parâmetros do dimensionamento do conversor quadrático.

Parâmetro	Valor	Equação n°
U_{in}	41,50 V	-
U_{out}	860 V	-
δ	0,78	53
I_{in}	12,9 A	-
R_0	1381,5 Ω	51
I_0	0,6225 A	52
L_1	32,4 mH	60
L_2	147,4 mH	60
C_0	0,485 mF	64
C_1	0,11 mF	69

3.3. Controladores

De forma a obter o ponto ideal de funcionamento do sistema a implementar, é necessário estudar os pontos de máxima potência (MPPT). São explicados ao longo deste subcapítulo os métodos considerados.

3.3.1. Ponto de Máxima Potência (MPPT)

O algoritmo MPPT, ou seguidor do ponto de potência máxima irá otimizar a extração de energia obtida pela incidência de radiação solar no painel fotovoltaico.

Este algoritmo compara os valores de tensão e corrente à saída do módulo fotovoltaico com a tensão da bateria, fixando o ponto de melhor potência que o módulo consegue produzir para carregar a bateria, convertendo-a na melhor tensão com o objetivo de obter a corrente máxima na bateria.

O algoritmo MPPT em estudo neste sistema será o método da condutância incremental. O seu funcionamento é baseado nas medições de tensão e corrente em cada instante, calculando-se de seguida a potência de saída e a respetiva derivada em função da tensão $\left(\frac{dP}{dV}\right)$.

O valor da derivada irá influenciar o ciclo de trabalho, isto é, se a derivada for positiva, o ponto de funcionamento encontra-se à esquerda do MPPT, sendo o ciclo de trabalho aumentado.

Se a derivada for negativa, o ponto de funcionamento encontra-se à direita do ponto de MPPT e, por conseguinte, o ciclo de trabalho será reduzido.

Por fim, se a derivada for nula, o sistema encontra-se no ponto de funcionamento de máxima potência, mantendo-se o ciclo de trabalho num valor constante.

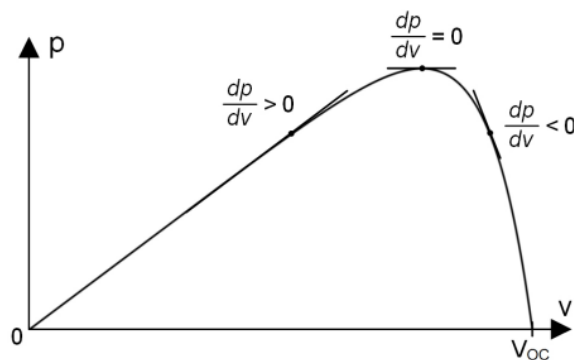


Figura 37: Evolução do sinal DP/DV em função da potência e tensão [15].

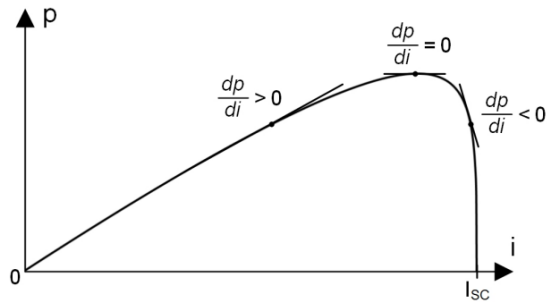


Figura 38: Evolução do sinal DP/DV em função da potência e corrente [15].

Sabendo que $P = VI$, a derivada $\frac{dP}{dV}$ pode ser obtida por:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} \quad (70)$$

Pelas regras da derivação, obtém-se:

$$\frac{dP}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (71)$$

Ficando assim com:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{[I(t) - I(t - 1)]}{[V(t) - V(t - 1)]} \quad (72)$$

Igualando a derivada obtida na equação (72) a 0, obtém-se o ponto de potência máxima.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow I + V \frac{[I(t) - I(t - 1)]}{[V(t) - V(t - 1)]} = 0 \quad (73)$$

Desta forma, determina-se o valor de corrente para o ponto de potência máxima, dado por:

$$I = -V \frac{[I(t) - I(t - 1)]}{[V(t) - V(t - 1)]} \quad (74)$$

Sendo t , um instante no tempo.

Da análise à Figura 37, verifica-se que a derivada da potência em ordem à tensão é positiva quando a potência em cada instante se encontra à esquerda do ponto de máxima potência, sendo que a potência obtida nesse instante será inferior à potência máxima possível de se gerar com o respetivo painel fotovoltaico. Para o caso de a derivada ser negativa verifica-se a situação inversa, assim, o ideal será o valor da derivada em ordem à tensão ser zero. Isto é possível se se controlar a corrente no elemento indutivo através do comando do interruptor, para a hipótese de a derivada ser positiva o controlo MPPT irá fazer subir a corrente no elemento indutivo, ou seja, o valor do ciclo de trabalho terá de ser ajustado, o que irá aumentar o tempo em que o interruptor ficará fechado.

De seguida, é demonstrado um quadro síntese dos pontos de funcionamento consoante o valor da derivada.

Tabela 10: Pontos de funcionamento e respetivas implicações.

Valor da Derivada	Relação entre correntes	Estado lógico do interruptor
$\frac{dP}{dU} < 0$	$I > I_{mppt}$	0
$\frac{dP}{dU} = 0$	$I \approx I_{mppt}$	1
$\frac{dP}{dU} > 0$	$I < I_{mppt}$	Mantém o estado do instante anterior (t-1)

Onde:

- I – Corrente na bobine;
- I_{mppt} – Corrente no ponto de potência máxima;
- 0 – Valor lógico correspondente ao estado de interruptor aberto;
- 1 – Valor lógico correspondente ao estado de interruptor fechado.

A simulação do controlo MPPT em associação com o conversor escolhido foi realizada em Simulink, onde se procedeu à implementação do diagrama de blocos da equação (72), obtendo-se a derivada da potência em ordem à tensão.

O diagrama de blocos possui como entradas os sinais de tensão e corrente aos terminais do painel fotovoltaico. De forma a obter os respetivos valores nos instantes $t-1$, recorreu-se ao bloco “memory”. Estas ligações entram num “mux”, que originará uma saída que ligará ao bloco de função fcn. É neste bloco que se insere a equação do cálculo da derivada da potência.

À saída do bloco fcn, foi implementado um controlador PI que permite obter uma resposta mais rápida e amortizada. Na saída do diagrama de blocos tem-se a tensão de comando, U_c . Este sinal irá ser utilizado como termo de comparação com uma onda triangular de referência, tomando o método de modulação por largura de impulso (PWM) como base. Daqui retira-se o ciclo de trabalho que será imposto ao interruptor comandado.

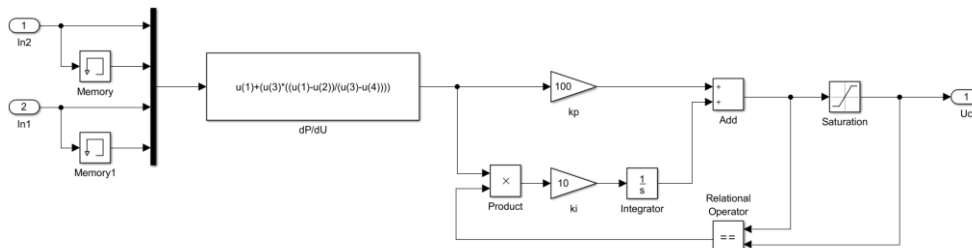


Figura 39: Diagrama de blocos do controle MPPT.

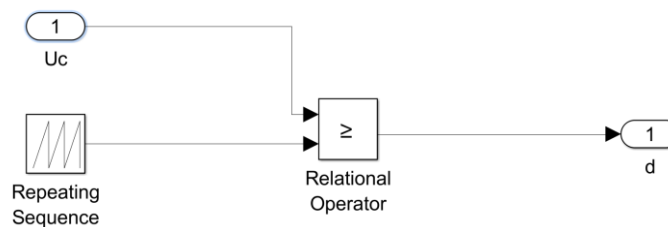


Figura 40: Diagrama PWM associado ao MPPT.

3.3.2. Controle de tensão

O controle de tensão conforme [40] será efetuado para o conversor elevador, Figura 33, e para o conversor quadrático, Figura 36, e tem como objetivo manter o valor de tensão pretendido no circuito em cadeia fechada. Tal é obtido independentemente de possíveis alterações na carga ou quaisquer fatores externos que possam afetar esse valor.

No entanto, tendo em consideração que a dinâmica da tensão de saída é consideravelmente mais lenta comparativamente à corrente de entrada, o controle de tensão será efetuado por meio de variações lentas da referência da corrente de entrada.

Considerando os conversores explorados no presente documento, a corrente no condensador pode ser obtida analisando a Figura 41.

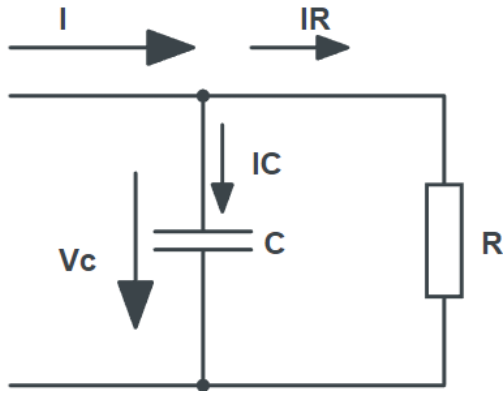


Figura 41: Circuito à saída do conversor.

Sabendo que a corrente no condensador é dada por (75),

$$I_C = C \frac{dV_C}{dt} \quad (75)$$

Pela lei dos nós, sabe-se que:

$$I = I_C + I_R \quad (76)$$

Considerando a corrente I como a corrente que se pretende controlar, ao colocar a corrente à saída da bobine (I_L) em função do ganho do conversor ($\frac{V_{out}}{V_{in}}$), obtém-se a seguinte equação:

$$C \frac{dV_{out}}{dt} = \frac{V_{in}}{V_{out}} I_L - I_R \quad (77)$$

Aplicando a transformada de Laplace em (77), fica-se com:

$$sCV_{out}(s) = \frac{V_{in}(s)}{V_{out}(s)} I_L(s) - I_R(s) \quad (78)$$

Resolvendo em ordem à tensão de saída, tem-se:

$$V_{out}(s) = \frac{\frac{V_{in}(s)}{V_{out}(s)} I_L(s) - I_R(s)}{sC} \quad (79)$$

De forma a simplificar os cálculos, ignora-se a parte negativa, $I_R(s)$.

Considere-se v_0 como sendo uma tensão contínua que se pretende que seja constante. Essa tensão varia lentamente no tempo, pelo que o ganho, por sua vez, também deve ser praticamente constante.

Assim, o diagrama de blocos, representado na Figura 42, para o controlo de tensão é obtido tendo por analogia a equação (79), onde também se considera o compensador em cadeia fechada e ganho unitário, H, na realimentação.

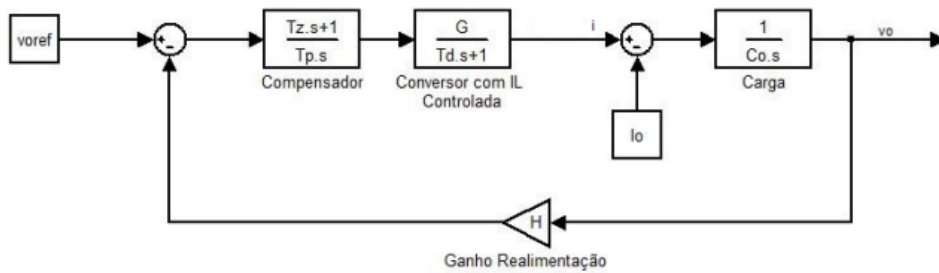


Figura 42: Esquema de blocos com o controlador proporcional integral com o intuito de controlar a tensão [8].

Analisando o sistema implementado, entende-se que a realimentação é utilizada para determinar o sinal de controlo que se deve aplicar no instante t . O sinal de saída, v_0 , é comparado com o sinal de referência, v_{0ref} , através do bloco “sum”. Desta comparação resulta um sinal de erro, sendo possível proporcionar uma reação precisa às perturbações externas.

O sinal de erro é então aplicado ao bloco correspondente ao compensador PI, de onde resulta o valor eficaz da corrente de referência.

Analisando o diagrama de blocos obtido na Figura 42, referente ao circuito paralelo, é possível obter a função transferência do sistema global, representada na equação (80).

$$v_o(s) = \frac{\frac{1 + sT_z}{sT_p} \frac{G}{1 + sT_d} \frac{1}{sC_o}}{1 + \frac{1 + sT_z}{sT_p} \frac{1}{sC_o}} v_{oref}(s) - \frac{\frac{1}{sC_o}}{1 + \frac{1 + sT_z}{sT_p} \frac{G}{1 + sT_d} \frac{1}{sC_o}} i_o(s) \Leftrightarrow \quad (80)$$

$$\Leftrightarrow v_o(s) = \frac{(1 + sT_z)Gv_{oref}(s) - (1 + sT_d)(sT_p)i_o(s)}{s^3T_pT_dC_o + s^2T_pC_o + (1 + sT_z)G}$$

Os parâmetros referidos na equação (80) são determinados a partir de:

$$\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (81)$$

$$T_z = C_0 R_0 \quad (82)$$

$$T_p = 4\xi^2 aGR_0 T_d \quad (83)$$

$$H = 1 \quad (84)$$

$$G = \frac{V_{in}}{V_0} \quad (85)$$

$$K_i = 1/T_p \quad (86)$$

$$K_p = \frac{T_z}{T_p} \quad (87)$$

Onde:

- K_i – Ganho integral;
- K_p – Ganho proporcional;
- T_d – Atraso estático do controlo de tensão e corrente [s];
- T_p – Constante de tempo referente ao polo do compensado do controlo de tensão e corrente [s];
- T_z – Constante de tempo referente ao zero do compensador do controlo de tensão [s];
- ξ – Coeficiente de amortecimento.

Para o controlador PI, a colocação do bloco de limitação (“*Saturation*”) permite um regime de pequenas perturbações de forma a evitar erros que ocorram antes de o sistema atingir o ponto estável, erros esses que podem levar a um comportamento errático do sistema, denominado por embalamento. Desta forma, recorre-se a um sistema de controlador PI de suspensão de ação integral. O esquema de blocos é descrito na seguinte Figura:

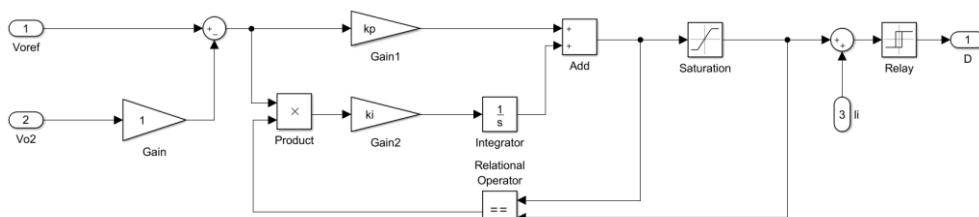


Figura 43: Esquema de blocos com o controlador proporcional integral com suspensão da ação integral.

Para o controlo de tensão com suspensão de ação integral, o cálculo dos parâmetros é dado por:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_o}} \quad (88)$$

$$\xi = \frac{z}{2R_o} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C_o}}}{2R_o} \quad (89)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC_o}} \quad (90)$$

$$T_d = \frac{\pi}{\omega d} = \frac{\pi}{\omega \sqrt{1 - \xi^2}} = \frac{\pi \sqrt{LC_o}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (91)$$

Onde:

z – Zero da função transferência do circuito com suspensão de ação integral;

ω – Frequência própria ou natural do sistema [rad/s].

Os parâmetros $\xi, T_z, T_p, H, G, K_i, K_p$ são calculados de forma análoga para o controlo de tensão simples.

3.3.3. Controlo de corrente

Nesta fase, são comparados os valores de referência definidos para a corrente de saída e o valor da corrente de saída, de forma a calcular o erro associado.

Foi aplicado ao sistema o controlador PI (Proporcional Integral), que permite eliminar o erro estático em regime permanente, para uma entrada em escalão, contrariamente ao que é obtido com o controlo proporcional. A sua utilização é vantajosa pois permite um melhor controlo do sistema na presença de perturbações, melhorando também o tempo de resposta do sistema.

O dimensionamento para este tipo de controlo será feito com raciocínio análogo ao do controlo de tensão, pois em ambos os casos o objetivo é o de controlar a corrente. Ao aplicar as equações (82) e (91), obtém-se o seguinte diagrama:

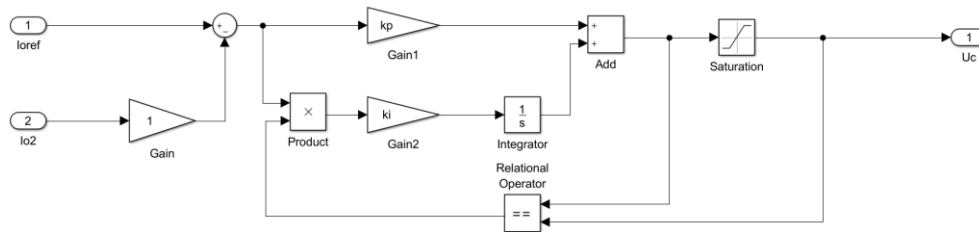


Figura 44: Esquema de blocos com o controlador proporcional integral com suspensão da ação integral, de forma a controlar a corrente.

Na saída deste diagrama obtém-se a tensão de comando, U_c , que será mais uma vez utilizada para comparar com uma onda portadora de amplitude A e frequência f_s . Dessa comparação obtém-se o ciclo de trabalho, que será por sua vez imposto ao interruptor. A determinação do ciclo de trabalho é efetuada através do método PWM, tendo-se o seguinte diagrama:

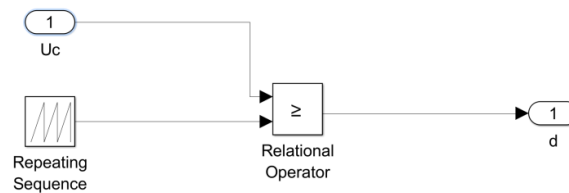


Figura 45: Diagrama de blocos do PWM para determinar o ciclo de trabalho.

3.3.4. Dimensionamento dos controladores

Nos dois subcapítulos descritos anteriormente obtiveram-se equações para determinar os parâmetros dos respectivos controladores.

3.3.4.1. Controladores de tensão e corrente

Para o controlo de tensão teve-se em consideração um sistema com suspensão de ação integral, consoante o conversor a que será aplicado.

- Para o conversor elevador:

Tabela 11: Dimensionamento do controlo de tensão para o conversor elevador.

Parâmetro	Valor	Equação n°
T_z	0,3785 s	82
T_p	0,2011 ms	83
H	1	84
G	0,0988	85
K_i	4974	86
K_p	1883	87
Z	5,71	88
ξ	0,7	89
ω	155,901 rad/s	90
T_d	0,0206 s	91

- Para o conversor quadrático:

Tabela 12: Dimensionamento do controlo de tensão para o conversor quadrático.

Parâmetro	Valor	Equação n°
T_z	0,15 s	82
T_p	0,60 ms	83
H	1	84
G	0,0483	85
K_i	1663	86
K_p	245,16	87
Z	17,40	88
ξ	0,7	89
ω	118,173 rad/s	90
T_d	12,5 ms	91

4. Sistema de Armazenamento de Energia no VE

No presente capítulo é abordada a função do elemento eletroquímico, a bateria, no sistema imposto no VE, onde será alimentado o motor de tração.

4.1. Armazenamento

As baterias são compostas por duas ou mais células eletroquímicas ligadas em série, separadas por uma película porosa, podendo tratar-se de células galvânicas, eletrolíticas, de combustível ou fluxo. Estas consistem em elétrodos positivos e negativos, que se encontram ligados por meio de um eletrólito.

O eletrólito consiste numa solução ou substância fundida na qual se faz passar uma corrente elétrica por meio do movimento de descarga de iões, tornando-se, assim, num condutor elétrico. A reação química que ocorre entre os elétrodos e o eletrólito irá gerar energia DC.

No tipo de baterias a considerar para o presente projeto - baterias recarregáveis - a reação química pode ser revertida. A reversão do sentido da corrente permite à bateria voltar ao estado carregado.

O funcionamento consiste nas movimentações dos eletrões, que serão compensadas pelas deslocações de iões, de forma a neutralizar o elétrodo. As movimentações estimulam a criação de uma corrente elétrica.

Tendo em conta o tipo de bateria mais utilizada atualmente nos VE, na presente dissertação recorreu-se a uma bateria de iões de Lítio. Nesta bateria, o ânodo é composto por grafite, pois a sua estrutura permite que os iões de Lítio sejam inseridos nas suas camadas durante o processo de carga. Por conseguinte, no processo de descarga, estes retomam à sua posição inicial.

O cátodo é composto, em geral, por um óxido de Lítio e cobalto, devido à elevada densidade de energia. O eletrólito é composto por um sal de Lítio mais comum, sendo o hexafluorofosfato de Lítio.

Comparativamente a outros modelos de baterias não abordados, apresentam-se na Tabela 13 as vantagens e desvantagens associadas às baterias de iões de Lítio.

Tabela 13: Vantagens e desvantagens das baterias de iões de Lítio [33].

