FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



UPS Portátil

Rafael Gustavo Sousa Gonçalves

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Carlos João Ramos

12 de Julho de 2019

© Rafael Gustavo Sousa Gonçalves, 2019

Resumo

Este estudo consistiu no desenvolvimento e construção de uma Fonte de Energia Ininterruptível Portátil (*Uninteruptible Power Supply* - UPS), aplicada ao fornecimento de energia em locais remotos e em caso de catástrofes naturais.

Com base nos requisitos pretendidos, o sistema de armazenamento de energia (bateria) aplicado na UPS corresponde a um conjunto de células com configuração 3S28P (três séries com vinte e oito células em paralelo). Neste sentido simulou-se este sistema adotando uma configuração básica, na qual a bateria é representada por um condensador de 72619F e uma resistência de 3,75mΩ.

Posteriormente, simularam-se os restantes componentes do sistema da UPS: conversor CA/CC (retificador), conversores CC/CC (abaixador e elevador) e conversor CC/CA (inversor). O estudo das topologias é fundamental para o desenvolvimento da UPS.

Após a validação das simulações e dimensionamento dos componentes integrantes da UPS, procedeu-se à construção do protótipo da UPS com o sistema de armazenamento de energia: bateria de iões de lítio (*Lithium-Ion* - Li-Ion) 6S4P. É de salientar que foram impostas algumas restrições a nível de segurança e custo. Após a aquisição de todos os materiais, executou-se a construção do prototipo, passando por vários testes ao longo da sua implementação.

Portanto, o protótipo construido cumpre os requisitos propostos com as limitações impostas.

Abstract

This study consisted in the development and construction of an Uninteruptible Power Supply (UPS), applied to the supply of energy in remote locations and in case of natural disasters.

Based on the desired requirements, the energy storage system (battery) applied to the UPS corresponds to a set of cells with 3S28P configuration (three series with twenty-eight cells in parallel). In this sense, this system was simulated adopting a basic configuration, in which the battery is represented by a capacitor of 72619F and a resistance of 3.75 mΩ.

Subsequently, the remaining components of the UPS system were simulated: AC/DC converter (rectifier), DC/DC converter (step down / step up converter) and DC/AC converter (inverter). The study of topologies is fundamental for UPS development.

After the validation of the simulations and design of the components of the UPS, the prototype of the UPS was built with the energy storage system: Lithium-Ion (Li-Ion) battery 6S4P. It should be noted that some security and cost restrictions were imposed. After the acquisition of all the materials, the construction of the prototype was performed, undergoing several tests throughout its implementation.

Therefore, the built prototype fulfills the proposed requirements with the limitations imposed.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Carlos João Ramos pela orientação, disponibilidade e colaboração durante a realização da presente dissertação e também durante o meu percurso académico.

Aos meus colegas de laboratório I105, Diogo Carneiro, Xavier Silva, Beatriz Cruz, Márcia Alves, José Marrafa e Tiago Neto, pela amizade e por todos os momentos vividos, assim como pelo apoio.

Aos técnicos de laboratório, Rui Carvalho, Nuno Guerra e Pedro Silva, por me terem ajudado no desenrolar da dissertação.

Ao Manuel Ferreira pelo auxílio na realização do desenho em *PCB*.

Ao LSTS por ter disponibilizado a máquina de soldar por pontos células de lítio.

Aos meus colegas de curso, Rodrigo Passos, André Ranito e João Sousa pela contribuição, amizade e ajuda ao longo deste caminho académico.

Aos meus pais, Marco e Anabela Gonçalves, e à minha irmã, Diana, pelo enorme suporte, amor, apoio, paciência e incentivo.

Aos meus avós pelo amor que me têm dado, por estarem sempre presentes e por terem sempre acreditado no meu futuro.

À memória do meu avô Carlos pelo amor que me deu e que me "ía adorar ver nesta fase final de percurso académico".

À minha namorada, Sofia Barbosa, por estar sempre comigo. Pelo enorme apoio, amor, motivação, encorajamento e companheirismo demonstrado em todos os momentos. Por ter sempre acreditado em mim.

Rafael Gonçalves

"Any intelligent fool can make things bigger and more complex…
It takes a touch of genius – and a lot of courage to move in the opposite direction."

Albert Einstein

Conteúdo

1 Introdução **1**
1.1 Objetivos 1

2 Revisão Bibliográfica **3**
2.1 UPS 3
2.1.1 UPS *Offline* 4
2.1.2 UPS de Linha-interativa 5
2.1.3 UPS *Online* 5
2.1.4 Desenvolver uma UPS 6
2.2 Baterias 7
2.2.1 Chumbo-ácido 8
2.2.2 Níquel-cádmio 9
2.2.3 Níquel-zinco 9
2.2.4 Níquel-hidrogénio 9
2.2.5 Níquel-Hidreto Metálico 9
2.2.6 Óxidos de prata 10
2.2.7 Lítio 10
2.3 Conversores 12
2.3.1 Retificadores 12
2.3.2 Inversores 12
2.3.3 Conversores CC/CC 16
2.4 *Booster* 21
2.5 Sistema de Gerenciamento de Baterias 23
2.6 Conclusão 32

3 Materiais e Métodos **33**
3.1 Dimensionamento do Sistema de Armazenamento de Energia 33
3.1.1 Análise de mercado 33
3.1.2 Aplicações 34
3.1.3 Escolha da célula 35
3.1.4 Configuração da bateria 37
3.1.5 Conclusão 37
3.2 Sistema de Carregamento de Energia 38
3.2.1 Arquitectura do Sistema de carregamento 38
3.2.2 Conversor CA/CC (Retificador) 39
3.2.3 Conversor CC/CC (Abaixador) - Carregador 41
3.2.4 Sistema de Equilibro da bateria 44
3.2.5 Conversor CC/CC (Abaixador) 46

3.2.6 Conversor CC/CC (elevador) . . . 46
3.3 Sistema de Descarregamento de Energia . . . 48
3.3.1 Arquitectura do Sistema de Descarregamento . . . 48
3.3.2 Conversor CC/CA (Inversor) . . . 48
3.3.3 Conversor CC/CC (12V) . . . 54
3.3.4 Conversor CC/CC (5V) . . . 54
3.4 Conclusão . . . 55

4 Resultados **57**
4.1 Sistema de Armazenamento de Energia . . . 57
4.2 Sistema de Carregamento de Energia . . . 59
4.2.1 Conversor CC/CC (Abaixador) - Carregador . . . 59
4.2.2 Sistema de equilíbrio da bateria . . . 73
4.2.3 Conversor CA/CC . . . 82
4.2.4 Conversor CC/CC (Abaixador) . . . 87
4.2.5 Conversor CC/CC (Elevador) . . . 90
4.3 Sistema de Descarregamento de Energia . . . 94
4.3.1 Conversor CC/CA (Inversor) . . . 94
4.3.2 Conversor CC/CC (Abaixador) . . . 105
4.4 Conclusão . . . 109

5 Protótipo **113**
5.1 Tipo de UPS . . . 113
5.2 Restrições . . . 113
5.3 Componentes do requisito obrigatório . . . 113
5.3.1 Bateria . . . 113
5.3.2 Carregador . . . 114
5.3.3 Inversor . . . 115
5.3.4 Fonte de energia . . . 116
5.4 Sistema de controlo do requisito obrigatório . . . 117
5.4.1 Esquema . . . 117
5.4.2 Controlador . . . 120
5.4.3 Anomalias . . . 121
5.5 Componentes do requisito desejável . . . 122
5.5.1 Entrada de energia . . . 122
5.5.2 Saída de energia . . . 124
5.6 Restantes componentes . . . 125
5.6.1 Interruptor . . . 125
5.6.2 Fusíveis . . . 125
5.6.3 Tomadas . . . 126
5.7 Esquema final . . . 127
5.8 Montagem e teste . . . 129
5.8.1 Bateria . . . 129
5.8.2 Teste . . . 130
5.8.3 Placa . . . 133
5.8.4 Montagem . . . 134
5.8.5 Código . . . 136
5.8.6 Teste final . . . 138
5.9 Análise de mercado . . . 140

6 Conclusões e Trabalho Futuro **143**
6.1 Satisfação dos Objetivos 143
6.2 Trabalho Futuro 144

A Anexos **145**
A.1 Código 145

Referências **155**

Lista de Figuras

1.1 Diagrama da *UPS* Portátil. 2

2.1 Diagrama UPS 3
2.2 Diagrama UPS *Offline* 4
2.3 Diagrama UPS Linha-Interativa 5
2.4 Diagrama UPS *Online* 6
2.5 Desenvolvimento de uma UPS 7
2.6 Retificador por Ponte de Díodo Monofásica 12
2.7 Conversor Monofásico de Meia Ponte 13
2.8 Conversor monofásico de ponte completa 14
2.9 Comparador com saída PWM 15
2.10 Comparação entre sinal portador triangular e sinal sinusoidal 15
2.11 Resultado PWM para par A de MOSFETs 15
2.12 Resultado PWM para par B de MOSFETs 15
2.13 Resultado da onda de saída CA do inversor 16
2.14 Conversor Elevador (*Boost*) 16
2.15 Conversor Abaixador (*Buck*) 18
2.16 Conversor Elevador/Abaixador (*Buck-Boost*) 19
2.17 Conversor Cúk 20
2.18 Conversor CC/CC em Meia Ponte 20
2.19 Conversor CC/CC em Ponte Completa 21
2.20 Curva das RPM (rotações por minuto) do motor e da corrente de arranque durante o arranque do motor 22
2.21 Diferentes curvas de descarga para diferentes tipos de baterias 22
2.22 Gráfico da tensão e corrente durante o carregamento de uma bateria Pb (*Ultracell*) 23
2.23 Gráfico da tensão com corrente a 0.1C (285mA, *Standard Charge*) de uma bateria NiMH (*Ansmann*) 24
2.24 Gráfico da tensão com corrente a 1C (2850mA, *Fast Charge*) de uma bateria NiMH (Ansmann) 25
2.25 Corrente de carregamento para uma célula de lítio 26
2.26 Carregamento CC/CV para uma célula de lítio 26
2.27 Equilíbrio passivo *fixed shunt resistor* 27
2.28 Equilíbrio passivo *switched shunt resistor* 27
2.29 Equilíbrio ativo *switched capacitor* 28
2.30 Equilíbrio passivo *single switched* 28
2.31 Equilíbrio passivo *Double-Tiered Switched Capacitor* 29
2.32 Equilíbrio passivo *Modularized-Switched* 29
2.33 Equilíbrio ativo *Single/Multi switched Inductor* 30

2.34 Equilíbrio ativo *Single Winding Transformer* 30
2.35 Equilíbrio ativo *Multi Windings Transformer* 31
2.36 Equilíbrio por conversor 1 31
2.37 Equilíbrio por conversor 2 32