Vantagens	Desvantagens
Elevada densidade de energia	Custo de produção elevado
Capacidade de carregamento rápido	Preocupação ambiental devido ao uso de químicos instáveis
Baixa taxa de auto-descarga	Temperaturas elevadas podem acelerar o processo de degradação
Grande densidade de potência	O processo de extração das matérias-primas
Elevada eficiência	Problemas de transporte
Não apresentam efeito de memória	Preocupações de segurança
Leves e compactas	

4.2. Modelo matemático

Devido aos vários tipos de baterias e fatores que as caracterizam, não é possível caracterizar um modelo matemático que descreva o funcionamento pleno de uma bateria. No entanto, os modelos mais simples recaem nas características eletroquímicas da bateria, onde é possível prever a energia que por ela será armazenada. Contudo, não é possível, por outro lado, fornecer uma variação de tensão ao longo do tempo.

Assim, para efeitos de simplicidade, nesta dissertação é utilizado o modelo simples das baterias de íões de Lítio. Este modelo consiste numa fonte de tensão ideal em série com uma resistência interna.

Recorrendo à ferramenta de simulação *Matlab/Simulink* (Figura 46), é possível verificar o modelo genérico dinâmico da bateria recarregável.

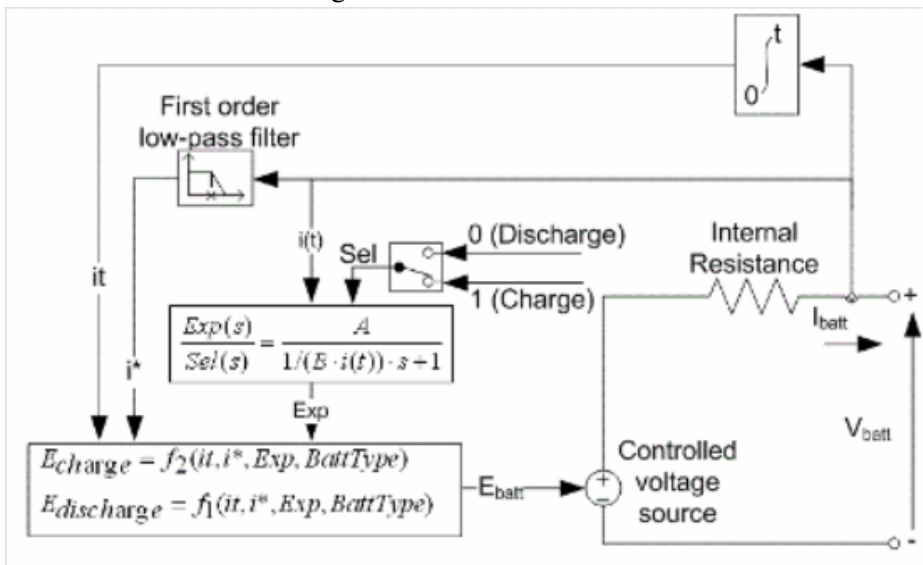


Figura 46: Modelo genérico da bateria recarregável [41].

Na Figura 46, é possível verificar a existência de uma resistência interna que representa, na sua globalidade, a resistência total interna. Tem-se em consideração a resistência aos terminais da célula, os elétrodos e a resistência do caminho que percorre o eletrólito e o respetivo separador.

Para o modelo de bateria íões de Lítio, são tidas em consideração as seguintes equações:

- Modelo de descarga, $i^* > 0$:

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + Ae^{-Bit} \quad (92)$$

- Modelo de carga, $i^* < 0$:

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{it + 0,1Q} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + Ae^{-Bit} \quad (93)$$

Onde os parâmetros são:

- E_0 – Tensão constante [V];
- K – Constante de polarização [V/Ah], ou resistência de polarização [Ω];
- i^* – Dinâmica de corrente de baixa de frequência [A];
- i – Corrente da bateria [A];
- it – Capacidade extraída [Ah];
- Q – Capacidade máxima da bateria [V];
- A – Tensão exponencial [V];
- B – Capacidade exponencial [Ah^{-1}].

Os parâmetros do circuito podem ser modificados se se pretender representar um tipo específico de bateria, acompanhado das características de descarga. Desta forma, a característica típica de descarga consiste em três secções, representadas na Figura 47:

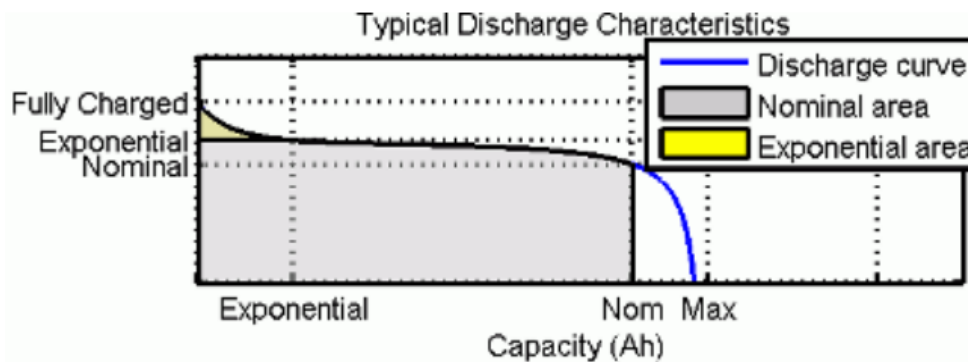


Figura 47: Características típicas de descarga de uma bateria [41].

A primeira secção é representada pela queda exponencial de tensão quando a bateria está carregada, onde a largura da queda depende do tipo de bateria a utilizar. A segunda secção é representada pela carga que consegue ser extraída da bateria até ao instante onde a tensão atinge o valor da tensão nominal da bateria. Por fim, a terceira secção caracteriza-se pela descarga total da bateria, quando se verifica uma queda de tensão abrupta.

Quando a corrente na bateria atinge um valor negativo, a bateria irá recarregar, seguindo a característica de carga representada abaixo na Figura 48 .

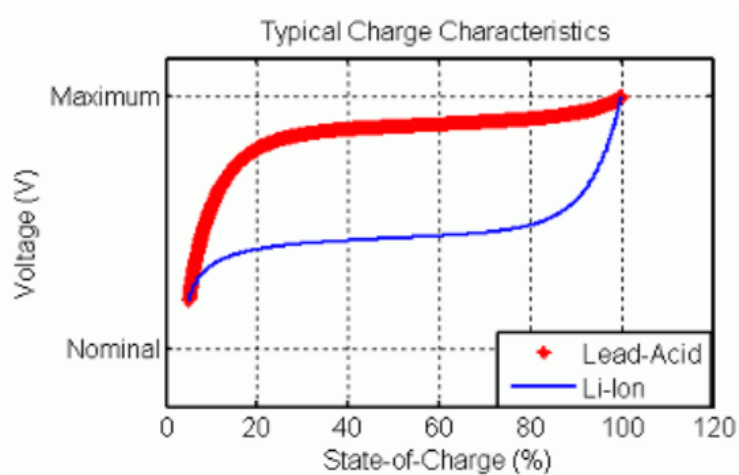


Figura 48: Característica típica de carga [41].

Os parâmetros do modelo são deduzidos a partir das características de descarga. Assume-se que para os parâmetros estudados as características de carga e descarga assumem-se iguais [32].

4.3. Bateria implementada

Na presente dissertação, irão ser utilizados dois modelos de bateria: uma de 400 V do fabricante *Customized Technical Service*, modelo CTS-40050, representada no Anexo K, e outra de 800 V do fabricante *Customized Technical Service*, modelo CTS-80050, representada no Anexo L. As características das baterias encontram-se representadas nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Características para a bateria de 400 V [<https://www.ctsbattery.com/>].

Bateria 400 V (Anexo K)	
Voltagem	400 V
Potência	20 kWh
Eletrólito	Li-ion
Capacidade	50 Ah
Gama de tensões de funcionamento	270-453,6 DC V
Dimensões (C/L/A, mm)	1000×900×180

Tabela 15: Características para a bateria de 800 V [<https://www.ctsbattery.com/>].

Bateria 800 V (Anexo L)	
Voltagem	800 V
Capacidade	302 Ah
Energia	34,79 kWh
Dimensões (C/L/A, mm)	1060×630×245

5. Resultados Obtidos para o Sistema Global

Os resultados obtidos no presente capítulo refletem as evoluções temporais correspondentes a três soluções distintas, diferindo entre elas os conversores, as baterias utilizadas e o respetivo controlo que lhes está associado. Em série, entre o conversor e a bateria, encontram-se ligados uma bobine (com a finalidade de proporcionar uma corrente com menor oscilação à bateria) e um diodo (com a finalidade de garantir que a corrente só irá circular do conversor para a bateria e não no sentido inverso).

As simulações são obtidas para três situações distintas, onde se consideram dois dados de entrada, a temperatura (Anexo I) e a radiação (Anexo H). A primeira situação, a de referência, onde a temperatura considerada é de 25°C e a radiação é 1000 W/m². A segunda situação, o melhor cenário correspondente ao mês de julho, onde a temperatura é de 31,25 C° e a radiação é 1155 W/m². A terceira situação, o pior cenário correspondente ao mês de dezembro, onde a temperatura é de 9C° e a radiação é 509 W/m²

Foram consideradas duas capacidades distintas para a bateria: para o sistema de conversão 1, é utilizada uma capacidade de 1 Ah que corresponde a um valor 300 vezes inferior ao que será o modelo real da bateria, representada na Tabela 15. Para o sistema de conversão 2, é utilizada uma capacidade de 0,5 Ah, o que corresponde a um valor 100 vezes inferior ao que será o respetivo modelo real da bateria, representada na Tabela 14. Para o sistema de conversão 3, é utilizada uma capacidade de 0,5 Ah, que corresponde a um valor 100 vezes inferior aproximadamente, comparativamente ao modelo real da bateria, representada na Tabela 14. Estas considerações foram tomadas de forma a ser possível verificar o estado de carga da bateria para o intervalo de tempo considerado de 2 segundos. É considerado também um estado inicial da bateria, para os três sistemas de conversão, de 50% do seu valor nominal.

5.1. Sistema de conversão 1 – Resultados obtidos

Para o primeiro sistema de conversão, representado na Figura 49, tem-se o painel fotovoltaico, dimensionado na Tabela 6, (Anexo D) o sistema de conversão de potência, e o sistema de armazenamento, composto pelo bloco da bateria proveniente da biblioteca do *Simulink*. No sistema de conversão de potência é utilizado o conversor quadrático, Figura 36, (Anexo G) o método de controlo associado é uma junção do controlo MPPT com o controlo de tensão e corrente (Anexo J), onde para valores de tensão de saída inferiores ao valor de referência pretendido, estará a ser aplicado o método do controlador MPPT, Figura 29. Caso a tensão de saída seja superior ao valor de referência, o controlador que se encontra em funcionamento é o de tensão. Com a utilização em conjunto dos dois métodos de controlo optou-se pela implementação de apenas um integrador para os dois controladores, isto porque ao utilizar dois integradores a funcionar constantemente, no instante de transição entre eles, iriam ocorrer sobretensões na tensão de saída.

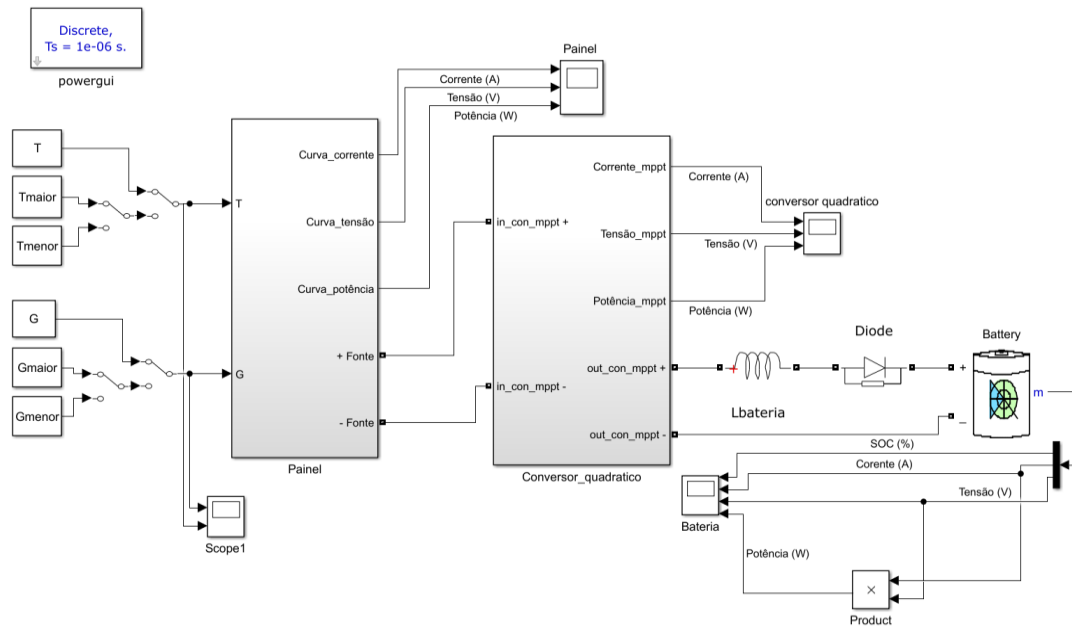


Figura 49: Sistema de conversão 1.

Nas condições de referência, começa-se por demonstrar o correto funcionamento do controlo de corrente e tensão (Figura 50), estas evoluções temporais são obtidas no conversor quadrático. De seguida é mostrado as evoluções temporais à saída do painel fotovoltaico (Figura 51) e à saída do conversor quadrático (Figura 52), onde são estudadas as grandezas de corrente, tensão e potência, adicionalmente à saída da bateria será estudado, para além das grandezas indicadas anteriormente, o estado de carga da bateria (Figura 53).

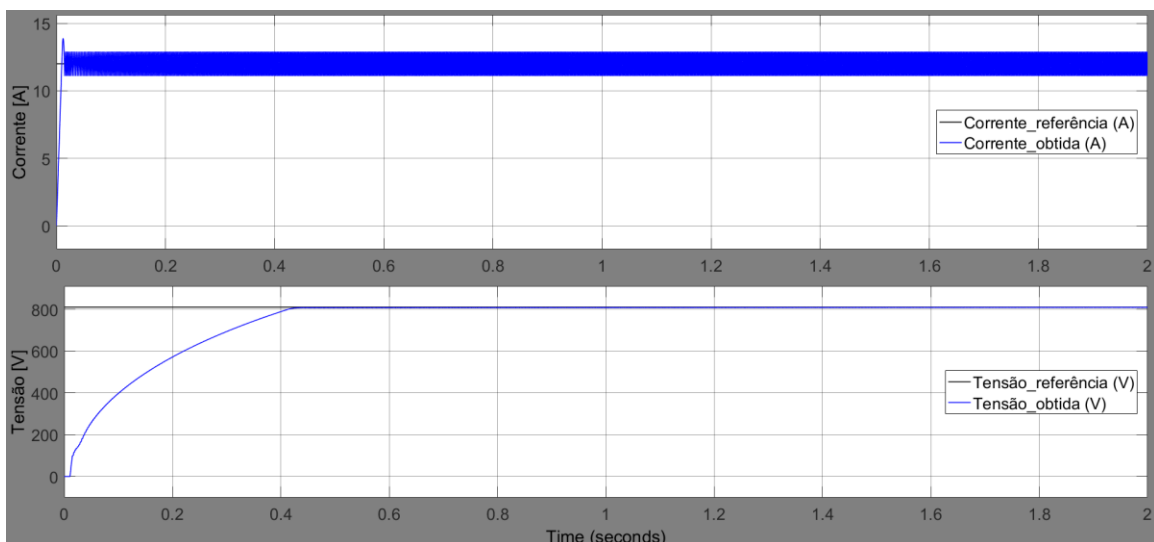


Figura 50: Figura superior, corrente de referência a preto e corrente obtida a azul, obtidas à saída do controlador MPPT, com escala de 5A/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, tensão de referência a preto e tensão obtida a azul, obtidas à saída do controlador MPPT, com escala de 200V/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

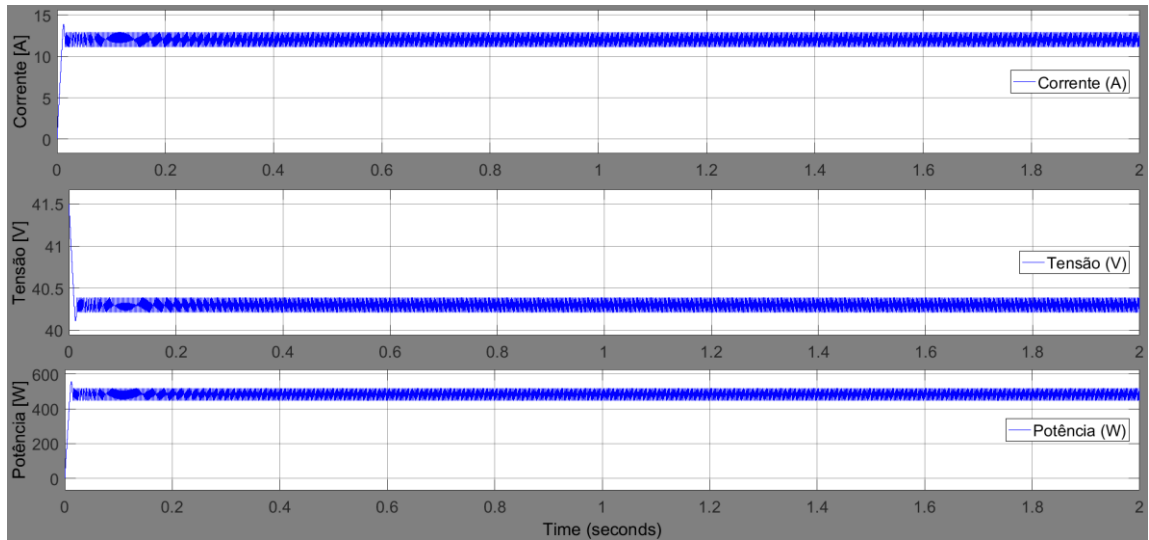


Figura 51: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 1. Figura superior, corrente com escala de 5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 0,5 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

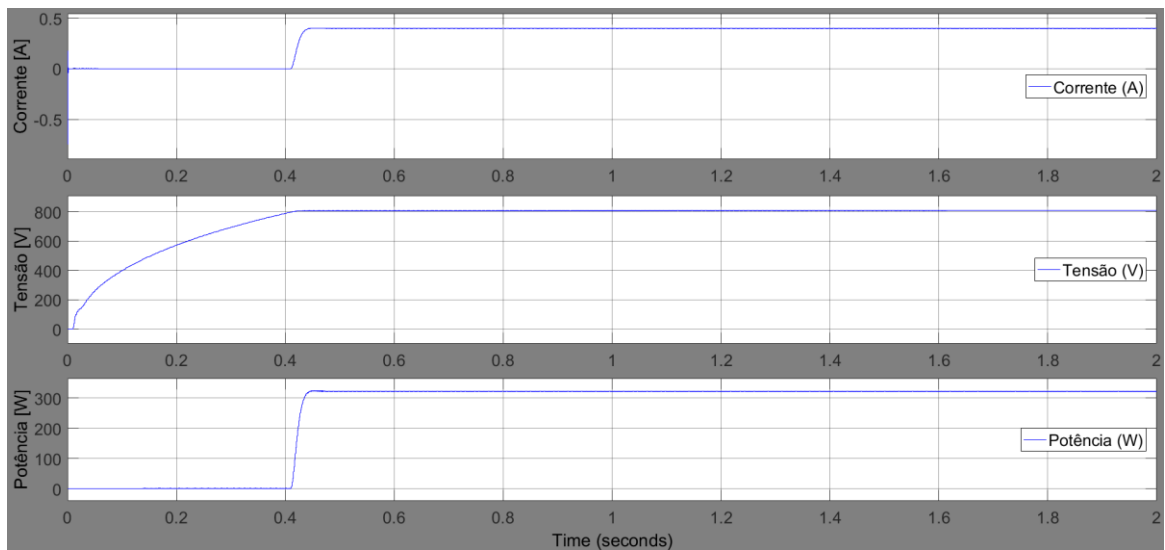


Figura 52: Curvas à saída do conversor quadrático no sistema de conversão 1. Figura superior, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 200 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 100 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

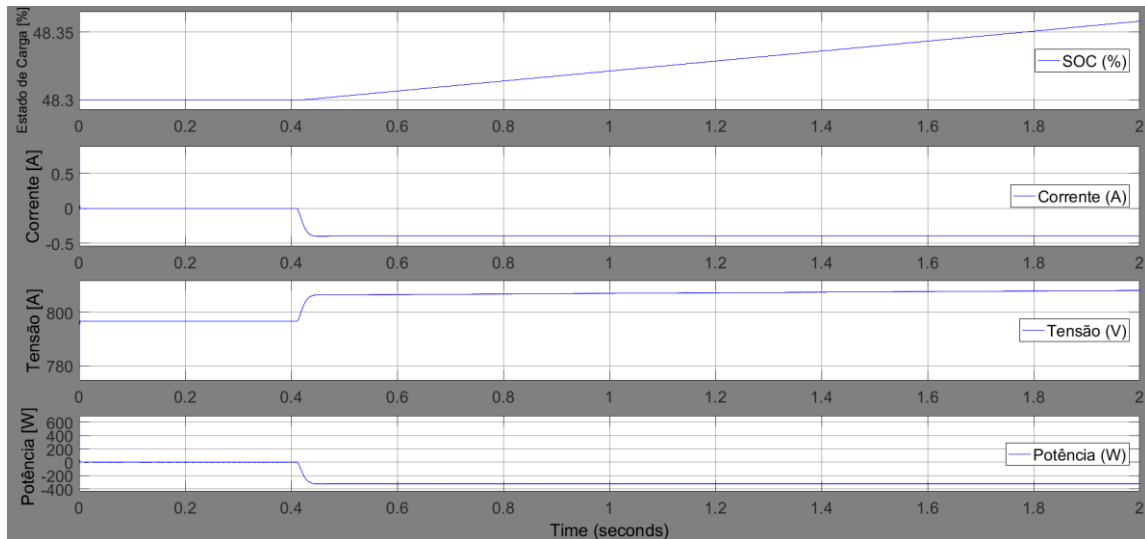


Figura 53: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 1. Primeira figura, estado de carga na bateria com escala de 0,02 %/DIV no eixo das ordenadas. Segunda figura, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Terceira figura, tensão com escala de 10 V/DIV no eixo das ordenadas. Quarta figura, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas, a escala é de 0,2 s/DIV.