3.1 Arquitetura do Sistema de Carregamento. 38
3.2 Retificador de ponte completa do conversor CA/CC. 39
3.3 Transformador de alta-frequência do conversor CA/CC 40
3.4 Conversor CC/CC abaixador (Carregador). 41
3.5 Sinal PWM. 42
3.6 Forma de onda do sinal PWM. 42
3.7 Controlo em corrente constante (CC). 43
3.8 Controlo em tensão constante com corrente limitada (CV). 44
3.9 Sistema de equilíbrio da bateria. 45
3.10 Conversor CC/CC abaixador 24V. 46
3.11 Conversor CC/CC elevador 12V. 47
3.12 Arquitetura do Sistema de Descarregamento. 48
3.13 Transformador de alta-frequência do conversor CC/CA. 49
3.14 Ponte de MOSFETs do conversor CC/CA. 50
3.15 Comparação entre a onda moduladora (sinusoidal) e a portadora (triangular) . . . 50
3.16 PWM Bipolar resultante 50
3.17 Comparação entre as ondas moduladoras (sinusoidais) e a portadora (triangular) . 51
3.18 PWM Unipolar resultante 51
3.19 Espectro harmónico do PWM Bipolar 51
3.20 Espectro harmónico do PWM Unipolar 51
3.21 Controlo dos MOSFETs do conversor CC/CA. 52
3.22 PWM nos MOSFETs $MOS12$ e $MOS14$. 53
3.23 PWM nos MOSFETs $MOS13$ e $MOS15$. 53
3.24 Filtro LC Passa-Baixo. 54
3.25 Conversor CC/CC abaixador 5V. 55

4.1 Bateria simulada no software **Psim**. 58
4.2 Bateria simulada no **Psim** com o seu formato de 3S28P. 58
4.3 Conversor CC/CC abaixador (carregador) simulado. 59
4.4 Carregamento em malha aberta. 61
4.5 Gráfico do carregamento em malha aberta. 61
4.6 Tempo de alcance T do carregamento CC em malha aberta 62
4.7 Carregamento com controlo em corrente constante. 62
4.8 Gráfico do carregamento com controlo em corrente constante. 63
4.9 Erro do sistema de controlo. 63
4.10 *Duty-Cycle* originado pelo controlador PI. 64
4.11 Sinal PWM resultante do sistema de controlo para uma corrente de 28,56A . . . 64
4.12 Carregamento CV em malha aberta. 65
4.13 Gráfico do carregamento CV em malha aberta. 66
4.14 Tempo de alcance T do carregamento CV em malha aberta. 66
4.15 Carregamento com controlo em tensão constante com corrente limitada. 67
4.16 Gráfico do carregamento com controlo em tensão constante com corrente limitada. 67
4.17 Controlador. 68
4.18 Variáveis do controlador. 68

4.19 Programação do controlador. 69
4.20 Carregador com controlo. 70
4.21 Carregamento com modo CC e CV. 71
4.22 *Flags* do carregamento com modo CC e CV. 72
4.23 *Ripple* da corrente e da tensão. 72
4.24 Ativação e desativação dos sinais PWM. 73
4.25 Troca de sinais na porta lógica *OR* do carregador. 73
4.26 Sistema de equilíbrio da bateria com a bateria dimensionada 74
4.27 Sinais $S1A$ e $S1B$. 75
4.28 Sinal $S1$ resultante. 75
4.29 Sinais $S2A$ e $S2B$. 76
4.30 Sinal $S2$ resultante. 76
4.31 Sinais $S1$ e $S2$. 77
4.32 Sinais $S1$ e $S2$. 78
4.33 Sistema de equilíbrio das células dimensionado. 78
4.34 Carregador com controlo e sistema de equilíbrio. 79
4.35 Novas variáveis do controlador. 80
4.36 Nova programação do controlador. 81
4.37 Carregamento com modo CC e CV e equilíbrio das células. 82
4.38 Tensão das células na bateria e o equivalente no controlador. 82
4.39 Retificador de ponte completa do conversor CA/CC proposto. 83
4.40 Tensão de pico no primeiro barramento CC e após a ponte de MOSFETs. 83
4.41 Sinal de controlo dos MOSFETs do conversor CA/CC (retificador). 84
4.42 Transformador de alta frequência do conversor CA/CC (retificador). 84
4.43 Tensão após o transformador e no segundo barramento (CC). 85
4.44 Carregamento com modo CC e CV equilíbrio das células com conversor CA/CC. 85
4.45 Carregador com equilíbrio e retificador. 86
4.46 Conversor CC/CC Abaixador 24V - 15V em malha aberta. 87
4.47 Simulação do conversor CC/CC Abaixador 24V - 15V em malha aberta. 88
4.48 Conversor CC/CC Abaixador 24V - 15V em malha fechada. 88
4.49 Carregamento por conversor abaixador 24V - 15V. 89
4.50 Simulação do carregamento por conversor abaixador 24V - 15V. 90
4.51 Conversor CC/CC Elevador 12V - 15V em malha aberta. 91
4.52 Simulação do conversor CC/CC Elevador 12V - 15V em malha aberta. 91
4.53 Conversor CC/CC Elevador 12V - 15V em malha fechada. 92
4.54 Simulação do carregamento por conversor elevador 12V - 15V. 92
4.55 Carregamento por conversor elevador 12V - 15V. 93
4.56 Transformador de alta-frequência do conversor CC/CA simulado. 94
4.57 Conversão da corrente contínua para alternada antes do transformador de alta-frequência. 95
4.58 Conversão da corrente contínua para alternada antes do transformador de alta-frequência. 96
4.59 Ponte de MOSFETs com carga simulada. 96
4.60 Sistema de controlo PWM Unipolar. 97
4.61 Controlo PWM Unipolar. 97
4.62 Índice de modulação do controlador PI. 98
4.63 Onda sinusoidal portadora com índice de modulação. 98
4.64 $Controlo1$ e $controlo2$. 99

4.65 Controlo sobre os MOSFETs $G1$ e $G2$. 99
4.66 Controlo sobre os MOSFETs $G3$ e $G4$. 100
4.67 Forma de onda na carga. 100
4.68 Diagrama de bode do filtro Passa-Baixo 101
4.69 Filtro LC Passa-Baixo. 101
4.70 Componente sinusoidal da forma de onda na carga. 102
4.71 Forma de onda da tensão e corrente na carga: 26,43Ω. 102
4.72 Forma de onda da tensão e corrente na carga: 200Ω. 102
4.73 Forma de onda da tensão e corrente na carga: 1000Ω. 103
4.74 Duração máxima do inversor com a saída a 2kW. 103
4.75 Conversor CC/CA (Inversor). 104
4.76 Conversor CC/CC Abaixador 5V 10W em malha aberta. 105
4.77 Simulação do conversor CC/CC Abaixador 5V 10W em malha aberta. 106
4.78 Tempo de alcance T do conversor CC/CC Abaixador 5V 10W 106
4.79 Conversor CC/CC Abaixador 5V 10W em malha fechada. 107
4.80 Simulação do conversor CC/CC Abaixador 5V 10W em malha fechada. 107
4.81 *Ripple* da corrente e da tensão no conversor CC/CC Abaixador 5V 10W. 108
4.82 Tensão e corrente na carga 1Ω. 108
4.83 Tensão e corrente na carga 5Ω. 109
4.84 Tensão e corrente na carga 10Ω. 109
4.85 Sistema de Carregamento de Energia 110
4.86 Sistema de Descarregamento de Energia 111

5.1 Célula Samsung INR18650-35E. 114
5.2 Sistema de equilíbrio passivo PCB 6S. 114
5.3 Carregador OSKJ 300W (conversor CC/CC Abaixador). 115
5.4 Inversor MeanWell A302-300-F3 300W. 116
5.5 Fonte MeanWell LRS-350-24. 116
5.6 Esquema de controlo proposto. 117
5.7 Energia proveniente da rede elétrica. 118
5.8 Energia proveniente da bateria. 118
5.9 Díodo E40ED1. 119
5.10 MOSFET PSMN9R5-100PS. 119
5.11 Arduino Nano e ecrã 120
5.12 Esquema de controlo com opto-isoladores. 121
5.13 Opto-isolador 4N25. 121
5.14 Divisor de tensão da bateria. 122
5.15 Termístor NTC 10K. 122
5.16 Conector macho de isqueiro 12V para automóvel. 123
5.17 Conectores para entrada 12V na UPS proveniente do isqueiro. 123
5.18 Conversor elevador CC 12V. 123
5.19 Interruptor ON-OFF-ON para comutação de carregamento. 123
5.20 Conversores abaixadores CC 5V 2A e 1A. 124
5.21 Conversor abaixador CC 12V. 124
5.22 Conector fêmea para saída de isqueiro 12V. 125
5.23 Interruptor 3 pólos 15A 125
5.24 Fusível 15A 126
5.25 Porta-fusível 15A 126
5.26 *Plug* de alimentação AC 126

5.27 *Socket* AC de saída 126
5.28 Caixa de metal para equipamentos eletrónicos. 127
5.29 Caixa de metal para equipamentos eletrónicos 128
5.30 Conversor CC abaixador LM2596 para alimentação do Arduino. 128
5.31 Disposição inicial de alguns materiais. 129
5.32 Construção da bateria. 129
5.33 Sistema de equilíbrio passivo montado na bateria. 130
5.34 Teste do circuito proposto 130
5.35 Teste do circuito proposto. 131
5.36 Teste do circuito proposto. 132
5.37 Arduino com ecrã. 132
5.38 Posição de alguns materiais na estrutura externa. 133
5.39 Desenho da placa no software **Eagle**. 133
5.40 Circuito impresso em *PCB*. 134
5.41 *PCB* com os componentes dimensionados. 134
5.42 Bateria com sensores de temperatura e fios para divisor de tensão. 135
5.43 Protótipo da UPS Portátil. 135
5.44 Máquina de estados do sistema a implementar. 136
5.45 UPS ligada à rede - estado $FONTE$. 139
5.46 UPS desligada da rede - estado $BATERIA$. 139
5.47 UPS desligada da rede e com a bateria desligada - estado $PARA_DESCARREGAR$. 139
5.48 Teste final usando um computador como carga. 140

Lista de Tabelas

1.1 Objetivos da UPS a desenvolver. 2

2.1 Comparação dos três tipos de UPS 6
2.2 Características de baterias secundárias 8
2.3 Diferentes químicas das baterias Li-Ion 11

3.1 Análise de mercado para células de iões de lítio. 34
3.2 Análise de mercado para células de polímeros de lítio. 34
3.3 Características da célula Samsung INR18650-35E 37

5.1 Custo total do protótipo 141
5.2 Propriedades do protótipo construído. 142
5.3 Análise de mercado para UPS 142

Abreviaturas e Símbolos

BMS	Sistema de Gerenciamento de Bateria
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CC	Corrente constante
CV	Tensão constante
DoD	Profundidade de descarregamento
GPS	Sistema de Posição Global
LED	Díodo Emissor de Luz
Li-Ion	Iões de Lítio
Li-Po	Polímeros de Lítio
MOSFET	*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*
NiCd	Níquel-Cádmio
NiMH	Níquel-hidreto metálico
OcV	Tensão em circuito aberto
Pb	Ácido-Chumbo
PVC	Policloreto de Vinila
PWM	Modulação por Largura de Pulso
SoC	Estado de Carga
SoH	Estado de Saúde
UML	Linguagem de Modelagem Unificada
UPS	Fonte de Alimentação Ininterruptível

Capítulo 1

Introdução

Atualmente assiste-se a uma constante evolução tecnológica que exige o desenvolvimento de fontes de energia elétrica inovadoras e mais eficazes. Distorções de energia e picos de tensão podem causar fortes impactos negativos nos equipamentos eletrónicos [1]. Os sistemas de transmissão de dados que utilizam canais de comunicação, por exemplo, requerem fontes de energia reguláveis e contínuas [2]. Assim, com o forte avanço da tecnologia, as fontes de alimentação ininterruptiveis (*Uninterruptible Power Supplies - UPS*) demonstraram uma grande evolução, tendo já capacidade de fornecer energia limpa e contínua para cargas sensíveis [1, 2, 3].