Nas condições de referência, obtém-se uma potência gerada correspondente à potência máxima indicada pelo fabricante, que por sua vez anda muito próxima do valor que é entregue à bateria, apesar de perdas associadas à simulação e próprias limitações da mesma.

Esta simulação permite validar o funcionamento do sistema de conversão, contudo as características de referência, $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $G = 1000\text{ W/m}^2$ não traduzem o que acontece diariamente.

Foram realizados mais dois conjuntos de simulações que ajudam a entender melhor o funcionamento deste sistema de conversão em situações reais.

Em primeiro lugar serão apresentadas as evoluções temporais à saída do painel (Figura 54), à saída do conversor de potência (Figura 55) e à saída da bateria (Figura 56). Esta situação corresponde ao melhor cenário de temperatura e radiação em Portugal no ano de 2022, para o mês de julho.

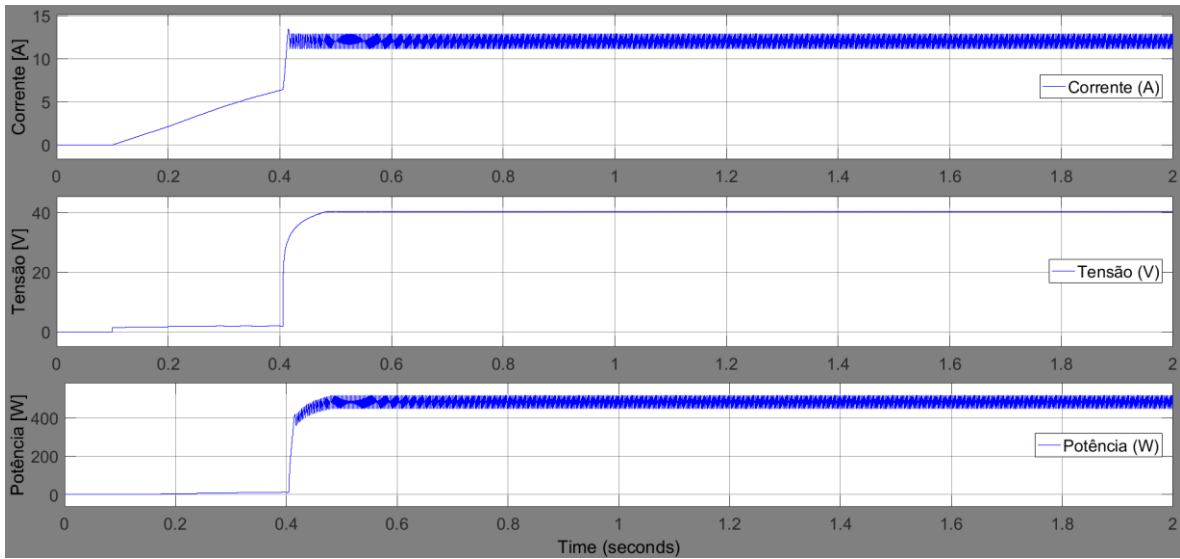


Figura 54: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 1. Figura superior, corrente com escala de 5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 10 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

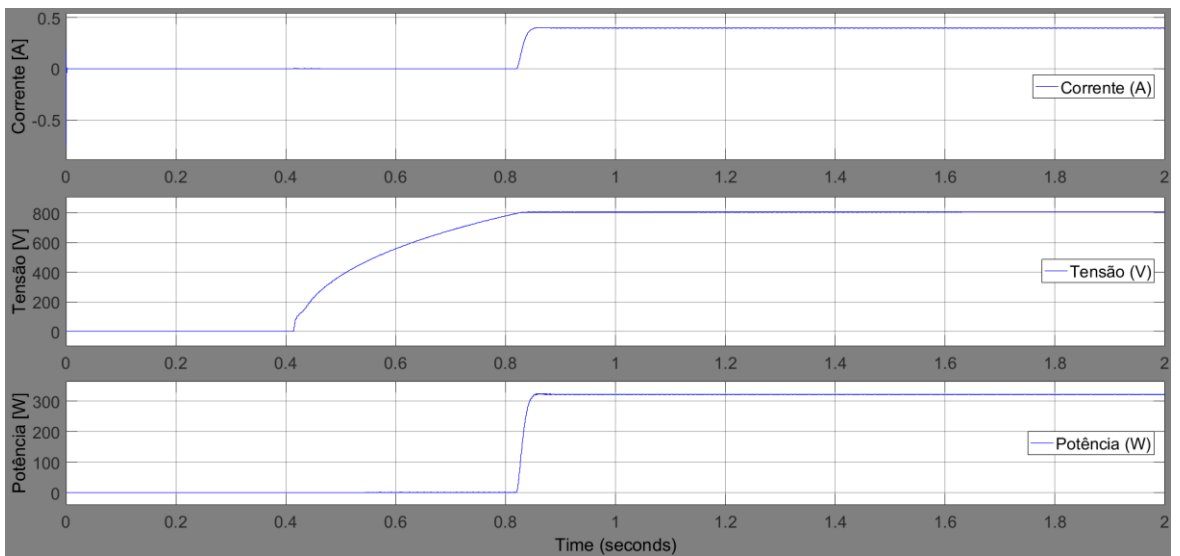


Figura 55: Curvas à saída do conversor quadrático no sistema de conversão 1. Figura superior, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 200 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 100 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

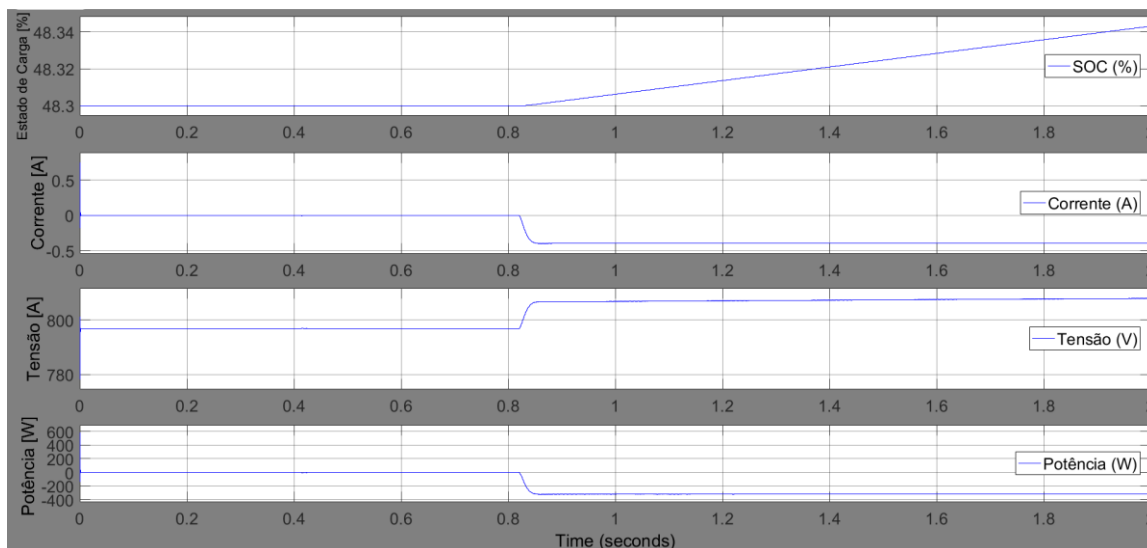


Figura 56: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 1. Primeira figura, estado de carga na bateria com escala de 0,02 %/DIV no eixo das ordenadas. Segunda figura, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Terceira figura, tensão com escala de 10 V/DIV no eixo das ordenadas. Quarta figura, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas, a escala é de 0,2 s/DIV.

Analisando as evoluções temporais acima obtidas, verifica-se que a potência máxima produzida pelo painel ronda os 485 W, sendo que a entregue à bateria, e que é calculada à saída do conversor, ronda os 350 W. Esta diferença pode ser justificada pelo rendimento do conversor (em simulação de software não são consideradas perdas, no entanto os elementos constituintes do conversor têm quedas de tensão associadas). A bateria encontra-se a carregar a partir de $t = 0,82$ s até ao fim da simulação, com uma corrente aproximadamente 0,5 A.

De salientar que a evolução quantitativa no estado de carga da bateria (SOC) não reflete o comportamento real da bateria, devido à diferença existente entre as unidades de capacidade da bateria, pois trata-se de uma unidade expressa em horas, sendo que a simulação tem a duração de 2 segundos.

Em seguida serão apresentadas as evoluções temporais para o cenário com menor temperatura e radiação, referentes ao mês de dezembro. Começa-se por demonstrar as evoluções temporais à saída do painel fotovoltaico (Figura 57), seguido das evoluções temporais à saída do conversor de potência (Figura 58) e à saída da bateria (Figura 59).

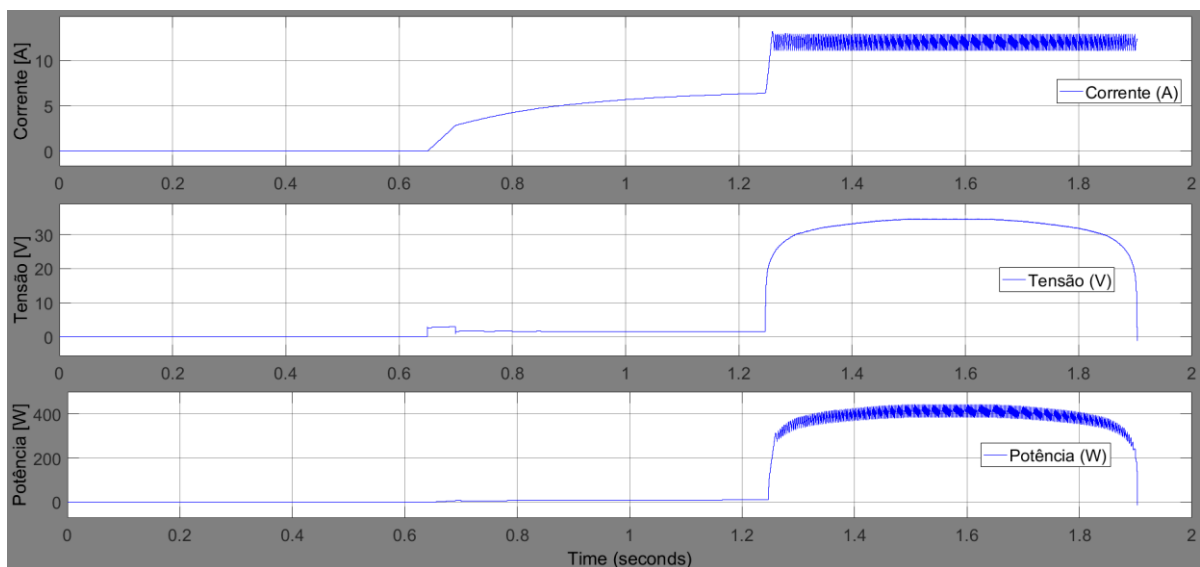


Figura 57: Curvas à saída do painel fotovoltaico do sistema de conversão 1. Figura superior, corrente com escala de 5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 10 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

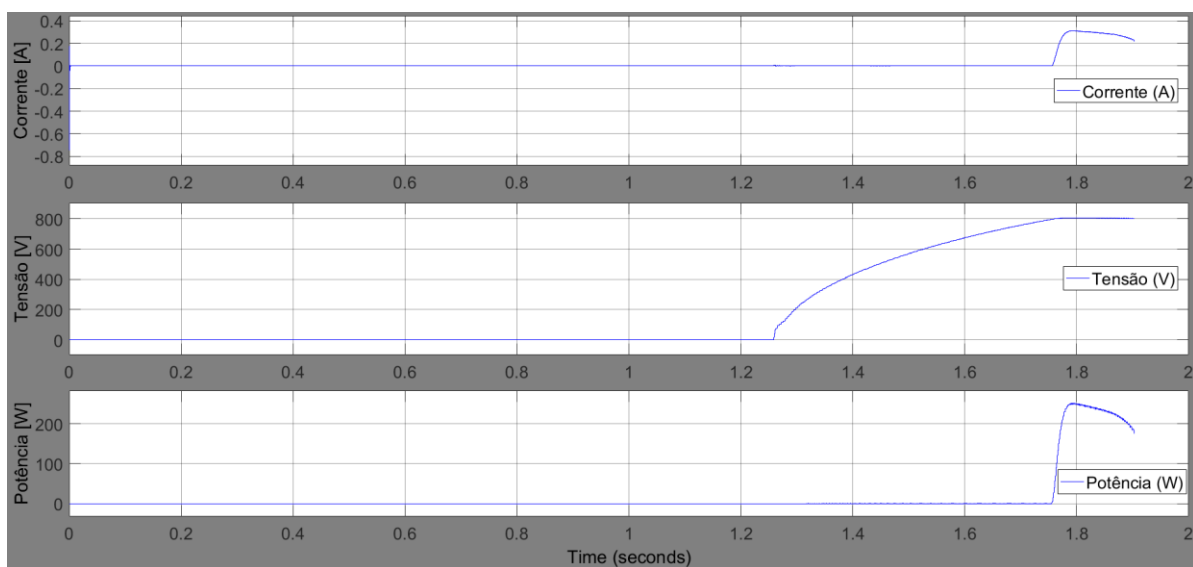


Figura 58: Curvas à saída do conversor quadrático do sistema de conversão 1. Figura superior, corrente com escala de 0,2 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 200 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 100 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

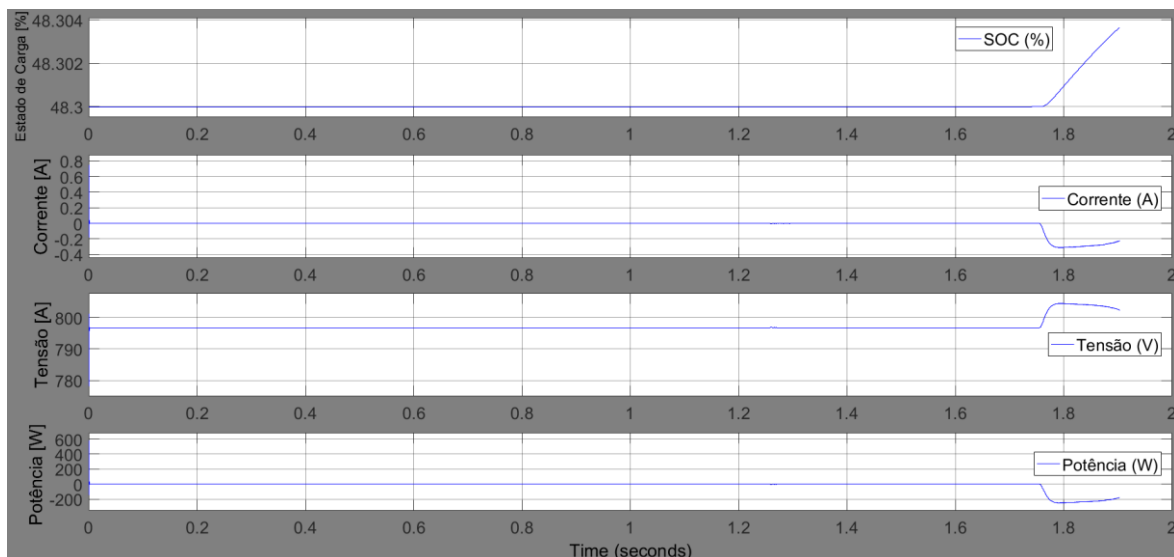


Figura 59: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 1. Primeira figura, estado de carga na bateria com escala de 0,002 %/DIV no eixo das ordenadas. Segunda figura, corrente com escala de 0,2 A/DIV no eixo das ordenadas. Terceira figura, tensão com escala de 10 V/DIV no eixo das ordenadas. Quarta figura, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas, a escala é de 0,2 s/DIV.

Para o mês de dezembro, o painel produz uma potência média diária de 400 W, sendo que a potência entregue à bateria é próxima de 250 W, originando um carregamento da bateria no intervalo de tempo $1,75 < t < 1,9$ s, com uma corrente de 0,3 A.

Para as três simulações, o estado da carga (SOC) apresenta um aspeto ascendente, traduzindo-se na fase de carregamento. A corrente apresenta um valor negativo uma vez que a evolução temporal corresponde à saída da bateria e esta encontra-se a carregar (na entrada seria visualizado o valor simétrico). O mesmo comportamento verifica-se na potência, devido à forma como é calculada $P = UI$

5.2. Sistema de conversão 2 – Resultados obtidos

O segundo sistema de conversão difere do primeiro nos seguintes aspetos: tipo de bateria utilizada (passa a ser de 400 V em vez de 800 V) e no método de controlo do conversor quadrático, representado na Figura 36. Este sistema de conversão é composto pelo painel fotovoltaico dimensionado na Tabela 6, o conversor quadrático (com controlo de tensão e corrente associado, representados na Figura 43) e o sistema de armazenamento. É representado na Figura 60 o sistema implementado.

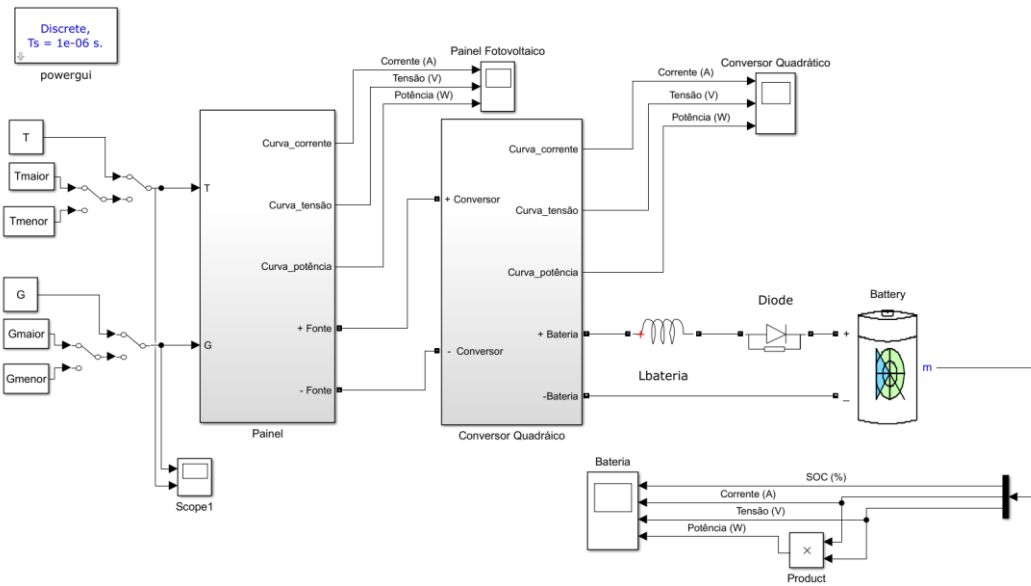


Figura 60: Sistema de conversão 2

As simulações realizadas serão as mesmas que foram impostas no sistema de conversão 1, com exceção da tensão da bateria, que passará a ser de 400 V, as grandezas em estudo serão as mesmas indicadas para o sistema de conversão 1.

Inicialmente é imposto as condições de referência, onde é demonstrado o correto funcionamento do controlo de corrente e tensão (Figura 61), seguido das evoluções temporais à saída do painel fotovoltaico (Figura 62), à saída do sistema de conversão de potência (Figura 63) e à saída da bateria (Figura 64).

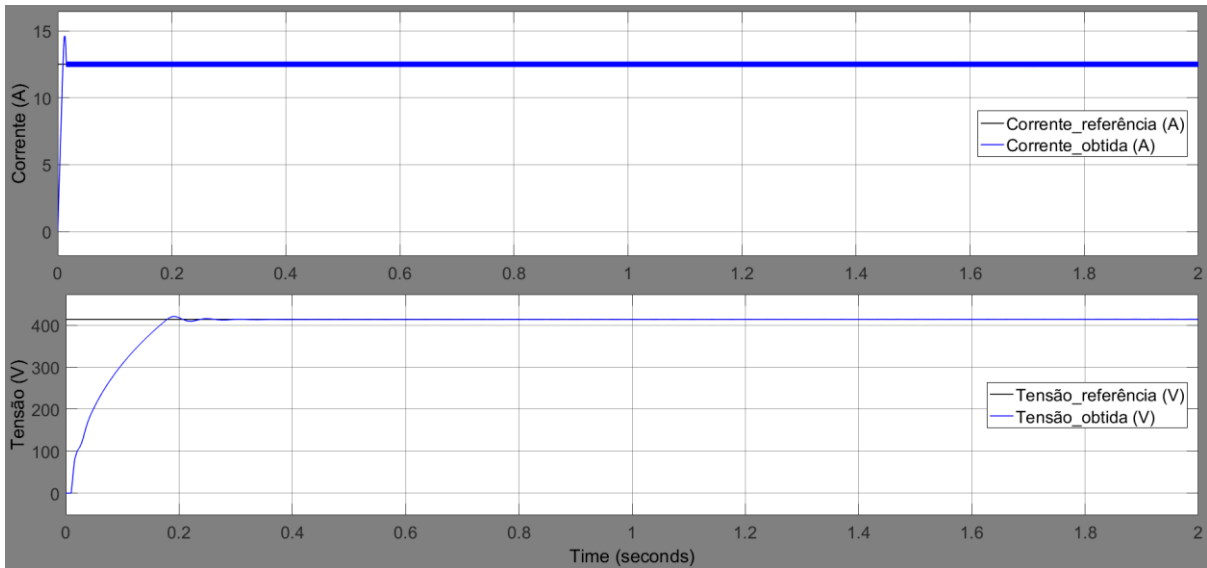


Figura 61: Figura superior, corrente de referência a preto e corrente obtida a azul, obtidas no controlador de tensão e corrente, com escala de 5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, tensão de referência a preto e tensão obtida a azul, obtidas no controlador de tensão e corrente, com escala de 100 V/DIV. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

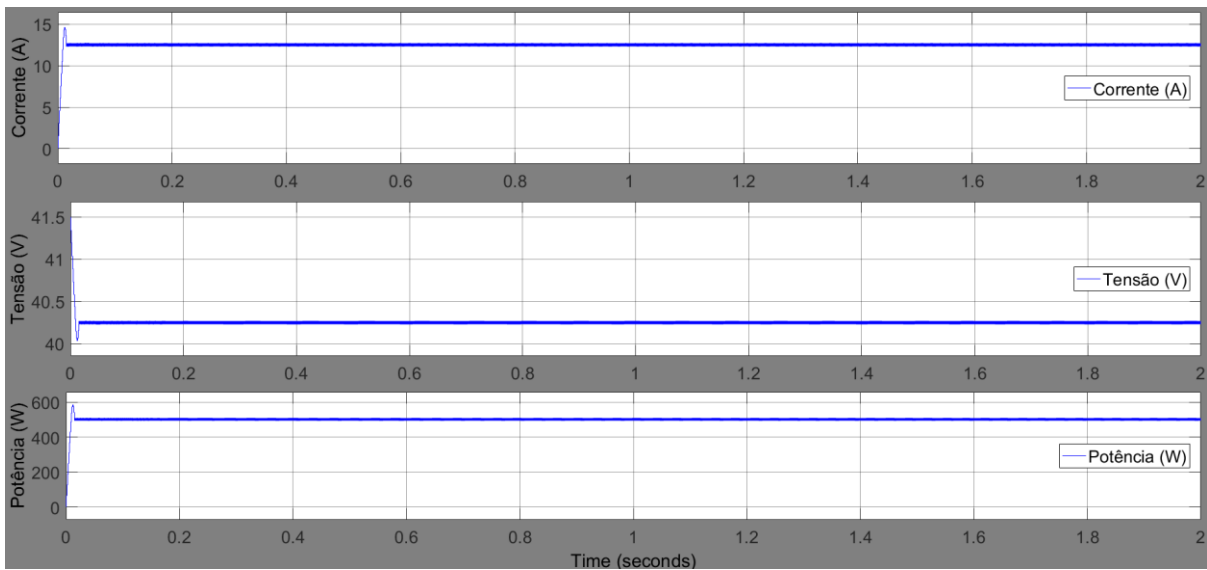


Figura 62: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 2. Figura superior, corrente com escala de 5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 0,5 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

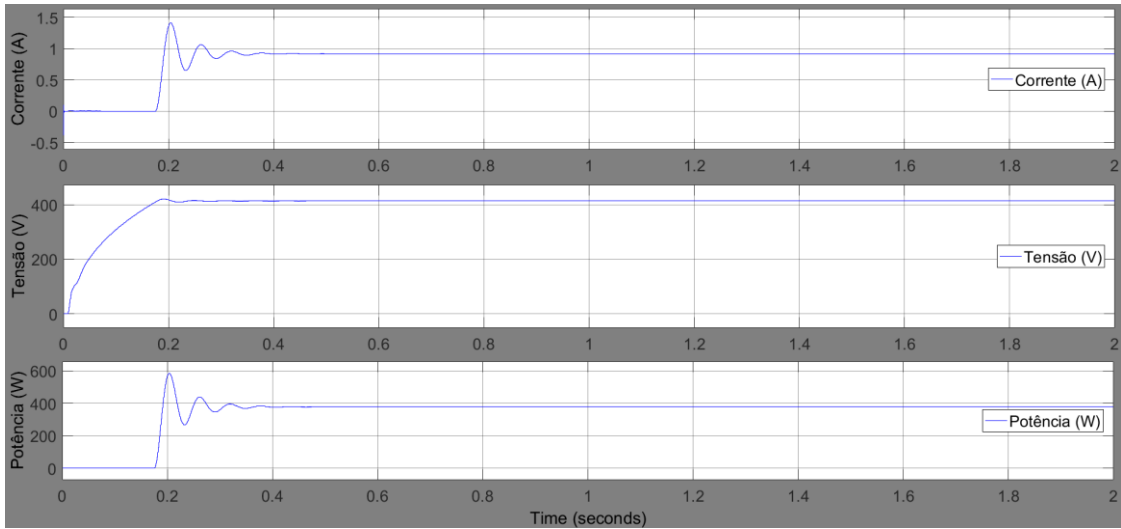


Figura 63: Curvas à saída do conversor quadrático no sistema de conversão 2. Figura superior, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 100 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

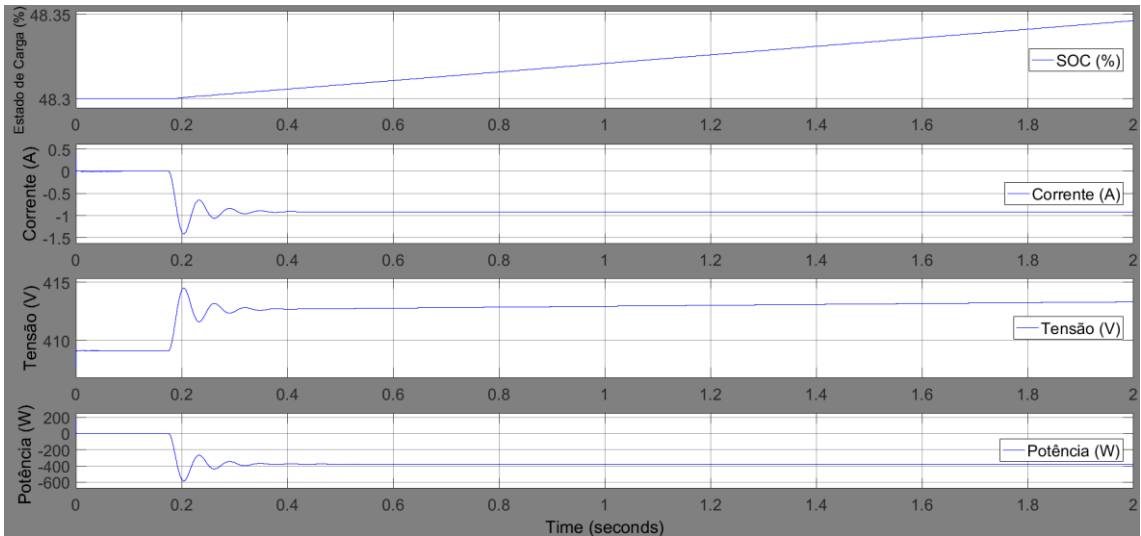


Figura 64: Curvas à saída da bateria no sistema de simulação 2. Primeira figura, estado de carga na bateria com escala de 0,02 %/DIV no eixo das ordenadas. Segunda figura, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Terceira figura, tensão com escala de 2 V/DIV no eixo das ordenadas. Quarta figura, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas, a escala é de 0,2 s/DIV.

As evoluções temporais demonstradas anteriormente permitem validar o sistema de conversão 2, pois no painel temos uma potência gerada de 500 W e a que é entregue à bateria ronda os 400 W, permitindo realizar as simulações para o melhor e pior cenários de temperatura e radiação. Em seguida serão demonstradas as simulações para o melhor cenário de temperatura e radiação.

Após a validação do sistema de conversão 2, é possível obter as evoluções temporais para o melhor cenário, mês de julho. Inicialmente é demonstrado as evoluções temporais obtidas à saída do painel fotovoltaico (Figura 65), à saída do conversor de potência (Figura 66) e à saída da bateria (Figura 67).

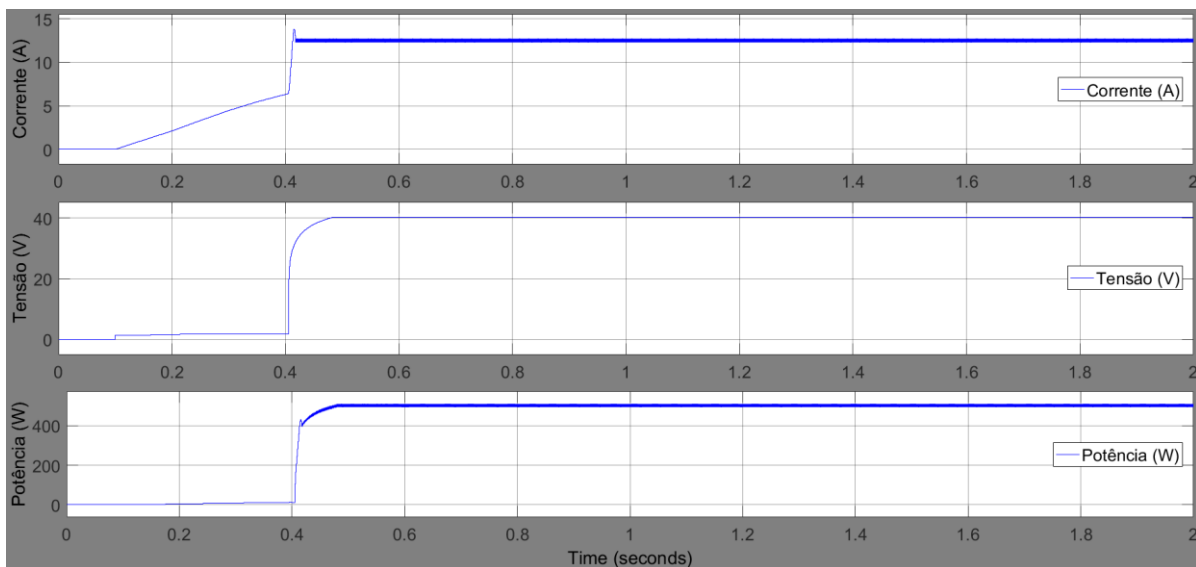


Figura 65: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 2. Figura superior, corrente com escala de 5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 10 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

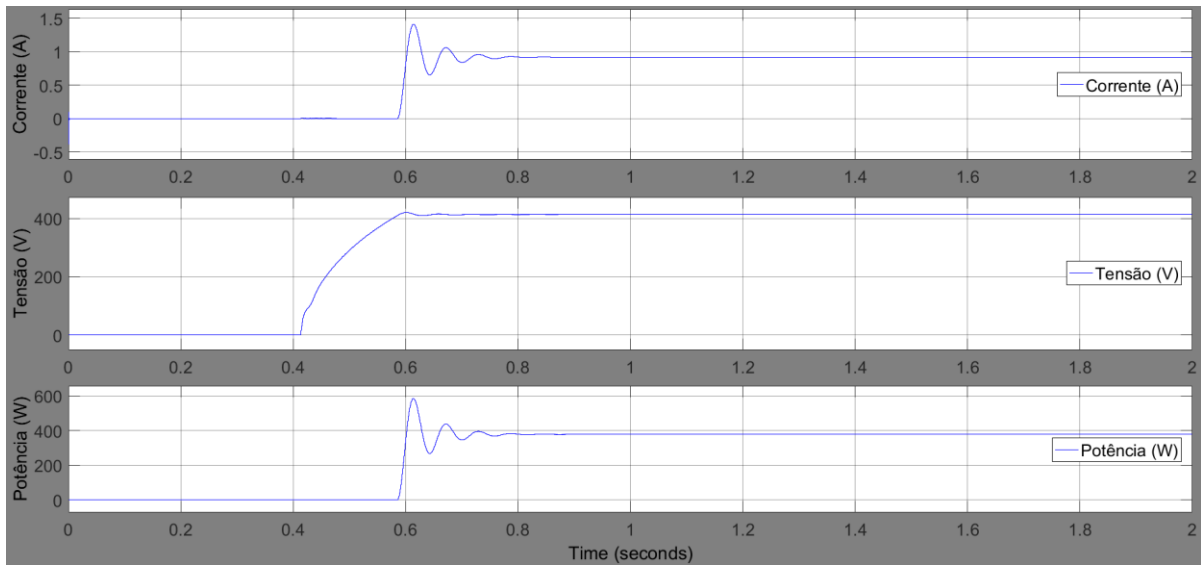


Figura 66: Curvas à saída do conversor quadrático no sistema de conversão 2. Figura superior, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 100 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

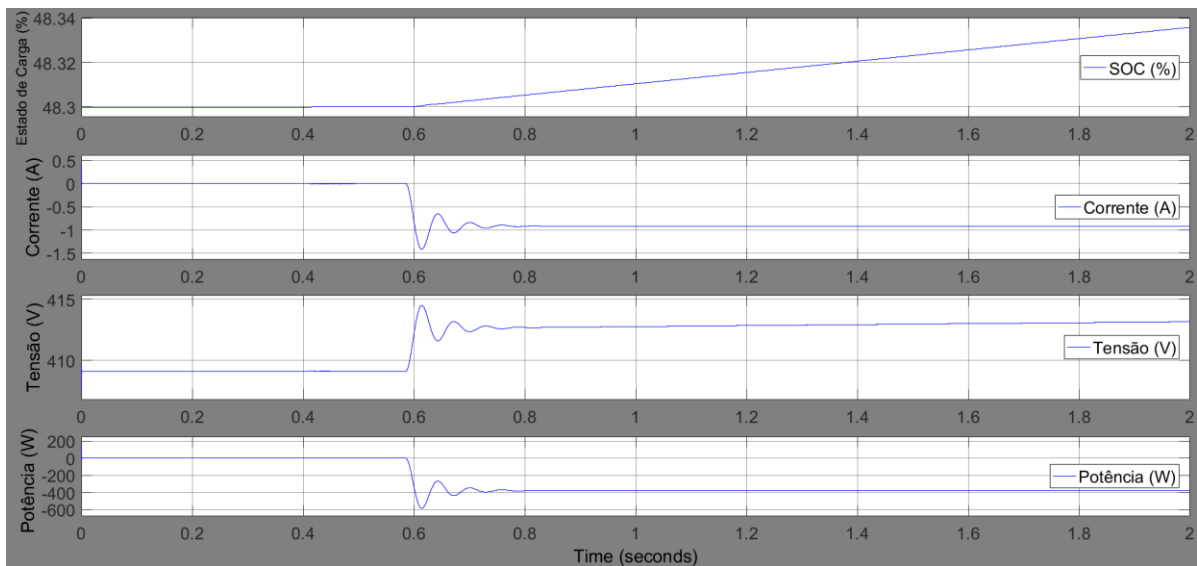


Figura 67: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 2. Primeira figura, estado de carga na bateria com escala de 0,02 %/DIV no eixo das ordenadas. Segunda figura, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Terceira figura, tensão com escala de 2 V/DIV no eixo das ordenadas. Quarta figura, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas, a escala é de 0,2 s/DIV.

Neste sistema de conversão, verifica-se uma discrepância inferior entre a potência gerada pelo painel, aproximadamente 500 W, e a potência que é entregue à bateria, 400W. A corrente entregue à bateria atinge valores perto de 1 A. O tempo de carga da bateria também é superior, considerando o intervalo de tempo $0,6 < t < 2$ s.

As evoluções temporais abaixo ilustram a simulação realizada para o pior caso de temperatura e radiação. São demonstradas as evoluções temporais à saída do painel fotovoltaico (Figura 68), à saída do conversor de potência (Figura 69) e à saída da bateria (Figura 70).

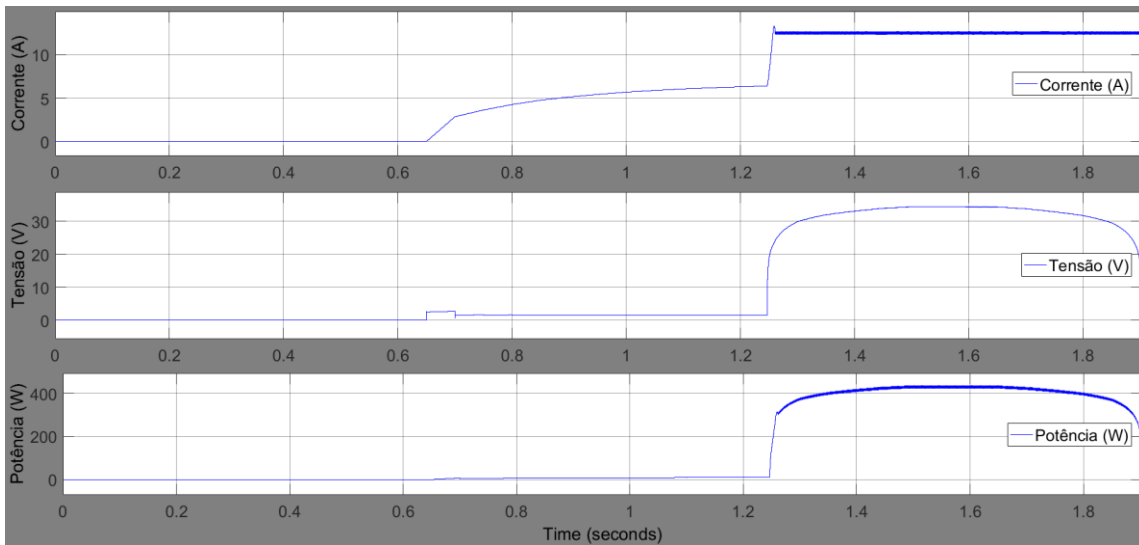


Figura 68: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 2. Figura superior, corrente com escala de 5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 10 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

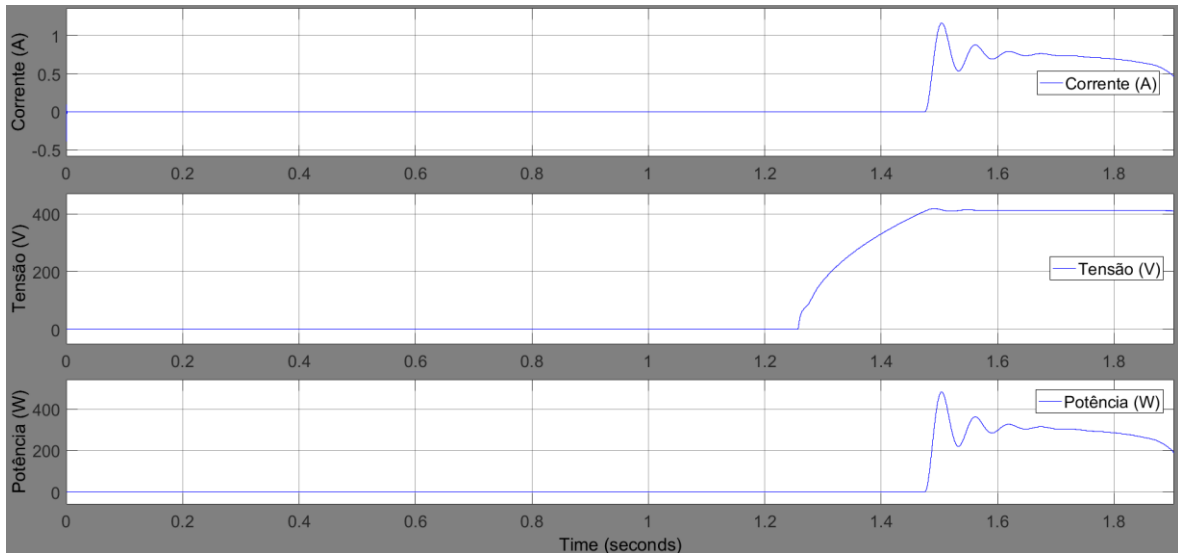


Figura 69: Curvas à saída do conversor quadrático no sistema de conversão 2. Figura superior, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 100 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

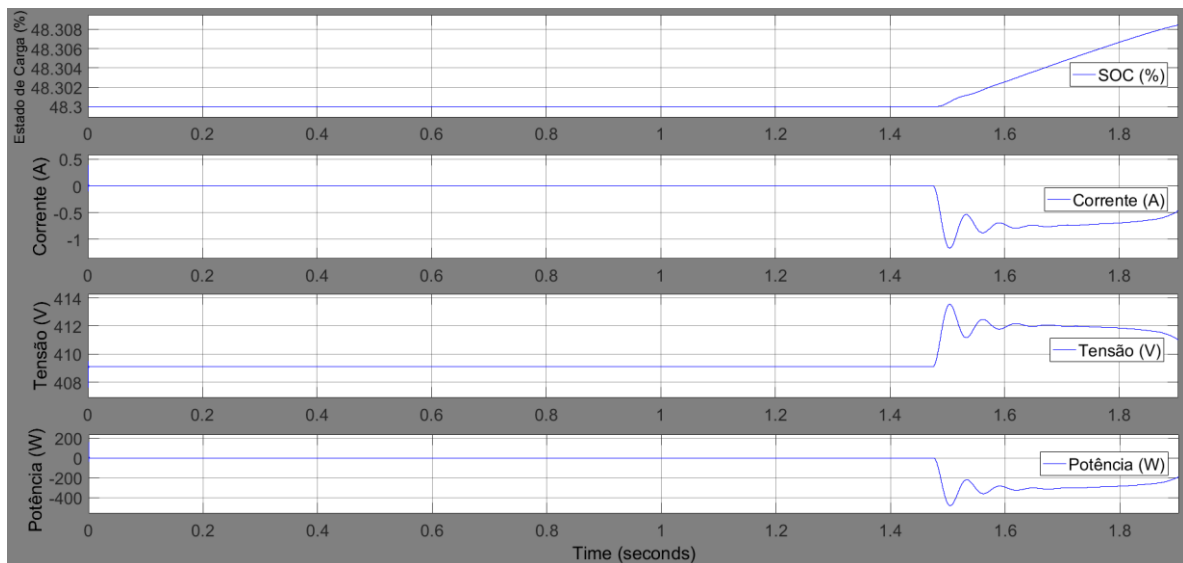


Figura 70: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 2. Primeira figura, estado de carga na bateria com escala de 0,005 %/DIV no eixo das ordenadas. Segunda figura, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Terceira figura, tensão com escala de 2 V/DIV no eixo das ordenadas. Quarta figura, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas, a escala é de 0,2 s/DIV.