Por outro lado, o desenvolvimento tecnológico permitiu a criação e o avanço de equipamentos portáteis que são indispensáveis ao bem-estar da sociedade, nomeadamente de smartphones, computadores portáteis, tablets, agendas eletrónicas... No entanto, a capacidade das baterias não possuem um rendimento suficientemente elevado, levando à necessidade de carregamento constante. Já os equipamentos portáteis que não possuem bateria (como o caso de geladeiras e secadores) necessitam de uma fonte próxima de energia, vindo as *UPS* Portáteis satisfazer esta necessidade, uma vez que acumulam energia [1, 2].

1.1 Objetivos

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma fonte de alimentação ininterruptível diferente das tradicionais, na medida em que consegue armazenar energia para fornecer em lugares remotos, como é o caso do caravanismo, ajudar no arranque do motor de um automóvel, sistemas de rádio, etc. Por outro lado, também substituirá geradores a partir de energia fóssil na alimentação de sistemas de emergência como bombas de água em caso de catástrofes naturais.

Assim, esta *UPS* terá como objetivo alimentar cargas monofásicas e até mesmo cargas de corrente contínua em qualquer lugar. Esta fonte de alimentação ininterruptível terá uma bateria que será carregada a partir da rede elétrica (230V CA) ou a partir de uma fonte CC (12V, 24V e um painel fotovoltaico). Já as suas saídas serão de 230V CA, 12V CC e 5V CC. A sua autonomia deverá ser de 1kWh.

A figura 1.1 apresenta um diagrama da *UPS* Portátil a desenvolver. Já a tabela **??** apresenta os seus objetivos.

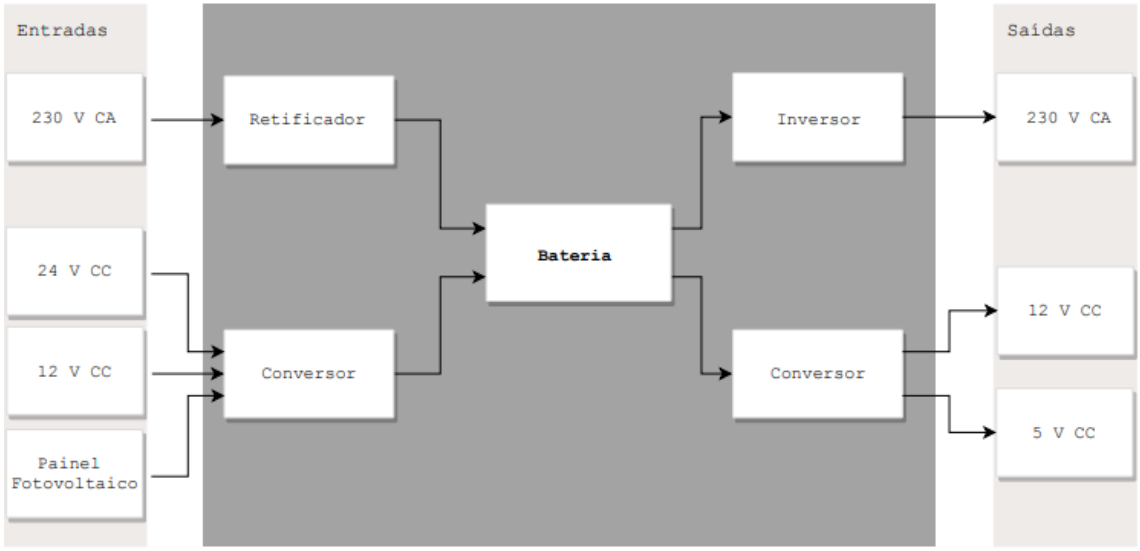


Figura 1.1: Diagrama da *UPS* Portátil.

Propriedades	**Valor**
Entrada CA	230V
Entrada CC	24V
Entrada CC	12v
Entrada CC	Painel Fotovoltaico
Saída CA	230V 2kW
Saída CC	12V
Saída CC	5V
Autonomia	1kWh

Tabela 1.1: Objetivos da UPS a desenvolver.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será desenvolvido uma pesquisa sobre as UPS, assim como os respetivos componentes que as constituem. Na secção 2.1 será apresentado um esquemático de uma UPS, assim como os vários tipos de UPS que existem. Já na secção 2.2 será feita uma pesquisa sobre todo o tipo de baterias recarregáveis, apresentando as suas vantagens e desvantagens. Os conversores serão discutidos na secção 2.3, juntamente com a modulação PWM para os controlar. Como uma das aplicações que a UPS poderá vir a ter é um booster, este irá ser estudado na secção 2.4. Por fim, irá ser feito uma análise aos diferentes sistemas de gerenciamento de baterias na secção 2.5.

2.1 UPS

Uma UPS é constituída por [4]:

- Retificador.
- Bateria.
- Inversor.
- Filtro.

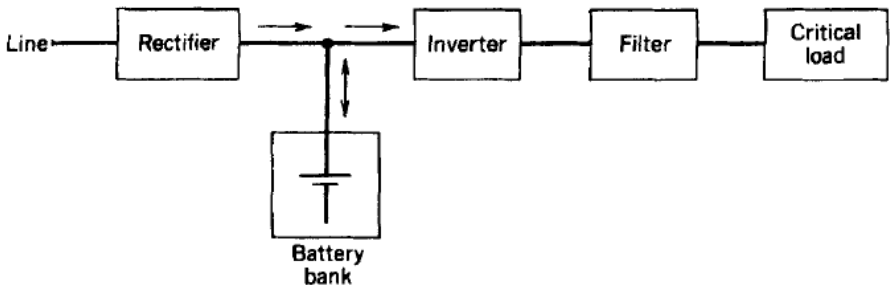


Figura 2.1: Diagrama UPS [4].

O retificador tem como função fornecer energia ao inversor e à bateria. Há várias maneiras de implementar um retificador, seja com um retificador controlado por fase, com conversores CA/CC (corrente alternada / corrente contínua) e CC/CC (corrente contínua / corrente contínua), ou com transformadores juntamente com conversores CA/CC. Este último é o melhor método pois permite um isolamento elétrico da rede [4].

A bateria tem como função alimentar o inversor, que por sua vez irá alimentar a carga (equipamento) no caso de haver flutuações negativas na rede, isto é, quando a tensão baixar/aumentar ou quando houver uma falha na rede elétrica [4]. As UPS podem estar equipadas com baterias ou super-condensadores. As UPS equipadas com baterias conseguem fornecer energia à carga durante mais tempo do que as que são equipadas por super-condensadores [3].

O inversor é o elemento que vai fornecer a energia da bateria ao equipamento. Este elemento, à semelhança do retificador, pode ser implementado de várias maneiras. Usando um conversor CC/CA e um transformador, usando um conversor elevador CC/CC e um conversor CC/CA, usando vários conversores em paralelo juntamente com um transformador de escolha de fases ou até mesmo um conversor CC/CA de ressonância e um transformador de alta-frequência. É nos inversores que o filtro estará incluído, pois para os conversores CC/CA funcionarem corretamente, é necessário filtrar a saída. À saída dos inversores é comum usar-se um fusível, de modo a proteger a UPS caso a carga entre em curto-circuito. Assim, a UPS continua operacional nas outras saídas e a saída em causa é protegida, necessitando de mudar-se apenas o fusível [4].

As UPS subdividem-se em 3 categorias: UPS *Offline*, UPS de linha-interativa e UPS *Online* [1, 3].

2.1.1 UPS *Offline*

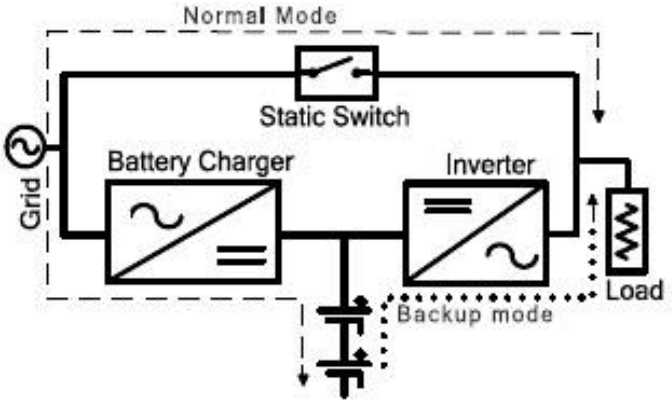


Figura 2.2: Diagrama UPS *Offline* [3].

Este tipo de UPS consiste no carregador da bateria, um interruptor estático e um inversor. Durante o normal funcionamento (fornecimento de energia por parte da rede elétrica), o carregador carrega a bateria e ao mesmo tempo a carga é alimentada diretamente pela rede elétrica CA. O

inversor não funciona neste ciclo pois a bateria não está a ser descarregada para a carga [1, 3]. Quando a rede elétrica falha, o interruptor desconecta a carga da entrada da UPS e conecta a carga ao inversor, fazendo com que esta seja alimentada pela bateria. Neste tipo de UPS, o tempo de comutação do interruptor é no máximo de 10ms. Este tempo não é crítico para cargas como computadores, pois a fonte de energia deles está preparada para aguentar falhas de rede durante 150ms (quando não há energia durante 100ms, a fonte de energia manda um sinal ao processador que obriga a que o PC faça um *backup* instantaneamente para não se perder informação). Após 150ms, o computador desliga-se [4].

A UPS *Offline* apresenta as seguintes vantagens: baixo custo para o utilizador, design simples e estrutura pequena. A desvantagem deve-se à não regulação de tensão entre a carga e a rede elétrica durante o normal funcionamento. Estas UPS são usadas para baixas cargas até 600VA [1, 3].

2.1.2 UPS de Linha-interativa

Estas UPS são semelhantes às anteriores, com a diferença de que esta apresenta um conversor/inversor bidirecional. Ou seja, durante o seu normal funcionamento, a energia proveniente da rede elétrica carrega a bateria pelo conversor/inversor bidirecional e ao mesmo tempo alimenta a carga. Quando a rede elétrica falha, o interruptor estático desconecta a carga da entrada e liga-a ao conversor/inversor bidirecional, fazendo com que este alimente a carga através da bateria. Estas UPS têm a vantagem de serem de pequenas dimensões e eficientes (0,5 kVA a 5kVA). A desvantagem é a incapacidade de regular a tensão durante o seu normal funcionamento, à semelhança das UPS *Offline* [1, 3].