Para a presente simulação, como seria expectável, os valores de potência são mais baixos, assim como o intervalo de tempo em que a potência é gerada, pois o período de luz solar é menor no mês de dezembro. A potência máxima aos terminais da bateria atinge, em regime permanente, o valor de aproximadamente 300 W, sendo o intervalo de tempo de carregamento $1,5 < t < 2$ s.

5.3. Sistema de conversão 3 – Resultados obtidos

O terceiro e último sistema de conversão, representado na Figura 71, é composto pelo painel fotovoltaico, dimensionado na Tabela 6, o sistema de conversão de potência, conversor elevador representado na Figura 33 (Anexo F), e o sistema de armazenamento. O método de controlo associado ao conversor é o controlo de tensão e corrente representado na Figura 43.

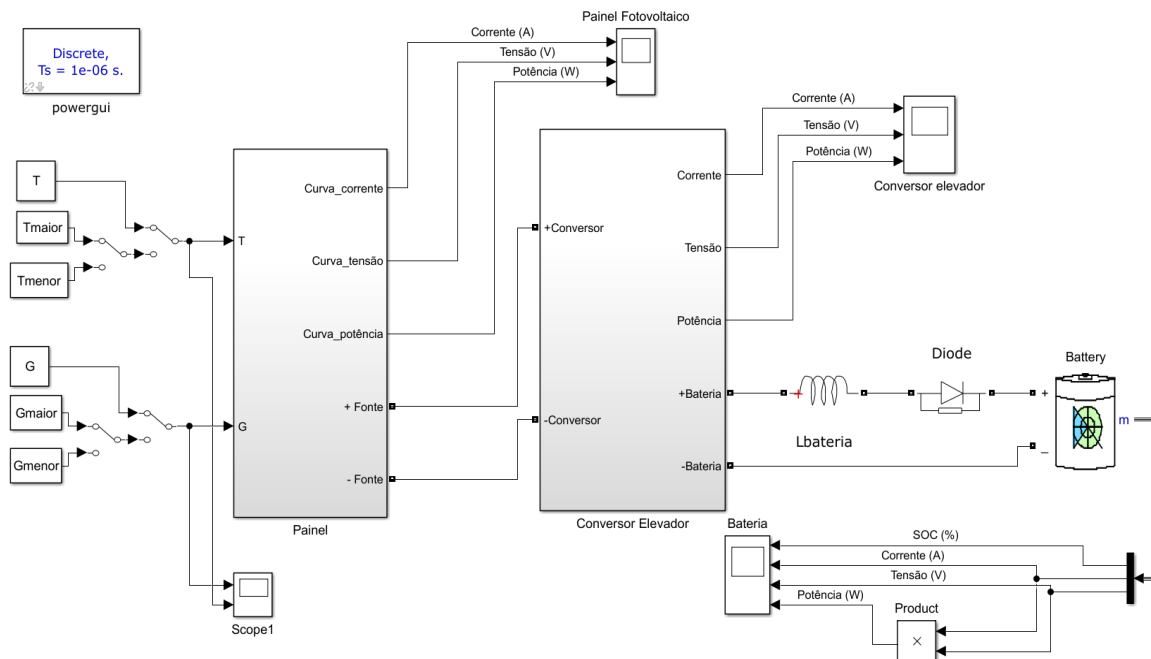


Figura 71: Sistema de conversão 3

Analogamente ao que foi referido nos subcapítulos anteriores, as simulações impostas para este sistema de conversão serão exatamente as mesmas que foram realizadas nos sistemas de conversão anteriores e serão analisadas as mesmas grandezas. Inicialmente, verifica-se se o sistema está a funcionar corretamente através das evoluções temporais do controlo de corrente e tensão, obtidas no sistema de conversão de potência (Figura 72).

É representado também as evoluções temporais à saída do painel fotovoltaico (Figura 73), à saída do conversor de potência (Figura 74) e à saída da bateria (Figura 75).

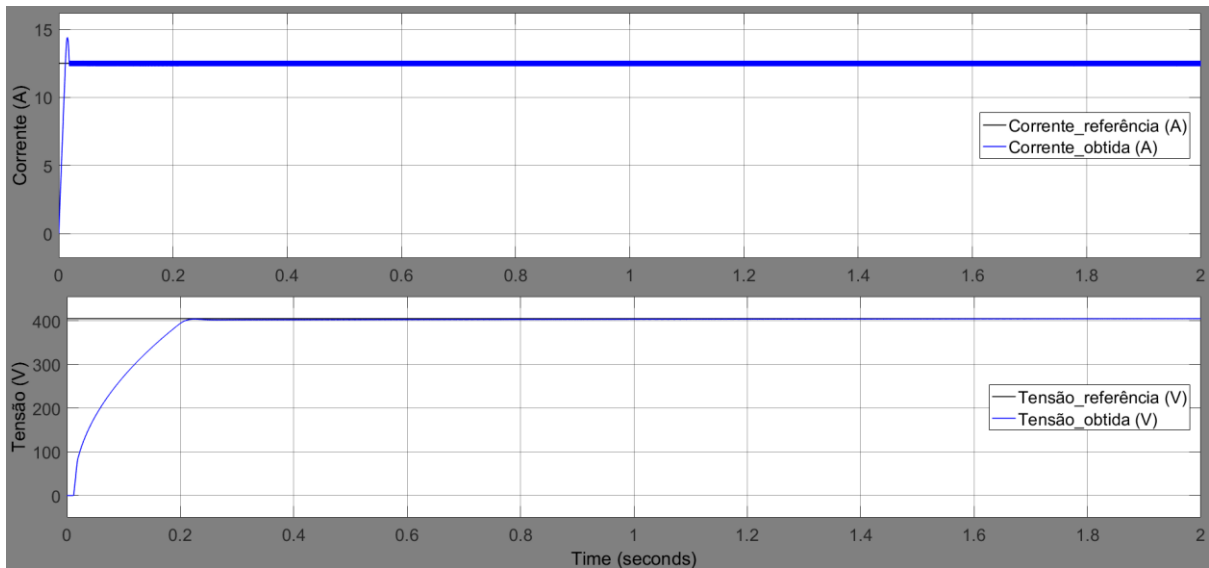


Figura 72: Figura superior, corrente de referência a preto e corrente obtida a azul, obtidas à saída do controlador de tensão e corrente, com escala de 2 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, tensão de referência a preto e tensão obtida a azul, obtidas no controlador de tensão e corrente, com escala 100 V/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas, a escala é de 0,2 s/DIV.

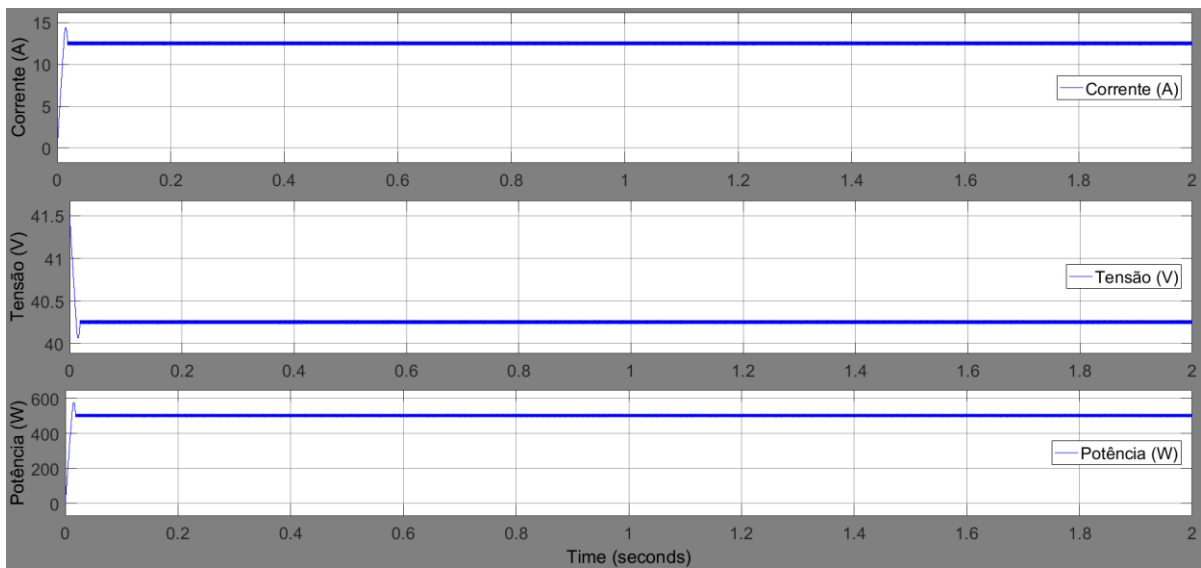


Figura 73: Curvas à saída do painel fotovoltaico para o sistema de conversão 3. Figura superior, corrente com escala de 5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 0,5 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

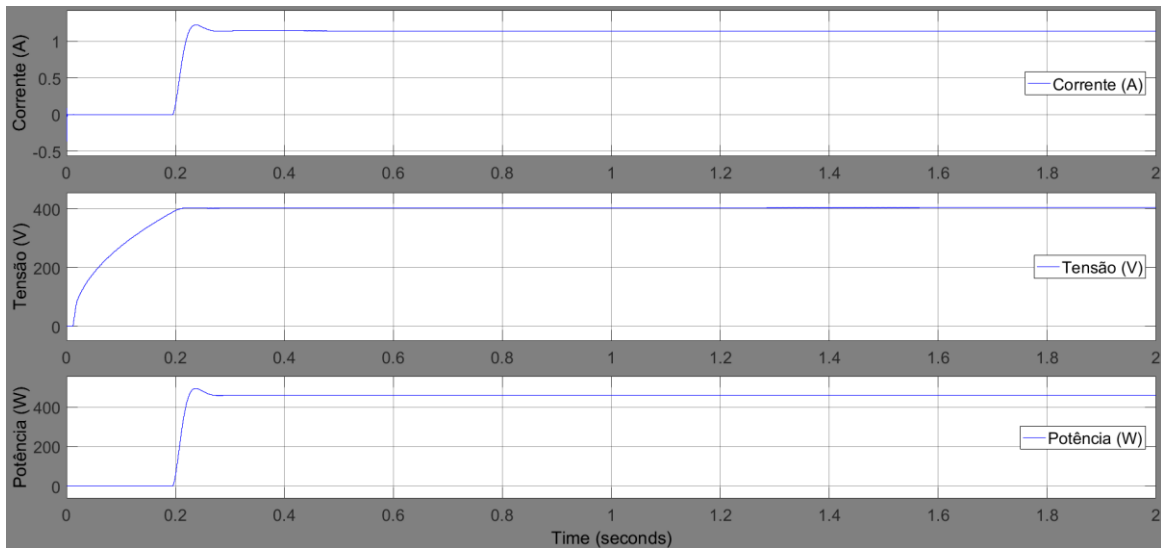


Figura 74: Curvas à saída do conversor elevador no sistema de simulação 3. Figura superior, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 100 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

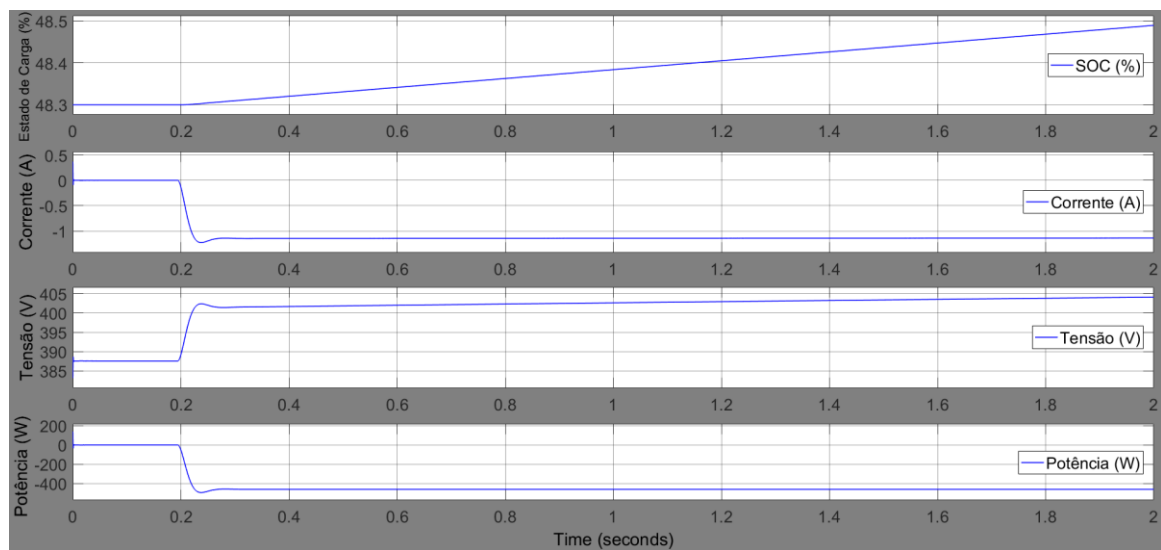


Figura 75: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 3. Primeira figura, estado de carga na bateria com escala de 0,1 %/DIV no eixo das ordenadas. Segunda figura, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Terceira figura, tensão com escala de 5 V/DIV no eixo das ordenadas. Quarta figura, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas, a escala é de 0,2 s/DIV.

Observando as evoluções temporais, compreende-se que o sistema de conversão 3 se encontra a funcionar corretamente: à saída do painel tem-se uma potência de 500 W e por sua vez à saída do conversor elevador tem-se uma potência de 460 W, aproximadamente, potência essa que será entregue à bateria. Desta forma, será possível aplicar os parâmetros dos melhor e pior cenários de radiação e temperatura. Analogamente ao que foi referido anteriormente, não serão demonstradas as evoluções temporais do controlo de corrente e tensão por forma a evitar redundâncias.

Em seguida serão demonstradas as evoluções temporais para o melhor cenário, mês de julho, onde são demonstradas as evoluções temporais à saída do painel fotovoltaico (Figura 76), à saída do conversor de potência (Figura 77) e à saída da bateria (Figura 78).

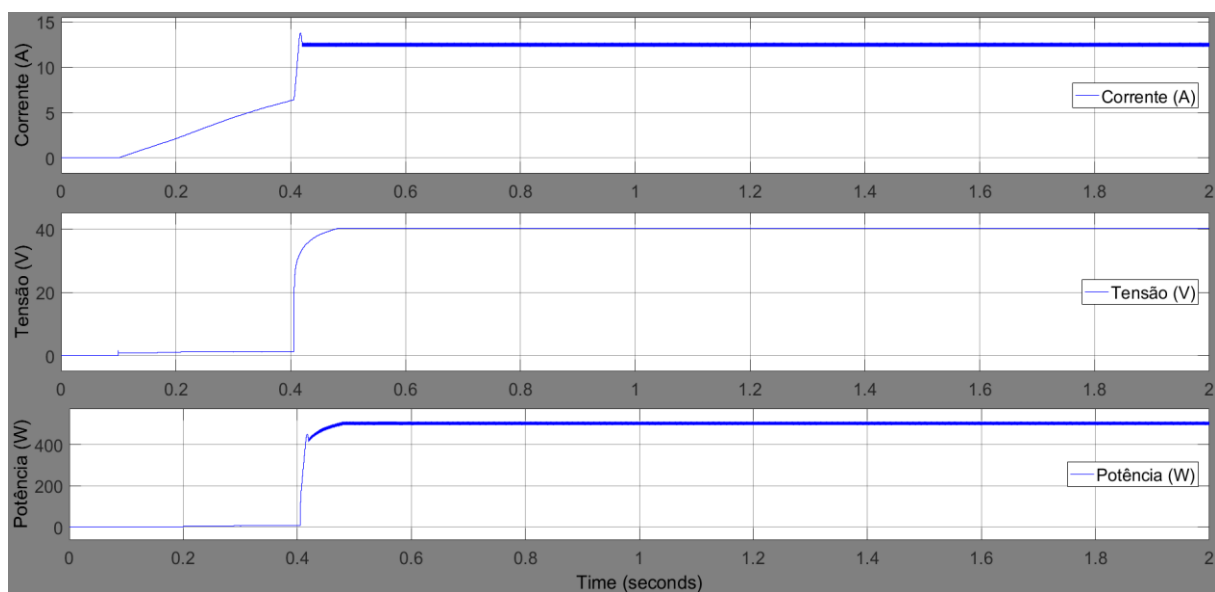


Figura 76: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 3. Figura superior, corrente com escala de 5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 10 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

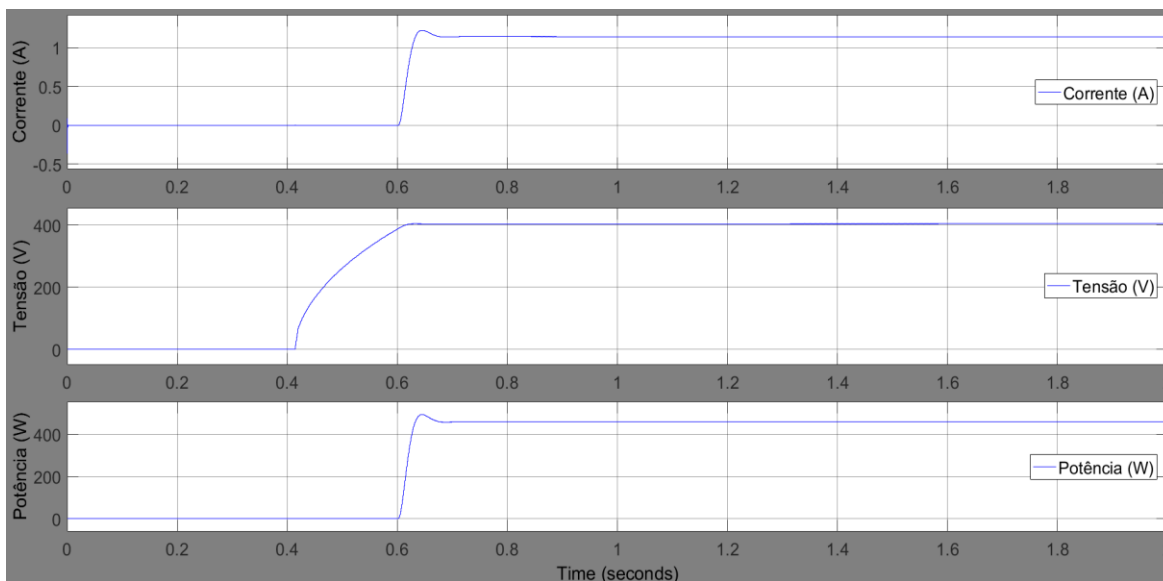


Figura 77: Curvas à saída do conversor elevador no sistema de conversão 3. Figura superior, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 100 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

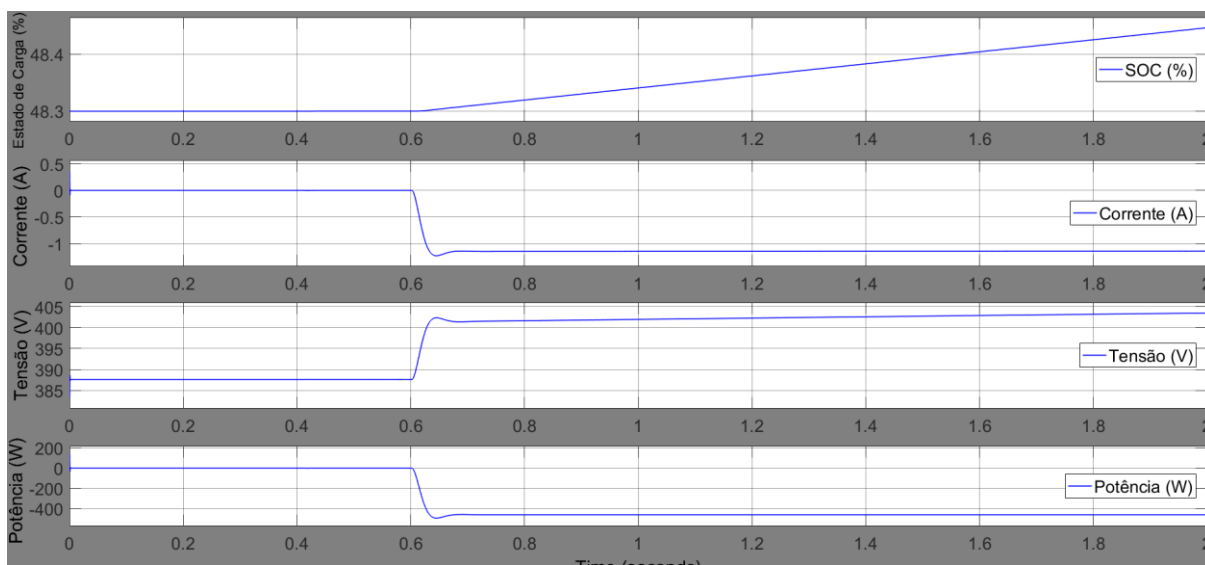


Figura 78: Curvas à saída da bateria no sistema de simulação 3. Primeira figura, estado de carga na bateria com escala de 0,05 %/DIV no eixo das ordenadas. Segunda figura, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Terceira figura, tensão com escala de 5 V/DIV no eixo das ordenadas. Quarta figura, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas, a escala é de 0,2 s/DIV

Analisando as evoluções temporais, verifica-se que existe uma discrepância entre a potência gerada pelo painel, aproximadamente 503 W, e a potência obtida aos terminais da bateria, aproximadamente 460 W. Tal pode ser justificado devido às quebras de tensão associadas aos elementos constituintes do sistema. A corrente apresenta um valor aproximadamente de 1 A e o tempo de carga da bateria situa-se no intervalo de tempo $0,6 < t < 2$ s.

Seguidamente, é apresentada a simulação para o pior cenário de radiação e temperatura, mês de dezembro. São demonstradas as evoluções temporais à saída do painel fotovoltaico (Figura 79), à saída do conversor de potência (Figura 80) e à saída da bateria (Figura 81).

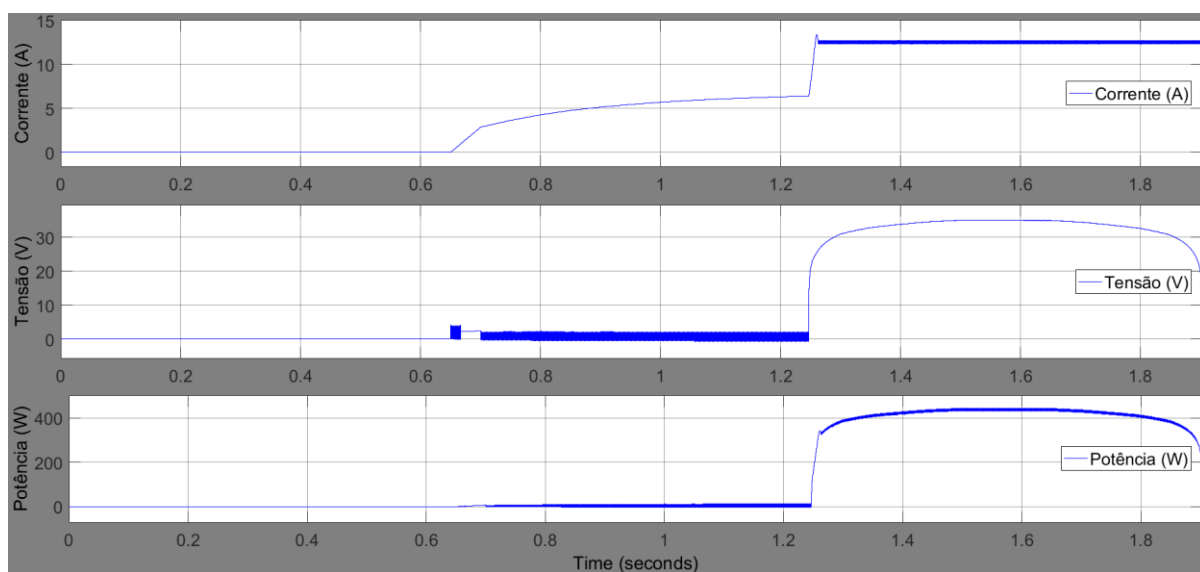


Figura 79: Curvas à saída do painel fotovoltaico no sistema de conversão 3. Figura superior, corrente com escala de 5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 10 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

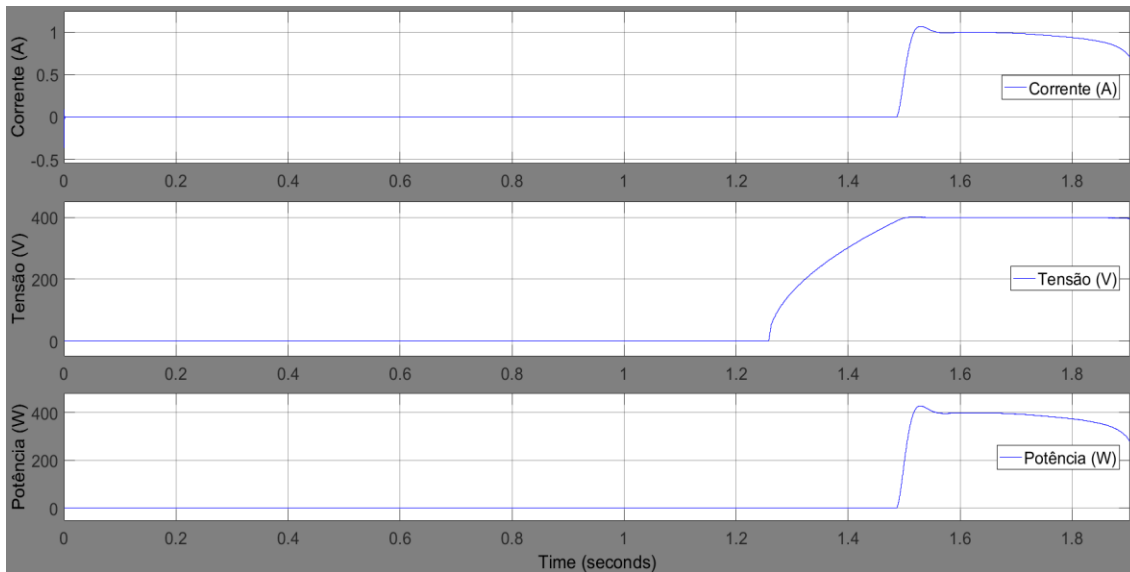


Figura 80: Curvas à saída do conversor elevador no sistema de conversão 3. Figura superior, corrente com escala de 0,5 A/DIV no eixo das ordenadas. Figura intermédia, tensão com escala de 100 V/DIV no eixo das ordenadas. Figura inferior, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas a escala é de 0,2 s/DIV.

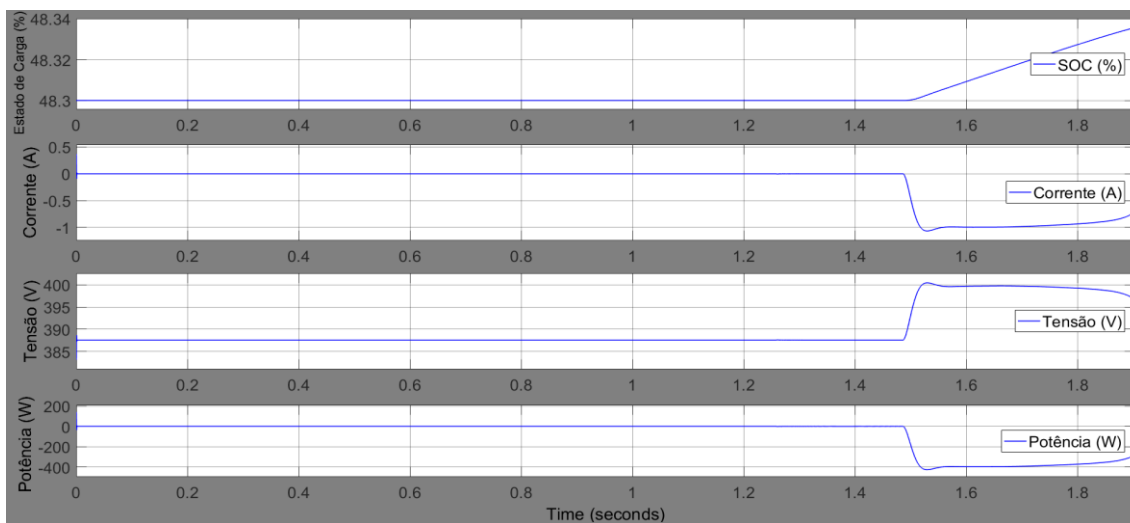


Figura 81: Curvas à saída da bateria no sistema de conversão 3. Primeira figura, estado de carga na bateria com escala de 0,02 %/DIV no eixo das ordenadas. Segunda figura, corrente com escala de 0,5A/DIV no eixo das ordenadas. Terceira figura, tensão com escala de 5 V/DIV no eixo das ordenadas. Quarta figura, potência com escala de 200 W/DIV no eixo das ordenadas. No eixo das abcissas, a escala é de 0,2 s/DIV

Tal como nos dados analisados anteriormente, a potência gerada pelo painel fotovoltaico é de, aproximadamente, 420W, e a entregue à bateria é de, aproximadamente, 400 W. As potências apresentam valores menores devido às circunstâncias impostas para esta simulação, nomeadamente a radiação e a temperatura serem consideravelmente inferiores comparativamente à simulação do melhor cenário de radiação e temperatura.

A corrente atinge um valor próximo de 1 A, sendo que a carga da bateria se inicia mais tarde na simulação com um intervalo de tempo menor, definido por $1,5 < t < 2$ s.

6. Conclusões

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões relativas aos três sistemas de conversão de energia solar fotovoltaica em energia elétrica para o carregamento de veículos elétricos, assim como as escolhas relativamente aos sistemas de conversão de potência que se encontram interligados entre o painel fotovoltaico e a bateria. Efetua-se ainda uma comparação entre os dois sistemas de conversão que carregam as baterias de 400V com o intuito de perceber qual o sistema que melhor se enquadra nesse propósito. Por fim, serão também apresentadas as perspectivas futuras de trabalhos que possam vir a ser realizadas no desenvolvimento do tema deste projeto final de mestrado.

6.1. Conclusões gerais

A energia solar fotovoltaica tem vindo a demonstrar ser um recurso importante no dia-a-dia para diferentes áreas e naquilo que é a substituição dos combustíveis fósseis por soluções renováveis, o que já é possível verificar pelos inúmeros postos de carregamento de veículos elétricos. O propósito deste trabalho final de mestrado assenta na implementação em veículos elétricos de células fotovoltaicas flexíveis, de forma a moldarem-se à estrutura do veículo e, por sua vez, proporcionarem um alto rendimento. Através do catálogo do painel escolhido, sabe-se que este ocupa uma área útil de 2,6 m², sendo consideravelmente inferior à área útil do veículo elétrico escolhido, 4,2 m² (Anexo M). Futuramente, com o avanço e progresso a nível tecnológico, será possível aumentar a máxima potência produzida pelo painel fotovoltaico.

Tendo em conta os diferentes métodos de conversão de potência disponíveis que permitem o carregamento de uma bateria por meio de um painel fotovoltaico, efetuaram-se três sistemas de conversão: um dos sistemas com o propósito de carregar uma bateria de 800V utilizada em veículos pesadas ou veículos ligeiros com maior autonomia (comparativamente aos veículos ligeiros com baterias de 400V) e dois sistemas de conversão para carregamento de baterias de 400 V. O estudo destes três sistemas de conversão foi realizado com o objetivo de encontrar a máxima potência disponibilizada à bateria. De seguida, são mostrados na Tabela 16 os resultados obtidos para os três sistemas de conversão.

Tabela 16: Resumo dos dados obtidos para os três sistemas de conversão.

Valores obtidos na entrada da bateria		Sistema de conversão 1	Sistema de conversão 2	Sistema de conversão 3
Potência nas condições nominais [W]		484	511	503
SOC [%]		48,3	48,3	48,3
Rendimento [%]		91,3	96,4	94,9
Capacidade da bateria [Ah]		1	0,5	0,5
Melhor cenário – julho (G = 1155 W/m ² ; T=31,25°C)	Potência [W]	350	400	460
	SOC após carga [%]	48,34	48,34	48,45
Pior cenário – dezembro (G = 509 W/m ² ; T = 9°C)	Potência [W]	250	300	400
	SOC após carga [%]	48,31	48,31	48,34

Os dados da Tabela 16 permitem comparar os três sistemas em estudo, apesar de o primeiro sistema ter sido construído para o carregamento de uma bateria de 800V e os restantes dois para o carregamento de uma bateria de 400V. Verifica-se que o sistema que apresenta melhores resultados é o sistema 3, pois é o sistema que gera mais potência e que, por sua vez, irá proporcionar um nível de carregamento da bateria mais significativo, como se pode constatar pelo SOC. Assim, se o intuito for o carregamento de uma bateria de 400 V, o melhor sistema a implementar será o sistema de conversão 3. Comparativamente ao sistema de conversão 2, o único aspeto em que diferem é no conversor de potência, sendo que no sistema de conversão 2 é utilizado um conversor quadrático e no sistema de conversão 3 é utilizado um conversor elevador. No entanto, ambos têm um controlo de tensão e corrente associados. O sistema de conversão 1, composto por um conversor quadrático com um controlo MPPT associado ao sistema de conversão de potência, mostra que é possível utilizar o modelo para o carregamento de baterias de 800V, apesar de apresentar o menor rendimento dos três sistemas, uma justificação que se deve ao facto da complexidade do sistema, pois existem mais elementos com quedas de tensão associadas.

Para o mês de dezembro, considerado o pior cenário tendo em conta as características de radiação e temperatura, a potência obtida para os três sistemas de simulação é consideravelmente inferior comparativamente aos dados obtidos para o mês de julho. Estas características por sua vez também se refletem na evolução temporal do SOC, sendo que a diferença entre o valor inicial e o valor final do SOC é inferior à verificada para o mês de junho. Em virtude do facto de os dias serem menores e existirem períodos onde a radiação incidente também é menor.

Comparando os dados obtidos em simulação com os parâmetros de bateria de VE nas Tabelas 1 e 2, tem-se os seguintes valores em consideração:

- Para o sistema de conversão 1:

Carga da bateria, $Q_b = 1 \text{ Ah}$;

Tensão na bateria, $U_b = 800 \text{ V}$.

Considerando um carregamento de 10h, obtém-se uma carga de 10 Ah, para estes valores, a energia na bateria é de 8 kWh.

Considerando um consumo de 150 Wh/km, obtém-se uma autonomia de 53,3 km.

- Para o sistema de conversão 2 e 3:

$Q_b = 0,5 \text{ Ah}$;

$U_b = 400 \text{ V}$.

Considerando um carregamento de 10 h, obtém-se uma carga de 5 Ah, para estes valores, a energia na bateria é de 2 kWh.

Considerando, novamente, um consumo de 150 Wh/km, obtém-se uma autonomia de 13,3 km.

Comparando com as soluções comerciais atuais e dispostas na Tabela 2 e começando pelo sistema de conversão 1, onde se aborda uma solução composta por uma bateria de 800V, para efeitos de comparação é tido em conta o modelo IONIQ 5, da Hyundai, onde para uma mesma bateria de 800 V e com uma capacidade de 111,11 Ah, o veículo apresenta uma autonomia de 365 km, onde o consumo é de 192 Wh/km. Estes valores são relativamente superiores aos obtidos para o sistema de conversão 1, onde se teve em conta, na simulação, valores de carga da bateria na ordem 10 Ah, (considerando uma capacidade de 1 Ah, com um tempo de carga de 10 h), que culmina numa autonomia de 53,3 km. A diferença nos valores de autonomia assenta sobretudo na capacidade da bateria considerada na simulação, que é 100 vezes inferior ao modelo comercial referido.

Para os sistemas de conversão 2 e 3, onde se considerou uma bateria de 400 V para ambos, é tido em conta, para efeitos de comparação, o modelo Sion, da marca Sono Motors, onde para a bateria de 400 V e com uma capacidade de 135 Ah, o veículo apresenta uma autonomia de 260 km, onde o consumo é de 181 Wh/km. Estes valores são relativamente superiores aos obtidos para os sistemas de conversão 2 e 3, onde se teve em conta, na simulação, valores de carga da bateria na ordem de 5 Ah, (considerando uma capacidade de 0,5 Ah, com um tempo de carga de 10 h), que culmina numa autonomia de 13,33 km. A diferença nos valores de autonomia justifica-se novamente pelo valor da capacidade da bateria considerada na simulação, que é 27 vezes inferior ao modelo comercial referido.

6.2. Perspetivas de trabalhos futuros

No âmbito de proposta de trabalhos futuros em torno do tema deste trabalho final de mestrado, fica a sugestão de implementar o sistema idealizado em laboratório para verificar o seu funcionamento a uma escala inferior. Seria também interessante poder utilizar células orgânicas devido ao seu rendimento superior.

O sistema idealizado neste trabalho poderá também ser aplicado a larga escala, estendendo o sistema como fonte de fornecimento a meios de transporte elétricos.

Fica ainda a sugestão de aplicar ao sistema um armazenamento à base de hidrogénio, *fuel cells*, que reduzem a pegada ambiental associada à exploração de Lítio e metais associados à construção das baterias de iões de Lítio.

Seria ideal, também, otimizar o dimensionamento dos controladores de tensão e corrente para o conversor elevador e conversor quadrático.

Bibliografia

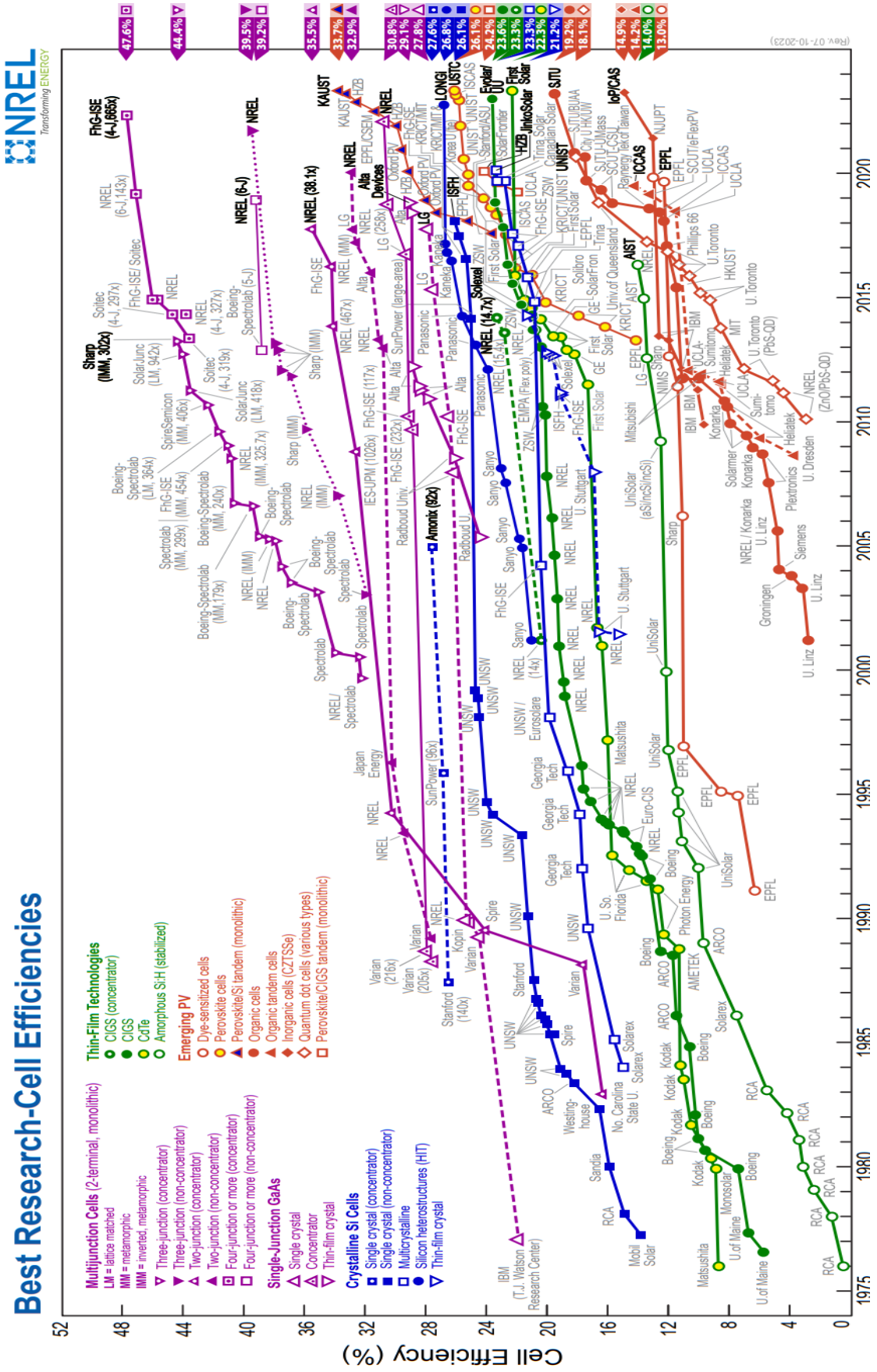
- [1] Evolut Green. Pesquisa: Historia dos VE. <https://www.evolut.green/blog/breve-historia-sobre-os-veiculos-eletricos/>.
- [2] Vallêra, Antonio; Brito, Miguel - "Meio século de história fotovoltaica", Gazeta de Física, 2006.
- [3] Energy Informative. Pesquisa: Solar Compare. <http://www.energyinformative.org/solar-basics/#compare>.
- [4] LugEnergy. Pesquisa: Tipos de Carregamento para VE (4 Modos). <https://www.lugenergy.pt/tipos-de-carregamento-4modos/>.
- [5] All Electronics Group. Pesquisa: Conversores comutados. <https://allelectronicsgr.com.br/conversores-comutados-parte-3/>.
- [6] Nabais, Tatiana - "Sistemas de carregamento de veículos elétricos wireless", tese de mestrado, Universidade da Beira Interior, Faculdade de Engenharia, Outubro 2017.
- [7] Quilometrosquecontam. Pesquisa: Baterias para carros elétricos: que tipos existem e quais as suas características? <https://quilometrosquecontam.com/baterias-carros-eletricos/>.
- [8] Brás, Nuno - "Conversor Elevador Quadrático e Geradores Termoelétricos para Recolha de Energia Térmica", tese de mestrado, IST, Outubro 2014.
- [9] Calaia, Fábio - "Estudo comparativo de três tecnologias fotovoltaicas", tese de mestrado, IST, Junho 2011.
- [10] Cabral, Claudia; Neto, Lauro; Filho, Delly; Diniz, Antônia - " Modelagem e Simulação de Gerador Fotovoltaico".
- [11] Infopedia. Pesquisa: Crise do petróleo (anos 70 do séc XX) [https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$crise-do-petroleo-\(anos-70-do-sec.-xx\)](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$crise-do-petroleo-(anos-70-do-sec.-xx)).
- [12] US Departmente of Energy | Energy Efficiency & Renewable Energy. Pesquisa: How do fuel cell electric vehicles work using hydrogen ? <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>.
- [13] Glpautogas.info. Pesquisa: Como funcionam os carros a hidrogénio. <https://www.glpautogas.info/pt/como-funcionam-carros-hidrogenio.html>.
- [14] Petry, Clovis - "Introdução aos Conversores CC-CC", tese de mestrado Universidade Federal de Santa Catarina, Agosto de 2001.
- [15] Lemos, Daniel - "Algoritmo MPPT para Conversor CC-CC para aplicação em Painéis Fotovoltaicos", tese de mestrado, IST, Novembro de 2015.
- [16] Alves, José - " Eletronica Industrial: Semicondutores e conversores de potência", Fundação Calouste Gulbenkian, 2ª edição, 2013.
- [17] Assef, Anuari - "Conversor CC-CC Elevador de Tensão Boost", Setembro de 2018.
- [18] Agência Portuguesa do Ambiente. Pesquisa: Protocolo de Quioto. <https://apambiente.pt/clima/protocolo-de-quioto>.
- [19] Labrinque, Sophie; Robyns, Benoit; Resende, Maria - "Modelo Equivalente". <https://e-lee.ist.utl.pt/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/Cellule/Modele.htm>.