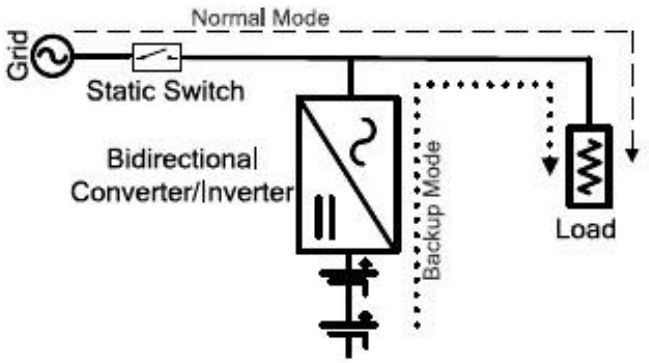


Figura 2.3: Diagrama UPS Linha-Interativa [3].

2.1.3 UPS *Online*

Durante o normal funcionamento, a energia da rede elétrica é convertida pelo retificador (carregador da bateria) para carregar a bateria e para alimentar o inversor, que por sua vez alimenta a carga. Quando a rede elétrica falha, o inversor continua a fornecer energia à carga

proveniente da bateria. Estas UPS têm a vantagem de ter um tempo rápido de resposta quando a rede falha, para além de terem um bom isolamento entre a carga e a rede elétrica, pois a energia é convertida várias vezes de CA para CC e de CC para CA através de vários transformadores (carregador e inversor), visto que estes fornecem isolamento da rede elétrica. As desvantagens são a (ainda) falta de eficácia destes aparelhos, baixo fator de potência e grandes distorções harmónicas na saída. Estas UPS têm uma potência de mais de 5kVA [1, 3].

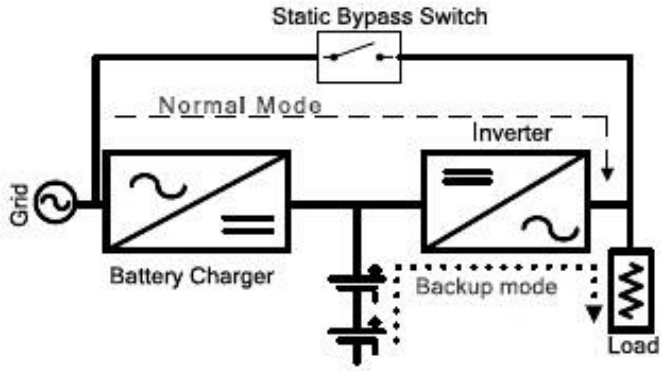


Figura 2.4: Diagrama UPS *Online* [3].

Em suma, apresenta-se na tabela 2.1 a comparação dos três tipos de UPS mostradas anteriormente.

Tipo de UPS	Custo por VA	Eficiência	Inversor sempre a operar
Offline	baixo	muito alta	não
Linha-interativa	médio	muito alta	depende do design
Online	médio	média	sim

Tabela 2.1: Comparação dos três tipos de UPS [3].

2.1.4 Desenvolver uma UPS

Para se criar uma UPS, é necessário ter em conta vários parâmetros:

A utilização da UPS vai determinar qual o objetivo final desta, isto é, que carga é que irá alimentar e o tempo necessário.

É com base nestas duas incógnitas que calculamos a próxima etapa: potência necessária para a UPS (kVA). É, nesta etapa, que se determina o tamanho e tipo da bateria a usar.

O próximo passo é determinar o tipo de UPS (*Offline*, Linha-interativa ou *Online*).

Por fim, seleciona-se a configuração da UPS. É, a partir deste passo, que iremos enfrentar vários desafios, como é o caso da segurança, o funcionamento correto (sem interrupções) e a relação-preço/custo da UPS [3].

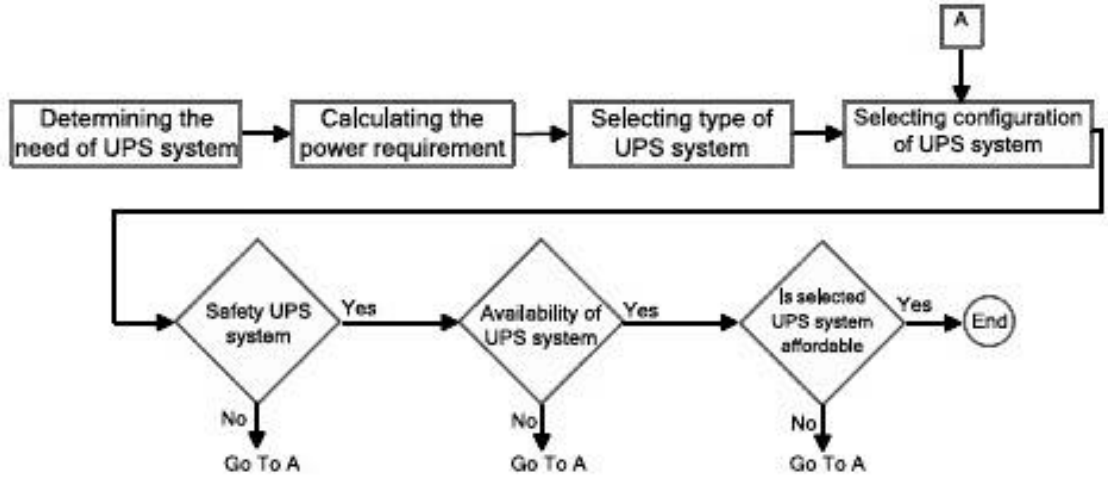


Figura 2.5: Desenvolvimento de uma UPS [3].

2.2 Baterias

Atualmente, existe uma grande variedade de baterias para todo o tipo de aplicações. As baterias são constituídas por várias células, que por sua vez são constituídas por ânodo, cátodo e eletrólito. As baterias subdividem-se em baterias primárias, baterias secundárias, baterias de reserva e células de combustível [5, 6].

- **Baterias primárias:** não podem ser carregadas, sendo descartadas após o seu uso. O eletrólito destas células é um material seco, sendo as baterias primárias também designadas por "células secas"[5].

- **Baterias secundárias:** podem ser carregadas eletricamente após a sua descarga, passando corrente por elas na direção oposta à da descarga. Estas baterias são usadas em duas aplicações diferentes: nas aplicações em que é necessário uma fonte de armazenamento de energia recebendo energia de uma fonte primária e fornecendo energia à carga, como é o caso dos automóveis, aviões, UPS e veículos híbridos e nas aplicações em que a bateria é usada como fonte principal de energia, como é o caso de computadores, telemóveis, ferramentas elétricas, etc [5, 6].

- **Baterias de reserva:** são maioritariamente usadas para fins militares, pois são armazenadas de modo a não existir auto-descarga. Estas necessitam de ser aquecidas previamente para o seu funcionamento, pois é necessário derreter o eletrólito para se tornar condutor de energia elétrica [5].

- **Células de combustível (*Fuel Cells*):** são baterias que necessitam de uma fonte externa de matéria para o seu funcionamento, nomeadamente hidrogénio [5].

Seguidamente, apresenta-se uma análise detalhada das baterias secundárias, dado que as UPS utilizam este tipo de bateria. A tabela 2.2 mostra as características de baterias secundárias existentes. O valor teórico da energia difere do valor prático, pois na prática os materiais que constituem as células das baterias não são ideais (contém impurezas) e não são 100% isolados do ambiente [5].

Tipo de bateria	**Energia específica (valor teórico) Wh/kg**	**Energia específica (valor pratico) Wh/kg**	**Densidade de energia (valor pratico) Wh/l**
Chumbo-ácido	252	35	70
Edison	314	35	70
Níquel-cádmio	244	40	135
Níquel-zinco	372	90	185
Níquel-hidrogénio	434	55	60
Níquel-Hidreto metálico	240	100	235
Prata-zinco	524	105	180
Prata-cádmio	318	70	120
Zinco / cloro	835	–	–
Zinco / bromo	572	70	60
Iões de Lítio	448	200	570
Dióxido de lítio / manganês	1001	120	265
Dissulfeto de lítio / ferro	493	180	350
Sódio / enxofre	792	170	345
Cloreto de sódio / níquel	787	115	190

Tabela 2.2: Características de baterias secundárias [5].

2.2.1 Chumbo-ácido

As baterias de Chumbo-Acido (*Lead-Acid* - Pb) têm um ciclo de vida prolongado em modo de flutuação (sofrendo carga e descarga constantemente), pois, devido à sua composição química, o processo de carga-descarga é essencialmente reversível, não havendo perdas, sendo energicamente eficiente. Estas baterias são usadas nos motores a combustão onde o motor carrega a bateria que, ao mesmo tempo, é descarregada para a parte eletrónica do automóvel. Também são usadas nas UPS, onde a bateria tem a função de descarregar e carregar para compensar as flutuações da rede elétrica. Deste modo, aguentam altas correntes de carregamento e descarregamento. Por outro lado, têm um custo extremamente baixo face à sua energia específica, sendo a bateria mais barata do mercado. Com a evolução tecnológica, estas já não precisam de manutenção, chegando algumas baterias a ter mesmo uma válvula para libertação de gases durante o carregamento. Estas baterias não possuem o "efeito-memória", na medida em que não perdem capacidade. No entanto, têm uma baixa densidade de energia e energia específica, o que as torna extremamente pesadas e volumosas. Por outro lado, não podem ser descarregadas a baixo de 1,75V por célula (cada célula tem 2,1V de tensão nominal), dando inicio ao processo de sulfatação, degradando a bateria (formação de cristais à volta do elétrodo de chumbo dificultando o processo químico). Caso aconteça, a sua vida útil torna-se curta (cerca de 500 ciclos de descarga total e carga total) [5, 7].

2.2.2 Níquel-cádmio

As baterias Níquel-cádmio (*Nickel Cadmium* - NiCd) face ás Pb têm uma densidade de energia maior, reduzindo o seu tamanho para quase metade e uma maior vida útil (cerca de 2000 ciclos). Por outro lado, conseguem operar a temperaturas baixas. Contudo, a sua energia específica é semelhante, tornando-as igualmente pesadas. Em relação ao custo, este é um pouco mais elevado. Uma outra desvantagem destas baterias é necessitarem de alguma manutenção de forma a prolongar a sua vida útil (as que são seladas não necessitam de manutenção). Por outro lado, necessitam de um controlador de temperatura de modo a aumentar a sua vida útil. Por ultimo, sofrem de efeito memória, isto é, perdem capacidade se não forem descarregadas até à tensão mínima de 1V por célula antes de serem carregadas novamente (cada célula tem 1,2V de tensão nominal). A baterias Níquel-cádmio seladas encontram-se no mercado com o formato de AA, AAA, C, entre outros [5].

2.2.3 Níquel-zinco

As baterias Níquel-zinco derivam das NiCd e têm a energia específica e a densidade de energia maior, fazendo com que tenham menor volume e cerca de metade da massa. Estas apresentam, ainda, menor custo que as baterias NiCd. No entanto, têm uma vida útil curta, devido à tendência do elétrodo de zinco mudar de forma, fazendo com que a sua capacidade varie negativamente. Com os avanços tecnológicos, já se consegue prolongar a vida útil para os 900 ciclos de carga-descarga adicionando aditivos ao elétrodo para que não se altere. Cada célula tem uma tensão nominal de 1,65V tendo uma tensão mínima de 1,2V [5].

2.2.4 Níquel-hidrogénio

As baterias de Níquel-hidrogénio, cujo elétrodo é de hidrogénio liquido, são baterias usadas exclusivamente para programas aeroespaciais [5].