- [20] Labrinque, Sophie; Robyns, Benoit; Resende, Maria - "Tecnologia das células". <https://e-lee.ist.utl.pt/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/Cellule/Tecnologie.htm>.
- [21] Shang, Jinlei - "THE ROLE OF HYDROGEN AND FUEL CELLS FOR ULTRA LOW CARBON VEHICLES", dissertação de doutoramento, University of Birmingham, Abril de 2013.
- [22] Silva, Carlos - " Conversor CC/CC para aplicação em instalação fotovoltaica", tese de mestrado, FEUP, Fevereiro de 2012.
- [23] EDP. Pesquisa: Tipos de tomadas para carregar carros elétricos <https://www.edp.pt/particulares/content-hub/tipos-de-tomadas-para-carregar-carros-eletricos/>.
- [24] U.S Department of Transportation. Pesquisa: Tipos de VE. <https://www.transportation.gov/rural/ev/toolkit/ev-basics/vehicle-types>.
- [25] Tom, Geist; Kamath, Haresh; Porter, Suzanne; May-Ostendorp, Peter - " Designing Battery Charger Systems", Setembro de 2006.
- [26] Yadav, Nupur; Sambariya, D. - "Mathematical Modelling and Simulation of Photovoltaic Module Using MATLAB/SIMULINK", Julho de 2018.
- [27] Chewale, Mangesh; Wanjari, Ritesh; Savakhande, Viraj; Sonawane, Pravin - "A Review on Isolated and Non-isolated DC-DC Converter for PV Application", 2018.
- [28] Sá, Nuno - "Sistema de Conversão de Energia Solar Fotovoltaica para Carregamento de um Veículo Elétrico", tese de mestrado, ISEL, fevereiro de 2017.
- [29] IPMA. Pesquisa: "Dados Temperatura e radiação no ano de 2022" <https://www.ipma.pt/pt/oclima/monitorizacao/>.
- [30] Customized Technical Service. Pesquisa: Bateria de 400 V iões de lítio. <https://www.ctsbattery.com/sale-27532597-high-voltage-400v-50ah-40kwh-ev-lifepo4-electric-car-battery-pack-360v-100ah.html>.
- [31] Maroti, Pandav; Padmanaban, Sanjeevikumar; Bhaskar, Mahajan; Ramachandaramurthy, Vigna; Blaabjerg, Frede - "The state-of-the-art of power electronics converters configurations in electric vehicle technologies", Março de 2022.
- [32] Tremblay, Oliver; Dessaint, Louis; Dekkiche, Abdel-illah - "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", Ecole de Technologie Superieure, Setembro de 2007, IEEE, 0-7803-9761-4/07.
- [33] Flykol. Pesquisa: "Quais são as vantagens e desvantagens da bateria de iões de lítio?". <https://www.flykol.com/pt/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-lithium-ion-battery/>
- [34] Ayres, Wagner; Bridi, Éder; Sartori, Hamilton; Pinheiro, José - " Conversor de Alto Ganho de Tensão Dual Boost Quadrático", Universidade Federal de Santa Maria.
- [35] Varandas, Carlos; Almeida, Aníbal; Vallêra, António; Fernandes, Eduardo; Perreira, Manuel; Coelho, Pedro - "As Energias do Presente e do Futuro", Sociedade Portuguesa de Física, novembro de 2005.
- [36] Mench, Mathew - " Fuel Cell Engines", 2008.
- [37] Vallêra, Antonio; Brito, Miguel - " Meio século de história fotovoltaica", Sociedade Portuguesa de Física.

- [38] Baptista, António; Fernandes, Carlos; Pereira, Jorge; Paisana, José – “Fundamentos de Eletrónica”, Lidel, 2012.
- [39] Volvo. Pesquisa: "Especificações do XC40 Recharge." <https://www.volvocars.com/pt/cars/xc40-electric/specification/>
- [40] Soares, J.P. Sopa - "Controlo de Sistemas I", Automação Industrial e Sistemas de Potência, ISEL, Setembro de 2005.
- [41] Simulink - "Implemente generic battery model", Matab 2016
<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>.
- [42] Customized Technical Service. Pesquisa: Bateria de 800 V iões de lítio.
<https://www.ctsbattery.com/sale-41072298-cts-lithium-ion-ev-truck-battery-pack-400v-540v-614v-700v-800v-200kwh-400kwh-hybrid-electric-truck-c.html>.
- [43] Electric Vehicle Database. Pesquisa: Vários Veículos. <https://ev-database.org/>.
- [44] PortalEnergia. Pesquisa: Painéis solares mais eficientes. <https://www.portal-energia.com/paineis-solares-mais-eficientes/>.
- [45] Traça de Almeida, Aníbal; Moura, Pedro - " Hidrogénio e células de combustível", Sociedade Portuguesa da Física.

Anexos

Anexo A – Evolução da eficiência energética



HG-L Lightweight & Flexible Series

Greatly decreased the product weight,
far less cost to install.

515W–535W



• Products Features

- Lightweight, Ultra-high flexibility, Easy to install.
- Reducing the adaptive loss to get higher power.
- Competitive weak light tolerance performance.
- Minimizing the shading affection to reduce power loss.
- The superior reliability has been proven through rigorous weathering test:
 - Sand and dust resistance, acid and alkali-resistance, salt mist resistance
 - Anti- PID
 - Hail shock resistance

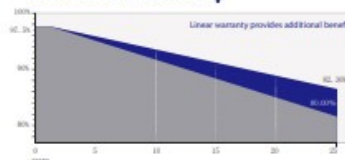
• Quality System

ISO9001
ISO14001
ISO45001

• Product Certification



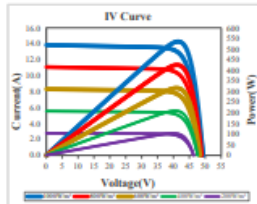
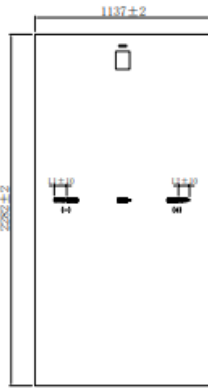
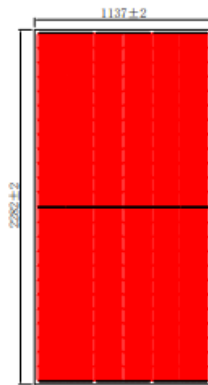
• Product Warranty



12 Year Quality and process performance Assurance



25 Year Linear power Output Warranty



Electrical Parameters

Module Type	HG-L515-72CW		HG-L520-72CW		HG-L525-72CW		HG-L530-72CW		HG-L535-72CW	
	STC	NMOT	STC	NMOT	STC	NMOT	STC	NMOT	STC	NMOT
Maximum Power (P _{max})	515W	383W	520W	387W	525W	391W	530W	394W	535W	398W
Open Circuit Voltage (V _{oc})	49.45V	46.21V	49.60V	46.35V	49.75V	46.49V	49.90V	46.63V	50.05V	46.77V
Short Circuit Current (I _{sc})	13.56A	10.94A	13.63A	11.00A	13.70A	11.06A	13.76A	11.11A	13.83A	11.16A
Max Power Voltage (V _{mp})	40.90V	38.77V	41.05V	38.91V	41.20V	39.05V	41.35V	39.19V	41.50V	39.33V
Max Power Current (I _{mp})	12.61A	9.88A	12.68A	9.95A	12.75A	10.01A	12.83A	10.05A	12.90A	10.12A
Module Efficiency STC (η _m)	19.8%		20.0%		20.2%		20.4%		20.6%	
Power Tolerance						0~+5W				
Maximum System Voltage						1500V DC				
Max Series Fuse Rating						25A				

STC: irradiance 1000W/m², module temperature 25°C, AM=1.5
 NMOT: irradiance of 800W/m², ambient temperature 20°C, and wind speed 1m/s
 The uncertainty of Pmax, Voc, Isc testing is ± 3%

Mechanical Specifications

External Dimension	2282mm*1137mm		
	Basic Version	Enhanced Version	High Performance Version
Thickness	2.7mm	3.0mm	3.2mm
Weight	7.8kg	9.0kg	10.8kg
Solar Cell	Mono crystalline 182*91mm, 144(6*24)		
Frame	/		
GLASS	/		
Junction Box	IP68, 3 diodes, MC4 compatible		
Output Cables	4.0mm ² (IEC), 300mm(+)/300mm(-) or Customized Length		

Temperature characteristic

Pmax Temperature Coefficient	-0.35 %/°C
Voc Temperature Coefficient	-0.26 %/°C
Isc Temperature Coefficient	+0.047 %/°C
Operating Temperature	-40 ~ +85 °C
Nominal module operation temperature	45 ± 2 °C

Package

Packing Unit	40HQ	17.5m platform truck
PCS/CTNS	68	68
Qty of Package	20	30
PCS/Packages	1360	2040

Anexo C – Código Matlab utilizado para as simulações

```
clc; clear all;
%Carateristicas ambientais
Tr=25+273.15;
tamb=25;
NOCT=25;
Gr=1000;

G=1000;
T=273.15+tamb;

Gmaior=xlsread('C:\Users\david\OneDrive\Ambiente de
Trabalho\Final\Gmaior.xlsx','A:B');
Tmaior=xlsread('C:\Users\david\OneDrive\Ambiente de
Trabalho\Final\Tmaior.xlsx','A:B');
Gmenor=xlsread('C:\Users\david\OneDrive\Ambiente de
Trabalho\Final\Gmenor.xlsx','A:B');
Tmenor=xlsread('C:\Users\david\OneDrive\Ambiente de
Trabalho\Final\Tmenor.xlsx','A:B');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Carateristicas painel solar
Vmpr=41.50;
Vcar=52.3;
Impr=12.9;
Iccr=14.3;

Rcarga=Vmpr/Impr;

Ns=36;%numero de celulas
Kisc=0.047;%coeficiente da corrente em função da temperatura
Kvoc=-0.26;%coeficiente da tensão em função da temperatura

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Constantes do dimensionamento do painel
q=1.602*10^(-19);%carga eletrão
K=1.38*10^(-23);%constante de Boltzman
E=1.12*q;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Modelo matemático do painel

Vtr=K*Tr/q;
m=(Vmpr-Vcar)/(Vtr*log(1-(Impr/Iccr)));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Dimensionamento das resistências do painel

Rcarga=Vmpr/Impr;
%considerando Rs=0,1 de modo a permitir o maximo de Ipv
Rs=0.1;
Rp=(Rs*Impr+Vmpr)/(Iccr-Impr);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

%Dimensionamento conversor quadrático

Fs=10*10^3;
Ts=1/Fs;

delta_i=0.10;
delta_vo=0.10;

U1=860;%Tensão de saída conversor

D3=1-sqrt (Vmpr/U1);
Io3=Impr*(1-D3)^2;
Ro3=Vmpr/(Io3*(1-D3)^2);
L13=(Vmpr*D3)/(delta_i*Fs);
L23=(Vmpr*D3)/((1-D3)*delta_i*Fs);
Co3=(Vmpr*D3)/(Ro3*Fs*delta_vo*(1-D3)^2);
C13=(Vmpr*D3)/(Ro3*Fs*delta_vo*(1-D3));

%Dimensionamento do conversor elevador
Fs=10*10^3;
Ts=1/Fs;

delta_i=0.10;
delta_vo=0.10;

Uo=420;
D=1-(Vmpr/Uo);
A=10;
Uc=D*A;
Ioc=Impr*(1-D);
Ro=Vmpr/(Impr*(1-D)^2);
Li=Vmpr*D*Ts/delta_i;
Co=D*Ts*Ioc/delta_vo;

Ganho = Vmpr/U1;

Xi = sqrt(L23/C13)/(2*Ro3);

Td = (pi*sqrt(L23*C13))/(sqrt(1-Xi^2));
Tz = C13*Ro3;
Tp = 4*(Xi^2)*1*Ganho*Ro3*Td;

Kp = (Tz/Tp);
Ki = (1/Tp);

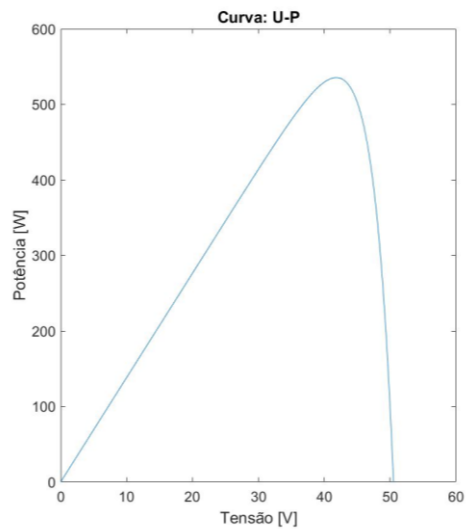
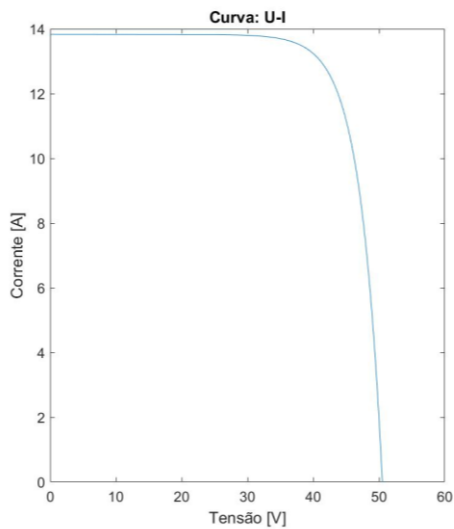
%Plot das curvas I-U & P-U

subplot (1,2,1); plot (U,I);
xlabel ('Tensão [V]');
ylabel ('Corrente [A]');
title ('Curva: U-I');
subplot (1,2,2); plot (U,P);
xlabel ('Tensão [V]');
ylabel ('Potência [W]');
title ('Curva: U-P');

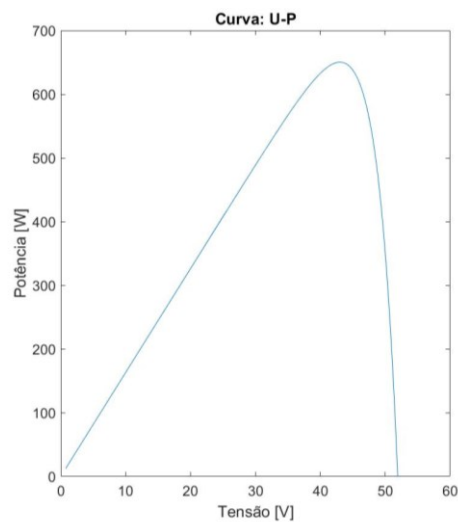
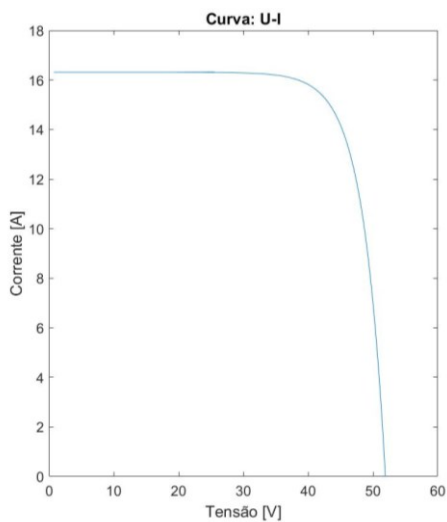
```


Anexo E – Curvas do Pannel Fotovoltaico

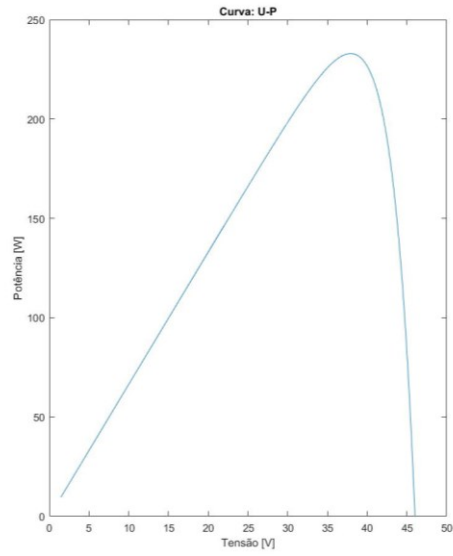
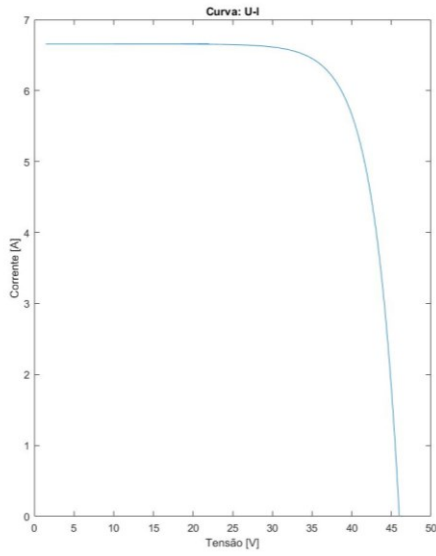
No presente anexo é apresentado as diferentes curvas características do pannel fotovoltaico, são considerados três casos distintos correspondentes a valores de radiação incidente e temperatura. Cada caso é composto por duas curvas, uma de potência em função da tensão e outra de corrente em função da tensão.