2.2.5 Níquel-Hidreto Metálico

As baterias Níquel-Hidreto Metálico (*Nickel Metal Hydride* - NiMH) também derivam das NiCd e têm uma melhor densidade de energia assim como energia específica o que origina num tamanho mais pequeno e mais leve. Estas baterias também se encontram no mercado na forma de AA, AAA, C, D, etc. Têm um ciclo de vida ligeiramente inferior ás NiCd (500 a 1000 ciclos). Contudo, ao contrário das NiCd, não necessitam de manutenção. São mais caras que as Pb, mas mais baratas que as NiCd. Também possuem "efeito memória". A tensão nominal de cada célula é de 1,2V, sendo a sua tensão final de 1V. Após esta tensão final, a bateria degrada-se à semelhança de todas as outras. Não possui grande capacidade de descarga, pois a sua tensão desce drasticamente com o aumento da corrente de descarga. Embora a sua densidade de energia comum seja de 235Wh/l, já se conseguiu evoluir até aos 430Wh/l. Em relação ao carregamento, estas baterias aguentam vários tipos de carregamento, seja ele *Low*, *Quick* ou até mesmo *Fast*

Charge. O carregamento ideal é o *Low* no qual se carrega as baterias a 0.1C (0.1 x capacidade da bateria) [5].

2.2.6 Óxidos de prata

As baterias Óxidos de prata (Prata-zinco e Prata-cádmio) têm um alto custo e têm uma densidade de energia superior às Pb, mas inferior às NiMH. As baterias Prata-zinco operam eficientemente a altas descargas devido à sua baixa resistência interna. Muitas vezes, a descarga tem de ser controlada para a bateria não entrar em sobre-aquecimento. A desvantagem é ter uma vida útil curta (máximo de 150 ciclos) [5]. As baterias Prata-cádmio têm um ciclo de vida ligeiramente maior (máximo de 800 ciclos) [5].

2.2.7 Lítio

As baterias de lítio são as que têm melhor densidade e energia específica, tornando-as leves e pequenas. Existem vários tipos de baterias de lítio assim como vários tipos de química diferente. Isto é, temos baterias de lítio-metal, de iões de lítio, de polímeros de lítio e de lítio-enxofre. Já em relação à química, temos células de Óxido de Cobalto de Lítio ($CoLiO_2$), Fosfato de Lítio de Ferro ($FeLiO_4P$), Dióxido de Lítio e Manganês ($LiMn_2O_4$), etc. O interesse por estas baterias tem vindo a aumentar nas ultimas duas décadas devido ao seu alto rendimento, razão pela qual são usadas em diversos equipamentos, como smartphones, computadores portáteis, leitores MP4, consolas e até mesmo nos mais recentes veículos elétricos e híbridos. Não necessitam de manutenção e não sofrem de efeito memória [5, 6, 8].

2.2.7.1 Lítio-metal

As baterias de lítio-metal, como o próprio nome indica, contêm um metal de lítio como ânodo. Estas baterias foram as primeiras baterias recarregáveis de lítio a serem desenvolvidas. Contudo, são ineficientes pois há uma grande probabilidade de ocorrer um curto-circuito interno e de haver um sobre-aquecimento. Por outro lado, têm uma vida útil curta. Já a sua tensão nominal de cada célula varia entre os 1,3V e os 2,3V [6, 8].

2.2.7.2 Iões de Lítio

As baterias de iões de Lítio (*Lithium Ion* - Li-Ion) contêm apenas iões positivos de lítio movimentando-se de um elétrodo para outro através do eletrólito que é um bom condutor iónico e um bom isolante eletrónico. Deste modo, as células destas baterias conseguem normalmente ter tensões nominais entre entre 3,6V e 3,9V, dependendo da sua química, tendo uma tensão máxima de 4,2V a 4,3V e uma tensão mínima de 2,5V, o que equivale a 3 células de NiMh ligadas em série. Em relação à sua vida útil, esta é prolongada pois consegue fazer mais de 1000 ciclos de carga-descarga sem perder a sua capacidade. Conseguem ser recarregadas e descarregadas rapidamente (cerca de 10C (10 x sua capacidade)). Uma desvantagem destas baterias é que

necessitam de um controlador de carga, na medida em que não podem ser sobre-carregadas ou sofrer um elevado aquecimento. Por outro lado, são um pouco mais caras face ás Pb e ás NiMh. Degradam-se com a alta temperatura e quando a tensão desce abaixo da sua tensão mínima [5, 6, 8].

A tabela 2.3 apresenta as diferentes químicas das baterias de iões de lítio e as suas características. As baterias NMC são as mais leves. Contudo, as baterias de Li-Ion de $CoLiO_2$ (LCO) são as que apresentam melhor rendimento pois conseguem atingir os 30000 ciclos de carga-descarga perdendo apenas 95% da sua capacidade.

Acrónimo	**Cátodo**	**Ânodo**	**Tensão por célula (V)**	**Densidade de energia (Wh/kg)**
LCO	$CoLiO_2$	grafite	3,7 - 3,9	140
LNO	$LiNiO_2$	grafite	3,6	150
NCA	$LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$	grafite	3,65	130
NMC	$LiNi_xMn_yCo_{1-x-y}O_2$	grafite	3,8 - 4,0	170
LMO	$LiMn_2O_4$	grafite	4,0	120
LNM	$LiNi_{1/2}Mn_{372}O_4$	grafite	4,8	140
LFP	$FeLiO_4P$	$Li_4Ti_5O_{12}$	2,3 - 2,5	100

Tabela 2.3: Diferentes químicas das baterias Li-Ion [8].

2.2.7.3 Polímeros de Lítio

As baterias de polímeros de lítio (*Lithium Polymer* - Li-Po) são parecidas com as Li-Ion. Contudo, o seu eletrólito é um polímero sólido o que permite altas correntes de descarga. Estas baterias são indicadas quando é necessário altas correntes de descarga (cerca de 30C) assim como pulsos de descarga elevados (cerca de 45C). A temperatura ideal para operarem é entre os 80^{o}C e 90^{o}C [8].

2.2.7.4 Lítio-enxofre

Estas baterias de lítio são as que apresentam melhor densidade de energia e energia específica de todas. Contudo, degradam-se depressa, perdendo pouco mais de 50% da sua capacidade após 50 ciclos de carga-descarga [8].

2.3 Conversores

Neste capítulo serão abordados alguns dos vários tipos de conversores existentes; conversores CA/CC (retificadores), conversores CC/CA (inversores) e conversores CC/CC [4, 9].

2.3.1 Retificadores

Os retificadores têm como função converter corrente alternada para corrente contínua (CA/CC). A entrada e a saída CA da UPS Portátil serão monofásicas, pelo que iremos abordar apenas retificadores monofásicos. Um exemplo destes retificadores é o Retificador por Ponte de Díodo Monofásica:

2.3.1.1 Retificador por Ponte de Díodo Monofásica

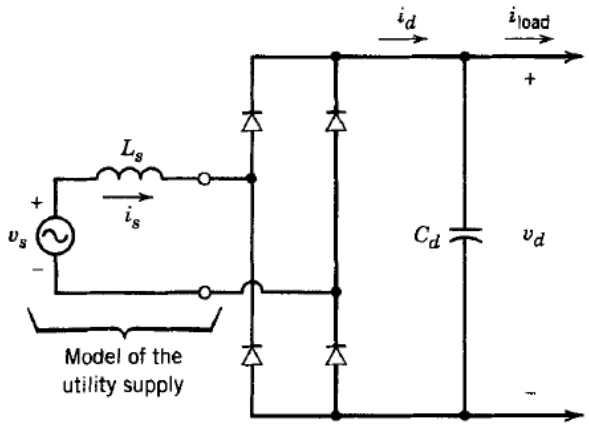


Figura 2.6: Retificador por Ponte de Díodo Monofásica [4].

Este retificador é constituído por 4 díodos que convertem a corrente alternada proveniente da fonte elétrica em corrente quase contínua com a ajuda do condensador (barramento CC).

2.3.2 Inversores

Os conversores CC/CA, mais conhecidos como inversores, são conversores de potência que têm como objetivo converter uma corrente contínua para alternada. São exemplos destes inversores o Conversor Monofásico de Meia Ponte e o Conversor Monofásico de Ponte Completa. Este último também pode ser usado como retificador na direção oposta [4, 9].

2.3.2.1 Inversor Monofásico de Meia Ponte

Neste conversor existem 2 condensadores à entrada com capacidades iguais que estão ligados em serie, tendo a tensão de $\frac{1}{2}Vd$ em cada condensador. Deste modo, existe entre eles um potencial médio (ponto neutro N). Para que este conversor funcione sem problemas, os

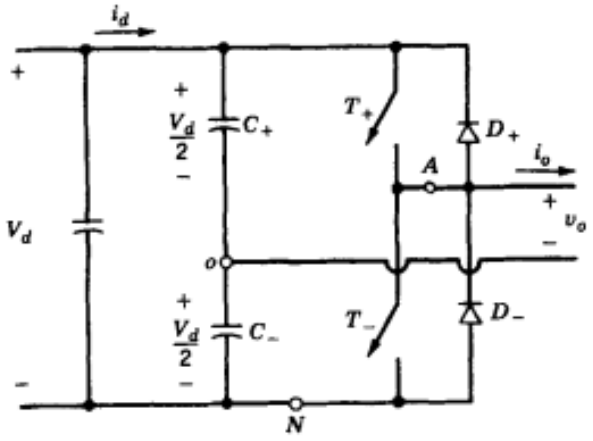


Figura 2.7: Conversor Monofásico de Meia Ponte [4].

interruptores dos MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) não podem estar ligados ao mesmo tempo, caso contrário haverá um curto-circuito. Assim, os MOSFETs são abertos alternadamente, gerando a frequência de saída pretendida. Quando o primeiro MOSFET abre, o outro está fechado fazendo com que a tensão na saída seja de $\frac{1}{2}Vd$ independentemente do sentido da corrente. Quando os MOSFETs trocam, isto é, quando o segundo MOSFET se abre e o primeiro fecha, a polaridade da saída troca, passando a ter -$\frac{1}{2}Vd$. A tensão de saída deste conversor é uma onda quase sinusoidal com amplitude $\frac{Vd}{2}$. [4]

2.3.2.2 Conversor Monofásico de Ponte Completa

Este inversor é preferível para altas potências pois com a mesma tensão de entrada, é possível obter duas vezes a tensão de saída (Vd) face ao conversor Monofasico de Meia Ponte ($\frac{Vd}{2}$). Isto implica que, para a mesma potência, a corrente de saída e as correntes dos MOSFETs sejam metade das para um inversor de meia ponte. Deste modo, para altas potências é vantajoso pois requer menos componentes em paralelo [4, 9, 10].

Este conversor é semelhante ao da meia-ponte com a exceção de que possui mais um braço que contém o ponto neutro da tensão de saída. Assim, este não pode ter os dois MOSFETs do mesmo braço a atuar ao mesmo tempo, caso contrário teríamos um curto-circuito. Em relação à tensão de saída, este conversor consegue ter valores muito próximos da tensão de entrada: $\frac{Vd}{2}$.