$$G = 1000 \text{ W/m}^2, T = 25^\circ\text{C}$$

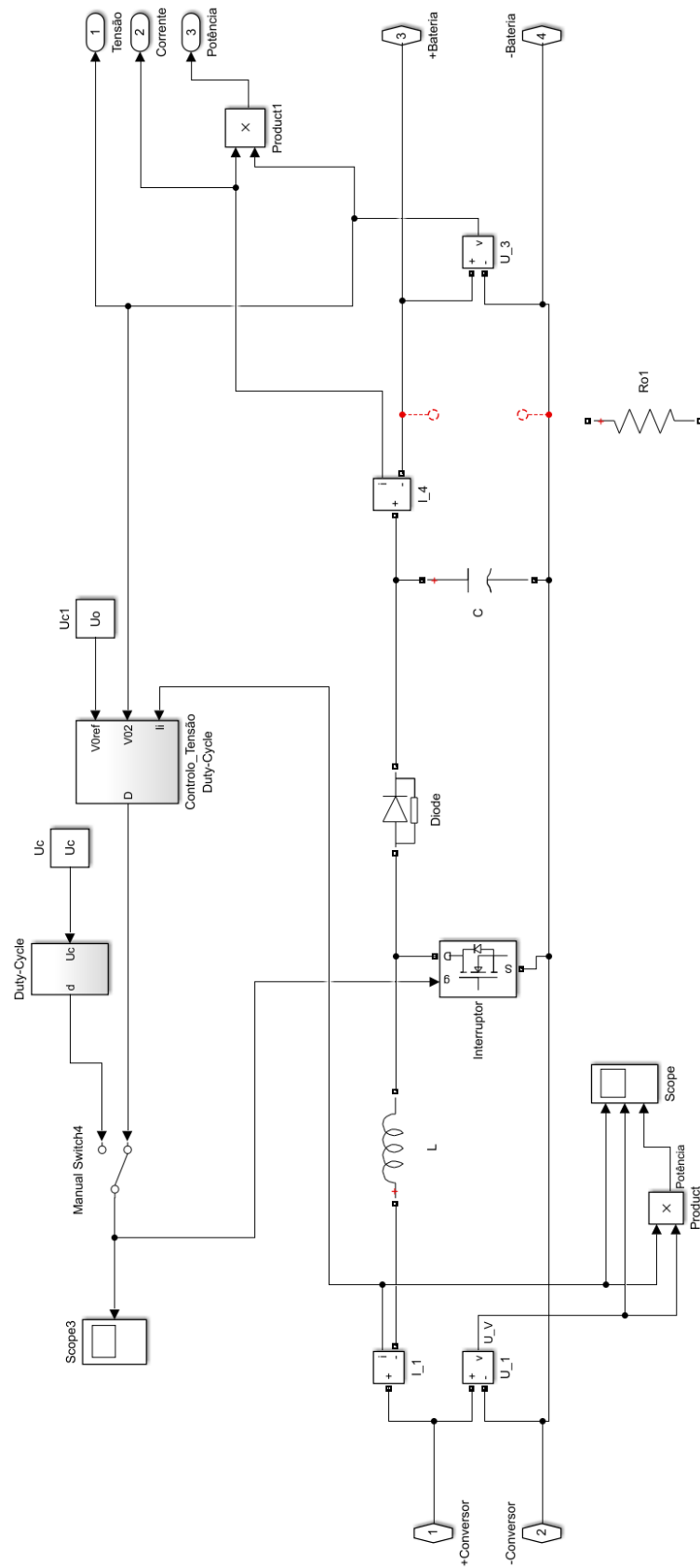


$$G = 1155 \text{ W/m}^2, T = 31.25^\circ\text{C}$$



$$G = 509 \text{ W/m}^2, T = 9^\circ\text{C}$$

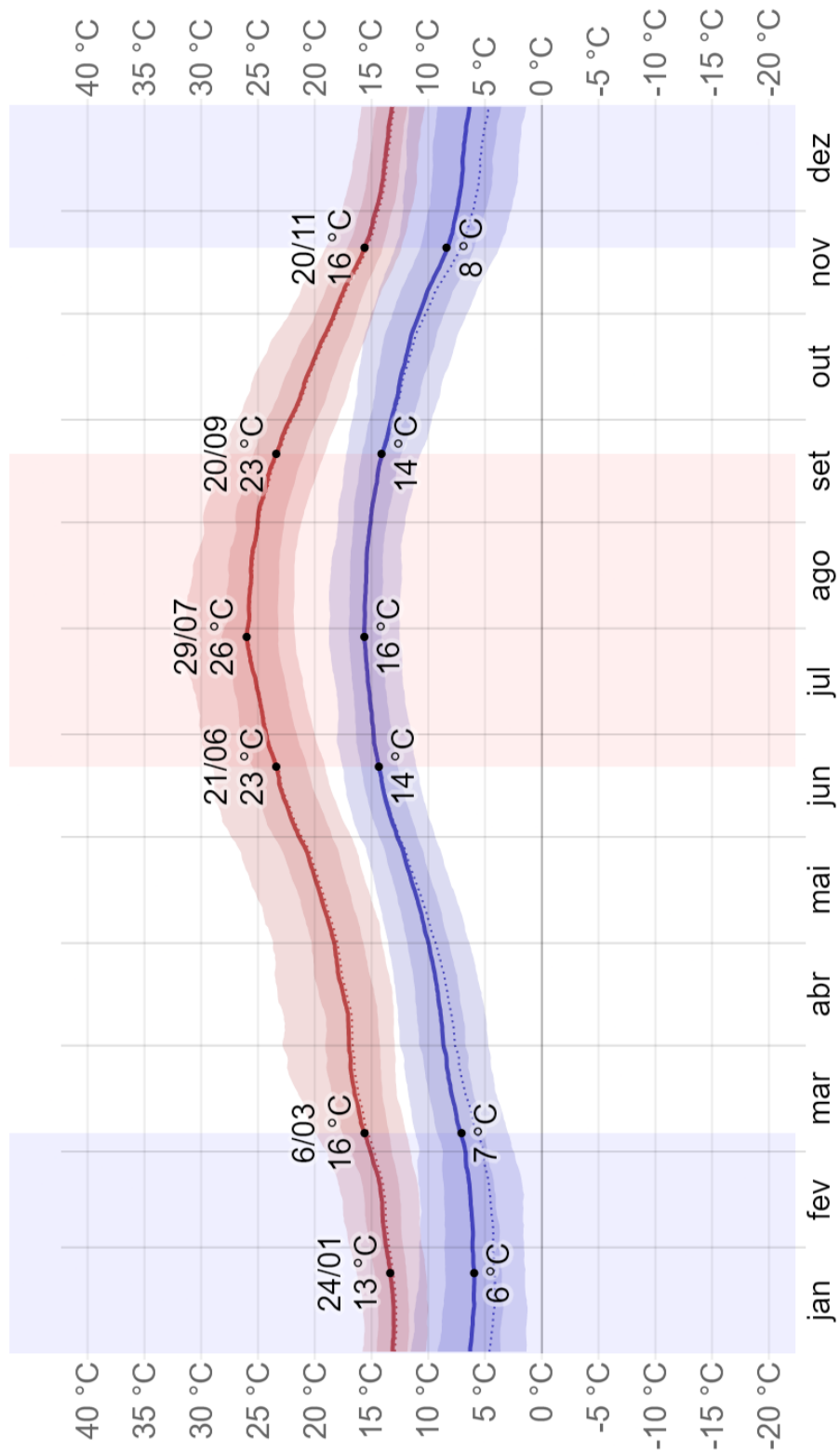
Anexo F – Modelo do conversor elevador implementado em Simulink



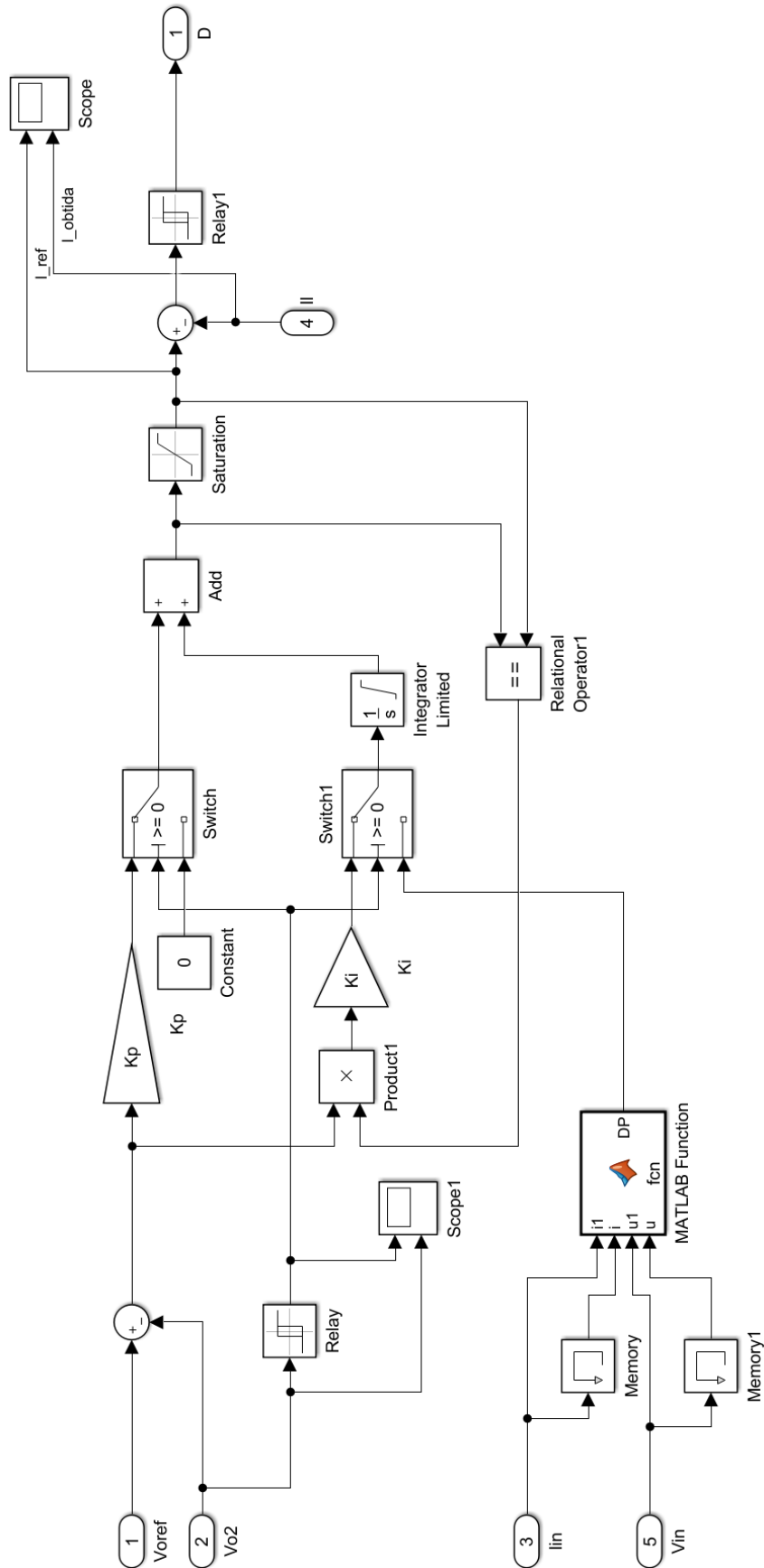
Anexo H – Gráfico da radiação média em Portugal no ano de 2022
[29]

	MÉD ↑↓	MIN ↑↓	MÁX ↑↓
Junho	136.9	0	1155
Abril	75.6	0	1087
Maior	119.5	0	1078
Julho	146.7	0	1049
Agosto	115.0	0	1021
Setembro	85.2	0	1007
Março	71.1	0	947
Outubro	44.1	0	856
Fevereiro	40.6	0	836
Novembro	28.0	0	623
Janeiro	28.0	0	562
Dezembro	24.8	0	509

Anexo I – Temperaturas máximas e mínimas médias em Portugal no ano 2022 [29]



Anexo J – Simulink da junção do controlador de corrente, tensão e MPPT



Anexo K – Catálogo da bateria de 400V [30]



Basic Info.

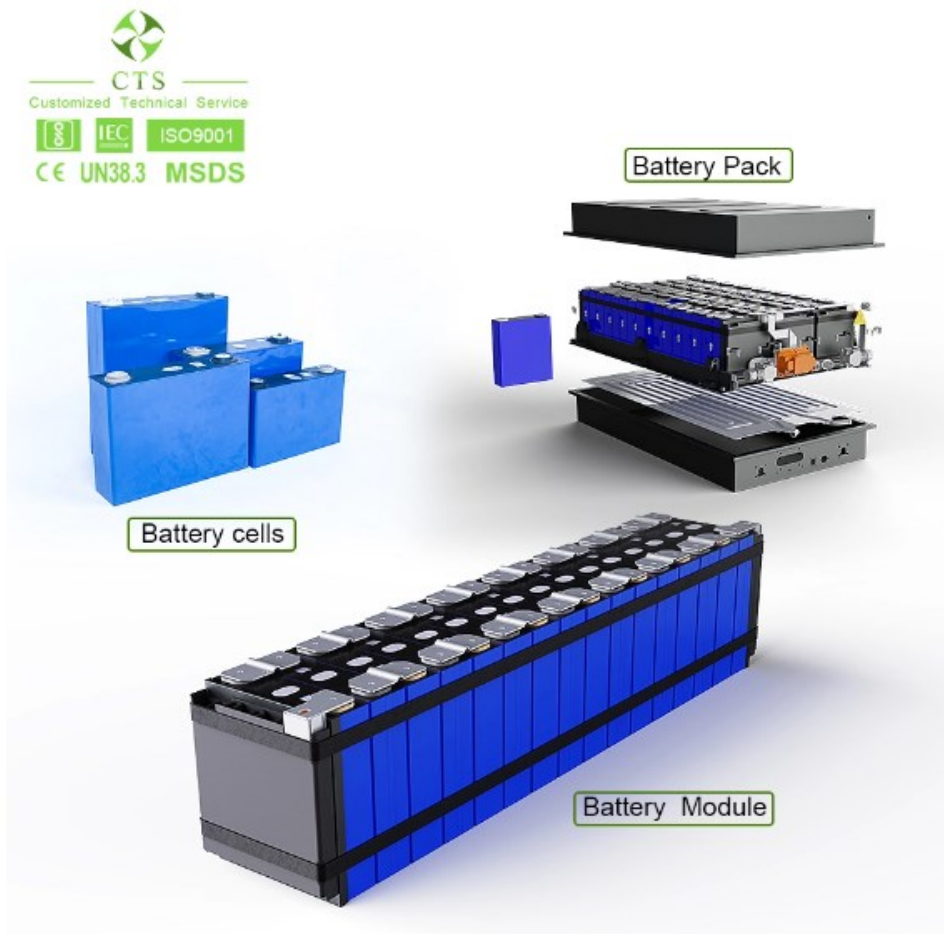
Rated Capacity	>1000MAH	Standard Voltage	>12V
Usage	Remote Control Boat, Remote Control Plane, Remote Control Car, Golf Cart, EV, Electric Vehicle, Truck	Electrolyte	Li-ion
Voltage	400V	Capacity	50ah
Power	20kwh	Certificate	Un38.3/MSDS/CE/RoHS
Battery Type	Nmc Battery Pack	Demmision	1000*900*180mm
Weight	185kg	Warranty	2years
Protection	PCB/PCM/BMS	Case	Blue Film or Metal Case
Company Type	Reputed Factory	Charger	Available
Low and High Temp Protection	Yes	OEM	Accept
Assemb Method	Series and Parallel	Transport Package	Packed by Foam and Case and Carton
Specification	lifepo4 and NMC flat pouch cell	Trademark	OEM
Origin	Hunan, China	HS Code	8507802000
Production Capacity	10000packs/Day		

Dimensions



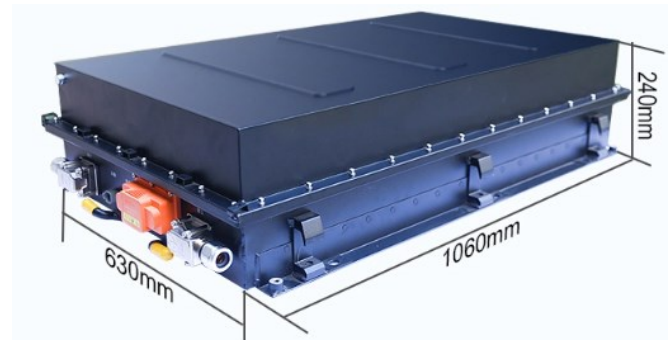
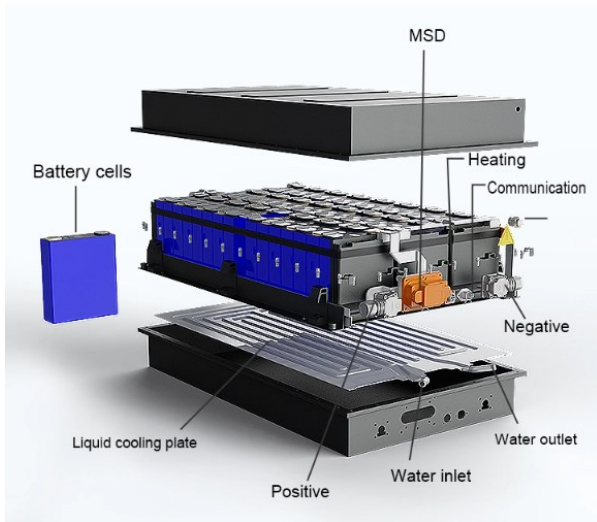
Parameters of 400V 50Ah NMC battery pack			
No.	Items	Technical requirement	Note
1	Battery Type	NMC	
2	Capacity(Ah)	50	@25°C
3	Volatge	400	
4	Power(kWh)	20	
5	Weight(kg)	185	
6	Working Voltage range(DC V)	270-453.6	
7	Continuous discharge current(A)	50	@EOL, @25°C
8	Peak discharge current(A)	100	For 30 seconds
9	Dimension (L/W/H, mm)	1000*900*180	

Anexo L – Catálogo da bateria de 800V [42]



Basic Info.

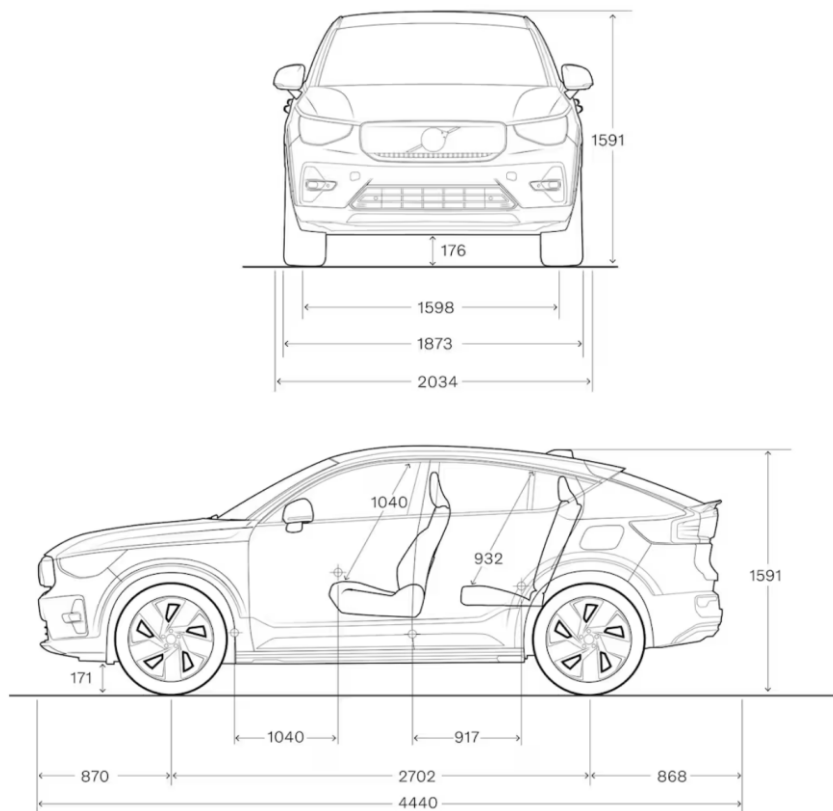
Rated Capacity	50kwh~500kwh	Standard Voltage	500V/650V/700/800V
Usage	EV/Electric Truck/Bus	Electrolyte	Li-ion
Certification	MSDS CE	Warranty	3 Years
Protection	Smart BMS+Relay	Cooling/Heating	Support
Case	IP67 Mental Case	OEM/ODM	Yes
Transport Package	Plywood Case, Un Carton	Specification	customized
Trademark	CTS lithium batteries	Origin	China
HS Code	8507600090	Production Capacity	50000units/Per Year



Dimension of lithium battery in standard box: 1060 * 630 * 240mm

MODEL	F128206	F128230	F153206	F153230
ELECTRICAL SPECIFICATIONS				
Cell Type - Chemistry	3.2V 206ah	3.2V 230ah	3.2V 206ah	3.2V 230ah
Rated Capacity	206Ah	230Ah	206Ah	230Ah
Rated Voltage	128V	128V	153.6V	153.6V
Energy	26.386kWh	29.44kWh	31.16kWh	35.328kWh
IP Protection	IP67			
Cycle life	>3000cycles(90%DOD, 0.5C)			
MECHANICAL SPECIFICATIONS				
Dimensions (L x W x H)	Within L1060*W630*H245mm			
Weight	≤230Kg			
DISCHARGE/CHARGE SPECIFICATIONS				
Discharge Cut-off Voltage	100V	100V	120V	120V
Max Continuous Discharging	1C			
Peak Discharge Current	2C/30s; 3C/5s			
Recommended Discharge Current	0.5C			
CHARGE SPECIFICATIONS				
Charging Limited Voltage	146V	146V	175.2V	175.2V
Max Charging Current	1C			
Recommended Charge Current	0.5C			
TEMPERATURE SPECIFICATIONS				
Self discharge rate	≤ 3 %/month			
Charge Temperature Range	0~50°C			
Discharge Temperature Range	-20~60°C			
Recommended Operating Temp	15~35°C			
Storage Temperature & Humidity Range (Less than 1 month)	-20~35°C, 45~75%RH			
Storage Temperature & Humidity Range (Less than 3 months)	-10~35°C, 45~75%RH			
Recommended Storage Temp. & Humidity Range	15~35°C, 45~75%RH			
System cooling mode	Liquid cooling			

Anexo M – Dimensões Volvo C40 Recharge [39]



Exterior

Altura	1591 mm
Largura	1873 mm
Comprimento	4440 mm
Largura com espelhos	2034 mm
Distância entre eixos	2702 mm
Via dianteira	1598 mm
Via traseira	1603 mm
Diâmetro de viragem	11,4 m

Interior

Espaço para a cabeça à frente	1040 mm
Espaço para a cabeça atrás	932 mm
Espaço para os ombros à frente	1440 mm
Espaço para os ombros atrás	1429 mm
Espaço para as pernas à frente	1040 mm
Espaço para as pernas atrás	917 mm
Espaço para as ancas à frente	1390 mm
Espaço para as ancas atrás	1388 mm

Área	
Tejadilho	$1400 \times (2702 - 1040) = 2324 \text{ mm}^2$
Capô	$1873 \times 1020 = 1910 \text{ mm}^2$
Área Total	$4234 \text{ mm}^2 = \pm 4.2 \text{ m}^2$