No entanto, para aplicações na UPS, este conversor tem uma forma de onda indesejada: onda quase sinusoidal. Para uma carga resistiva a forma de onda da corrente segue a da tensão. Já para uma carga indutiva, a forma de onda da corrente fica com um desfasamento da onda de tensão de um ângulo igual ao ângulo do fator de potência da carga. Como o destino da UPS não será apenas cargas resistivas (como aquecedores, por exemplo), é necessário transformar a onda quase sinusoidal numa onda sinusoidal para que as restantes cargas consigam funcionar corretamente. Deste modo, tal é possível usando modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) que será abordado a seguir [4, 9].

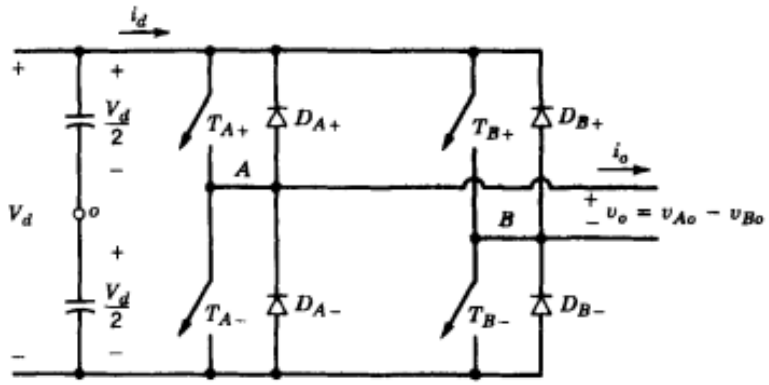


Figura 2.8: Conversor monofásico de ponte completa [4].

Este inversor também pode ser usado como retificador na direção oposta.

2.3.2.3 Controlo por PWM

Uma técnica para gerar uma onda sinusoidal nos Conversores Monofásicos de Ponte Completa é através da Modulação por Largura de Pulso. Algumas dessas técnicas PWM são [4, 9, 11, 12]:

- PWM Sinusoidal.
- PWM único.
- PWM Múltiplo.
- Eliminação Harmónica Selecionada PWM.

Seguidamente, a técnica PWM será apresentada detalhadamente, através do exemplo da PWM sinusoidal.

2.3.2.4 PWM Sinusoidal

Para produzir tensão variável em frequência e amplitude (CA Sinusoidal), este método consiste em comparar um sinal portador triangular com amplitude e frequências fixas com uma referência sinusoidal denominada por sinal modulador. Assim, a saída PWM resultante deste comparador segue a amplitude e frequência do sinal modulador, fazendo com que seja gerado o sinal de comando que controla a comutação dos semicondutores (MOSFETs) dos inversores. [9]

O comparador compara o sinal portador triangular com a referência sinusoidal. Quando o valor da referência sinusoidal é maior que o valor do sinal portador triangular ($Vsin > Vtrian$), o comparador produz um sinal 1. Quando a condição não acontece ($Vsin < Vtrian$), o comparador produz um sinal de saída 0. É este sinal final que vai controlar os semicondutores MOSFET. Quando os MOSFETs recebem um sinal 1, estes fecham deixando passar a corrente por eles. Quando o sinal é 0 o MOSFET abre e não passa corrente [9].

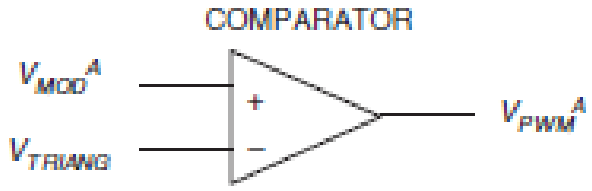


Figura 2.9: Comparador com saída PWM [9].

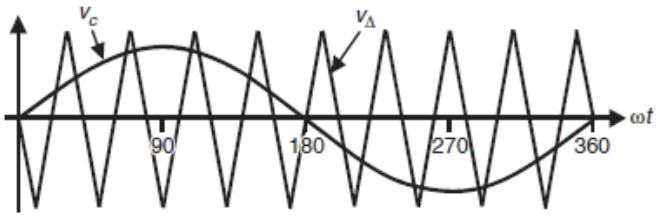


Figura 2.10: Comparação entre sinal portador triangular e sinal sinusoidal [9].

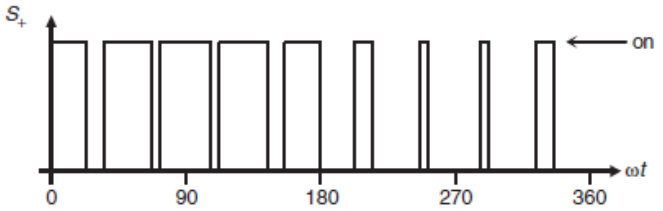


Figura 2.11: Resultado PWM para par A de MOSFETs [9].

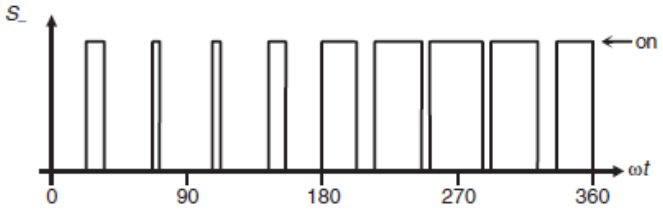


Figura 2.12: Resultado PWM para par B de MOSFETs [9].

Assim, a onda resultante dos inversores será uma onda com uma aproximação de uma onda sinusoidal (onda a tracejado) apresentada na figura 2.13:

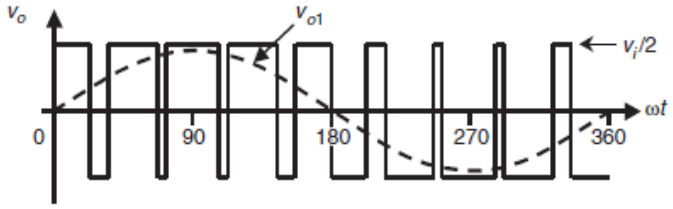


Figura 2.13: Resultado da onda de saída CA do inversor [9].

2.3.3 Conversores CC/CC

Os conversores CC/CC são usados para converter tensão de entrada contínua não regulada para tensão de saída contínua regulada. Isto é, através de uma tensão de entrada variável proveniente de uma linha de tensão que sofre flutuações, conseguimos obter uma tensão fixa de saída retificada [4, 9, 13].

Existem 4 tipos diferentes de conversores: Elevador, Abaixador, Elevador/Abaixador e *Cúk*, sendo este ultimo uma derivação do Elevador/Abaixador [4, 9, 13, 14].

2.3.3.1 Conversor Elevador

O conversor Elevador é, como o próprio nome indica, um conversor que aumenta a tensão de saída fase à tensão de entrada. Para isso, a corrente de entrada é mais elevada que a de saída. Este conversor também é conhecido como conversor *Boost* ou *Step-Up*. Estes tipos de conversores são muito usados nas energias renováveis, nomeadamente nos painéis fotovoltaicos e nas células de combustível renovável, onde a tensão de saída é extremamente baixa para converter para corrente alternada. Deste modo, o conversor Elevador converte a baixa tensão contínua para alta tensão, sendo a corrente convertida, mais tarde, para alternada com um inversor (será abordado mais à frente) [9, 14].

A figura 2.14 mostra o principio de funcionamento de um Conversor Elevador:

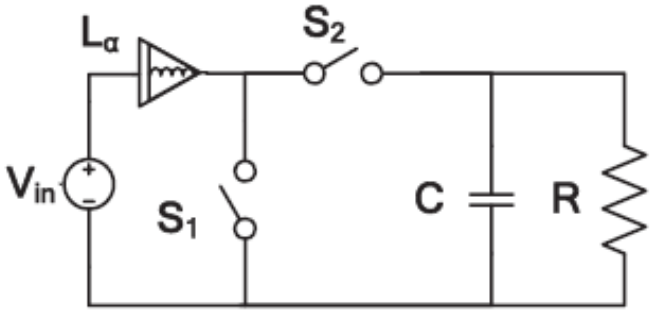


Figura 2.14: Conversor Elevador (*Boost*) [13].

- **Vin** — Tensão de entrada.
- **Lα** — Bobina.
- **S2** — Díodo retificador.
- **S1** — MOSFET controlado por onda quadrada.
- **C** — Condensador de filtragem.
- **R** — Carga.

Quando o conversor é ligado, o MOSFET irá receber uma onda quadrada proveniente de um oscilador (circuito integrado). Quando a onda se encontra em *High*, isto é, no seu valor máximo, o MOSFET *S1* deixa passar corrente por si, fazendo com que o díodo retificador se torne inversamente polarizado e com que a bobina *L* acumule energia em forma de campo magnético. Quando a onda quadrada passa a *Low*, isto é, a zero, o MOSFET corta a corrente, fazendo com que a energia acumulada na bobina se some à energia da tensão de entrada, passando pelo díodo retificador, carregando assim o condensador e alimentando a carga (tensão de saída). Assim, a tensão de saída é a tensão acumulada na bobina mais a tensão de entrada. Temos, então, uma saída de tensão mais alta que a de entrada (Elevador). Quando a onda quadrada do oscilador volta a *High*, o MOSFET torna a deixar passar corrente por si carregando novamente a bobina, fazendo com que a tensão acumulada no condensador se descarregue para a carga. Esta tensão não tem retorno para a bobina e para o MOSFET, pois o díodo retificador impede isso mesmo. Deste modo, a carga irá receber tensão contínua quase constante, pois quando recebe corrente do condensador, este vai-se descarregando. Para evitar grandes flutuações, o condensador tem de possuir uma elevada capacidade.

Como a frequência de comutação do MOSFET é muito alta, normalmente na ordem dos MHz, o condensador carrega-se e descarrega-se milhares de vezes por segundo, fazendo com que a tensão quase contínua se torne em tensão contínua [4, 9].

Para evitar altas correntes de entrada de modo a preservar os componentes, o conversor Elevador apenas consegue aumentar a tensão num máximo de três vezes a um *Duty-Cycle* de 0,8. Deste modo, para aumentar ainda mais a tensão, é necessário adicionar um transformador. Para isso, é preciso converter a tensão contínua de saída do conversor Elevador para tensão alternada com um inversor, usando, depois, um transformador, visto que este ultimo apenas funciona com tensão alternada [15].

2.3.3.2 Conversor Abaixador

O conversor Abaixador é o inverso do conversor Elevador. Isto é, o conversor baixa a tensão de saída face à tensão de entrada, sendo a corrente de entrada mais baixa. Este conversor também se designa por conversor *Buck* ou *Step Down* [4, 9].

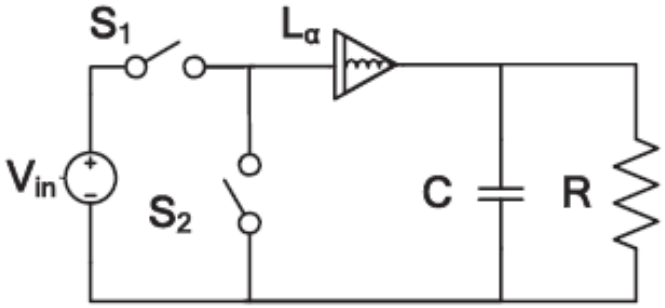


Figura 2.15: Conversor Abaixador (*Buck*) [13].

- **Vin** — Tensão de entrada.
- **L**α — Bobina.
- **S2** — Díodo retificador.
- **S1** — MOSFET controlado por onda quadrada.
- **C** — Condensador de filtragem.
- **R** — Carga.

O funcionamento do conversor Abaixador é semelhante ao conversor anterior, mas com algumas diferenças. Quando a onda quadrada do oscilador está a *High*, o MOSFET deixa passar corrente e o díodo retificador torna-se inversamente polarizado, fazendo não só com que a bobina acumule energia e o condensador se carregue, como também alimenta a carga (tensão de saída). Assim, a tensão de saída na carga será a tensão de entrada menos a tensão acumulada na bobina. Quando a onda quadrada passa a *Low*, o MOSFET corta a corrente, fazendo com que a bobina se descarregue com a ajuda do díodo retificador. Este torna-se diretamente polarizado. Já o condensador irá alimentar a carga com o mesmo valor que a tensão de saída aquando da onda quadrada em *High*. Quando a onda quadrada torna a *High*, o processo de funcionamento torna ao início, fazendo com que a tensão de saída seja menor que a tensão de entrada. O condensador tem de ser, de igual forma, grande, para poder alimentar a carga sem variar muito o *ripple* (flutuação) [4, 9].

Este conversor é muito vulnerável aos elementos parasitas, isto é, devido ás perdas dos semicondutores, poderá haver variações na tensão de saída [4, 9].

2.3.3.3 Conversor Elevador/Abaixador

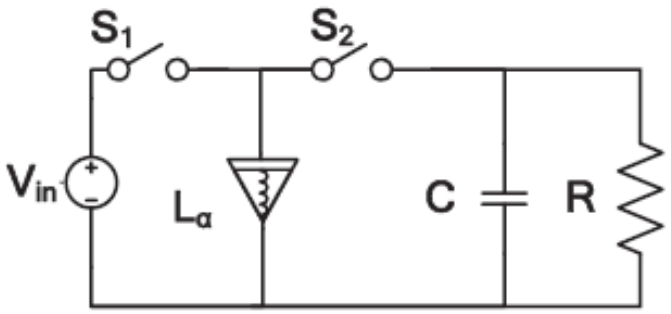


Figura 2.16: Conversor Elevador/Abaixador (*Buck-Boost*) [13].

- **Vin** — Tensão de entrada.
- **Lα** — Bobina.
- **S2** — Díodo retificador.
- **S1** — MOSFET controlado por onda quadrada.
- **C** — Condensador de filtragem.
- **R** — Carga.

O conversor Elevador/Abaixador é um conversor com a capacidade de aumentar ou diminuir a tensão de saída. Este conversor é vantajoso quando temos uma tensão de entrada muito variável em relação à saída. Ou seja, quando a tensão de entrada toma valores maiores ou menores que a tensão de saída. Deste modo, o conversor Elevador/Abaixador consegue manter a saída contínua regulada sem oscilações [16].

Uma diferença deste conversor para os conversores anteriores é que a tensão de saída está invertida em relação à tensão de entrada [13, 16, 17].

Quando o MOSFET está fechado, a tensão de entrada fornece energia à bobina e o díodo torna-se inversamente polarizado. Quando o MOSFET abre, a energia acumulada na bobina é transferida para a carga. Assim, regulando o *Duty-Cycle* do MOSFET (onda quadrada) conseguimos regular a tensão de saída pretendida [4, 17].

Este conversor tem a mesma desvantagem do conversor Abaixador em relação ao efeito dos elementos parasitas [4, 9].

2.3.3.4 Conversor Cúk

Este conversor é muito semelhante com o conversor Elevador/Abaixador. A única diferença é ter um condensador como primário que atua como armazenamento e transferência de energia, enquanto que no anterior essa função era executada por uma bobina [4].

Quando o MOSFET está aberto, o díodo torna-se diretamente polarizado, fazendo com que a corrente da tensão de entrada atravesse a bobina e carregue o condensador. Quando o MOSFET fecha, o condensador torna o díodo inversamente polarizado e faz com que as correntes das bobinas circulem pelo MOSFET, carregando o condensador *C* da carga e alimentando a carga. Por ultimo, quando o MOSFET torna a abrir, a carga vai ser alimentada pelo condensador *C*. A vantagem deste conversor face ao conversor anterior é ser mais robusto em relação aos elementos parasitas, resultando numa corrente de saída constante quase sem flutuações (*ripple*) [4, 9].

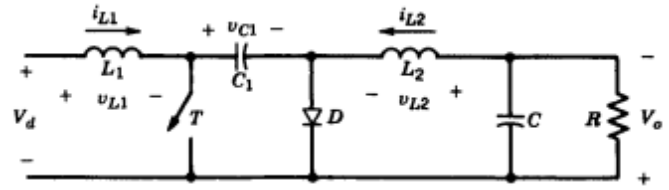


Figura 2.17: Conversor Cúk [4].

2.3.3.5 Conversor em Meia Ponte

Como referido anteriormente no conversor Elevador, de modo a aumentar a tensão mais de três vezes, não é possível usar este conversor, pelo que a solução passa por usar um transformador. Contudo, este opera em corrente alternada, pelo que é necessário converter a tensão contínua em alternada através de um inversor. A figura 2.18 apresenta um conversor CC/CC em meia ponte [9].

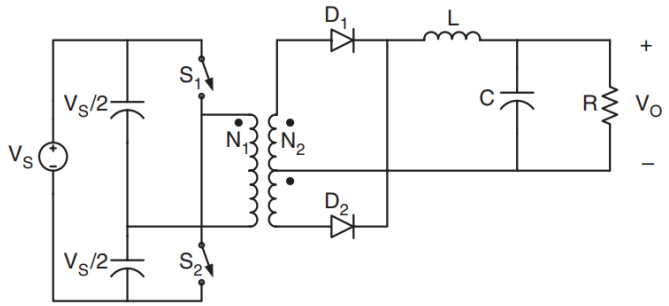


Figura 2.18: Conversor CC/CC em Meia Ponte [9].

Durante o modo de operação, a meia ponte da esquerda converte a tensão contínua de entrada *Vs* em corrente alternada. Esta meia ponte é o inversor monofásico de meia ponte falado na secção 2.3.2.1. De seguida, o transformador converte a baixa tensão alternada em alta tensão. Por fim, a meia ponte da direita é um retificador que transforma novamente a tensão alternada em contínua, obtendo-se, assim, uma tensão contínua *Vo* à saída mais alta que a entrada. O transformador, para além de conferir um isolamento galvânico (não existe fluxo de correntes por caminhos de condução metálicos, dando mais segurança evitando correntes indesejadas), tem de operar em alta

frequência, pois o seu tamanho diminui com o aumento desta. Este método é vantajoso quando se pretende elevada eficiência [9].

2.3.3.6 Conversor em Ponte Completa

Este conversor é parecido com o conversor em meia ponte, com a diferença de que a ponte da esquerda é um inversor de ponte completa.

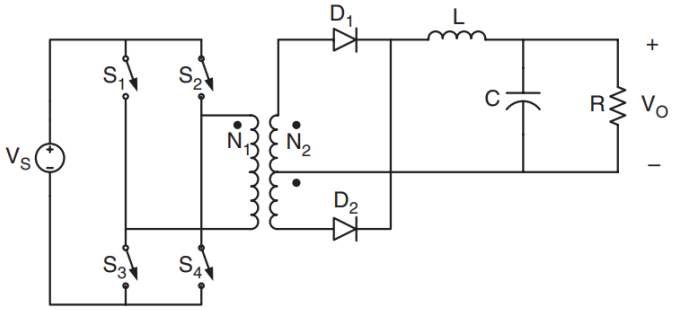


Figura 2.19: Conversor CC/CC em Ponte Completa [9].

Este conversor, face ao anterior, é preferível quando se pretende altas potências, como já foi referido na secção 2.3.2.2 em relação ao inversor de ponte completa. Contudo, é mais caro pois necessita de mais componentes, para além de que o controlador é mais complexo [9].

Após uma analise de mercado, verificou-se que os conversores Elevador e Abaixador têm um baixo custo. Já o conversor Elevador/Abaixador e o *Cúk* têm um custo relativamente mais alto. Em relação aos inversores, estes são mais caros que os retificadores.

2.4 *Booster*

Um aparelho *booster* serve para aplicar energia elétrica num curto espaço de tempo em aparelhos de elevada potência e cuja fonte de energia está inoperável, como é o caso do motor de arranque de um automóvel cuja bateria se descarregou [18, 19]. Deste modo, os *boosters* podem ter uma bateria de ácido-chumbo, uma bateria de lítio juntamente com ultra condensadores ou só ultra condensadores de modo a fornecer alta corrente num curto espaço de tempo [19, 20, 21].

Para se calcular corretamente a energia necessária para o arranque de um motor é necessário saber a sua forma. A figura 2.20 mostra a corrente ao longo do tempo do motor de arranque de um automóvel.

Inicialmente existe um pico de corrente durante uma fração de segundo podendo chegar até aos 800A dependendo do tipo de motor (gasolina ou gasóleo), atenuando logo de seguida para os 100A. Os motores de arranque dos motores a gasolina consomem entre 700W a 2kW, enquanto os dos motores a gasóleo consomem entre 1,4kW a 2,6kW devido à necessidade de maior força, pois os motores a gasóleo necessitam de alto binário para as altas compressões dos pistões. Por outro

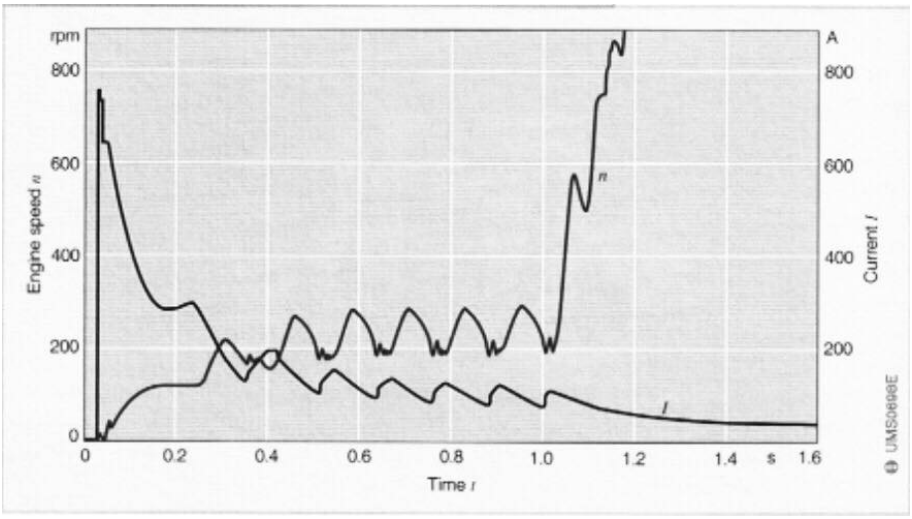


Figura 2.20: Curva das RPM (rotações por minuto) do motor e da corrente de arranque durante o arranque do motor [22].

lado, o arranque a frio necessita de mais potência devido ao maior atrito no motor e aos fluídos, como o óleo, estarem mais espessos [22].

As baterias que equipam os automóveis são de ácido-chumbo pois para além de serem mais baratas, não necessitam de controlador e conseguem fornecer alta descarga mantendo a sua tensão quase constante (figura 2.21) [23].

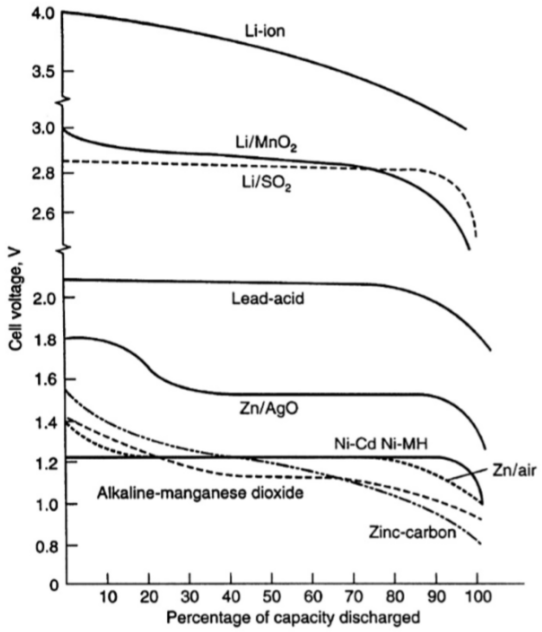


Figura 2.21: Diferentes curvas de descarga para diferentes tipos de baterias [24].

2.5 Sistema de Gerenciamento de Baterias

Um aparelho eletrónico que use uma bateria recarregável necessita de um sistema para gerir a energia. Este sistema não só se prende com a carga e descarga da bateria como também com a sua manutenção. Deste modo, o Sistema de Gerenciamento de Bateria (*Battery Management System* - BMS) serve para isto mesmo. Todas as baterias necessitam de ser carregadas com as corretas especificações do seu fabricante (*datasheet*). Já a corrente de descarga, não pode ultrapassar o seu máximo, assim como a tensão não pode ultrapassar o seu máximo durante a carga e o seu mínimo durante a descarga. Só assim conseguimos ter uma bateria com uma vida útil prolongada.

As baterias Pb de 12V (6 células em série), por exemplo, são carregadas entre 13,5V a 15V (2,25V a 2,5V por célula) com uma corrente constante [25]. Quando a tensão da bateria está próxima do seu máximo de carregamento, a corrente decresce. A figura 2.22 é referente ao carregamento de uma bateria de ácido-chumbo 12V 5Ah. Pela datasheet do fabricante (*Ultracell*) esta bateria pode ser carregada entre 13,5V a 15V estando em *stand-by* ou a ser consumida ao mesmo tempo pela carga. A corrente inicial de carregamento recomendada é de 1,62A, decrescendo quando a tensão atinge o seu máximo.

Relativamente à sua descarga, esta bateria consegue atingir os 67A, devendo parar quando a tensão atingir os 9,6V (1,6V por célula). Por ultimo, esta bateria aguenta temperaturas entre os -15^{o}C e 50^{o}C [25].

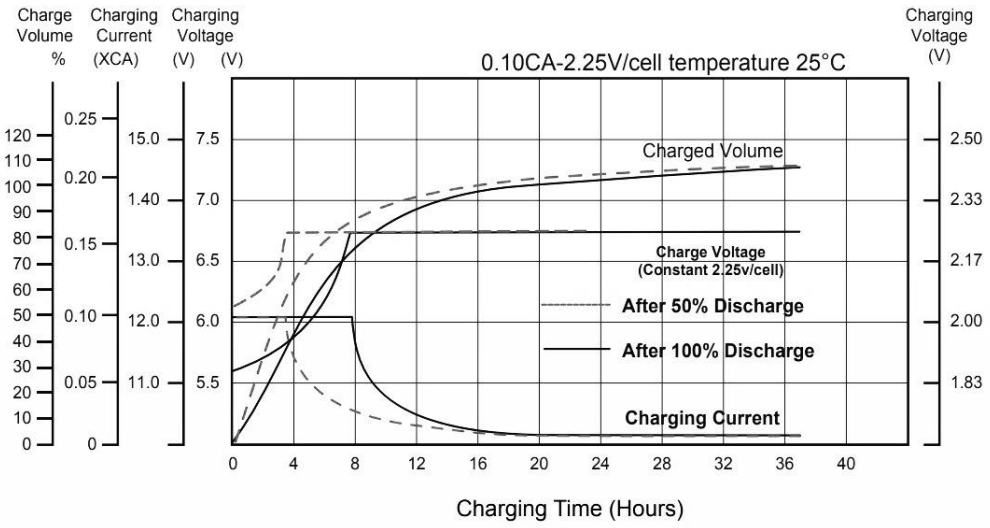


Figura 2.22: Gráfico da tensão e corrente durante o carregamento de uma bateria Pb (*Ultracell*) [25].

O carregamento adequado de baterias de NiMH é um fator-chave para o bom desempenho. Um carregamento bem-sucedido equilibra a necessidade de um carregamento rápido e completo, com a necessidade de minimizar a sobrecarga, um fator chave em prolongar a vida [26].

As baterias de NiMH são um pouco mais sensíveis no carregamento do que as NiCd. Tendo a sua tensão nominal nos 1,2V, estas podem ser carregadas entre 1,4V e 1,6V. Estas baterias, à

semelhança das Pb, aguentam uma pequena discrepância na tensão de carregamento. Contudo, se forem sobre-carregadas sofrem um maior aquecimento, resultando numa vida útil curta. Já a sua corrente pode variar, sendo a ideal 0.1C, isto é, 10% da sua capacidade. Por exemplo, uma bateria NiMH de 2500mAh deverá ser carregada a uma corrente de 250mA, demorando cerca de dez horas. Contudo, aguentam várias correntes de descarga, não devendo ultrapassar a sua capacidade (1C). Deste modo, temos o carregamento chamado de *Fast Charge*. Maiores correntes de carregamento implica, também, num maior aquecimento, reduzindo a sua vida útil [26, 27].

Quando a tensão atinge o seu máximo, a energia de carregamento é transferida como calor, resultando, mais uma vez, num aquecimento prejudicial para a bateria. Deste modo, é necessário um sistema de gerenciamento de bateria que desliga o carregamento quando o seu máximo é atingido de modo a preservar a bateria [26, 27].

As figuras 2.23 e 2.24 mostram a gama de tensão a que pode ser carregada uma bateria NiMH 1,2V 2850mAh a diferentes correntes (0.1C e 1C).

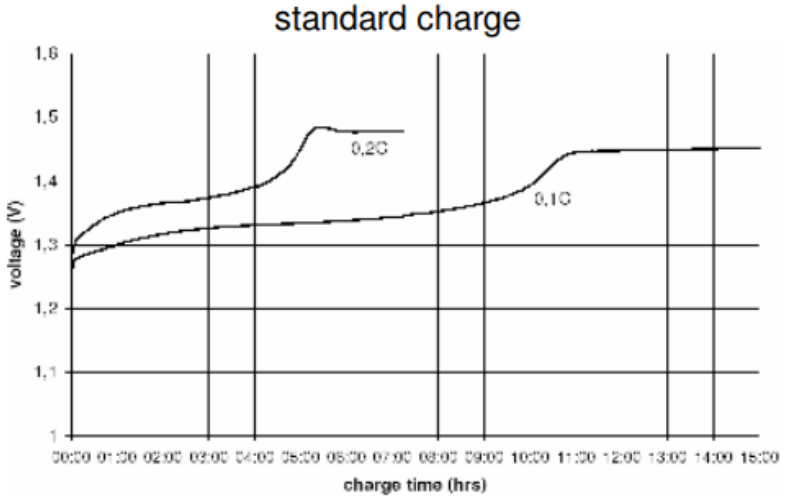


Figura 2.23: Gráfico da tensão com corrente a 0.1C (285mA, *Standard Charge*) de uma bateria NiMH (*Ansmann*) [28].

As baterias de lítio são as baterias mais sensíveis de todas. Isto porque não podem sofrer sobrecarga com o risco de explosão. Enquanto que as baterias Pb, NiMH, NiCd, etc, podem ter uma pequena variação na sua tensão de carregamento, as baterias de lítio têm de ser carregadas à tensão certa. Deste modo, o uso de um sistema de gerenciamento de bateria é indispensável [29].

Durante o carregamento de uma bateria composta por várias células em série, esta pode-se tornar desequilibrada devido a alterações no processo de armazenamento e ao envelhecimento das células. Este desequilíbrio é significativo sobretudo para baterias compostas por células de lítio, sendo mais critico nas de polímeros de lítio devido ás altas correntes de descarga. Embora tais diferenças sejam pequenas nas de iões de lítio, o desequilíbrio tende a aumentar ao longo do tempo, reduzindo a capacidade total da bateria, pelo que é necessário um BMS adequado, de modo a evitar sobrecargas e sub-cargas nas células [29, 30, 31].

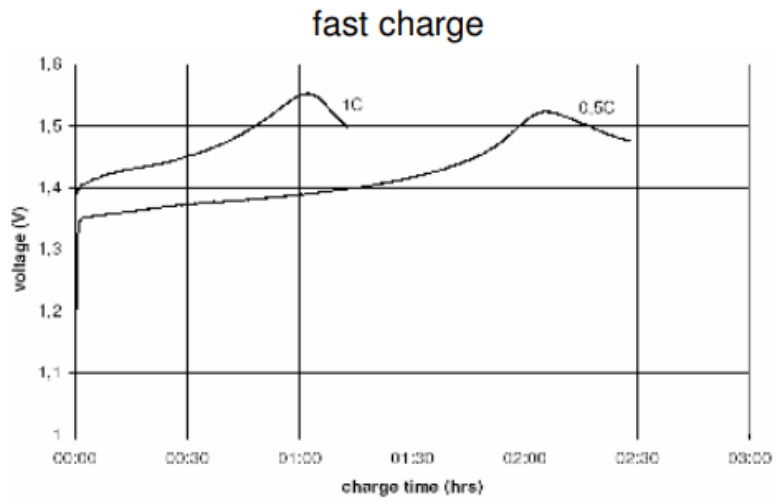


Figura 2.24: Gráfico da tensão com corrente a 1C (2850mA, *Fast Charge*) de uma bateria NiMH (Ansmann) [28].

Através do carregamento e descarregamento das células é estimado o estado de carga (*State of Charge* - SoC), o estado de saúde (*State of Health* - SoH) e a profundidade de descarga (*Depth of Discharge* - DoD) das células. O equilíbrio faz com que todos os SoC das células da bateria convirjam para um mesmo valor, maximizando assim a capacidade da bateria. O controlo do equilíbrio é implementado a partir de estimativas dos SoC das células. Assim, o SoC é estimado a partir do modelo das células e das medições de tensão e corrente na carga e descarga das células. O SoH prende-se com a condição atual da bateria (uma bateria nova tem um SoH a 100% (ou muito próximo) que vai diminuindo com os vários ciclos). Por fim, o DoD é o inverso do SoC, isto é, enquanto que um SoC 100% significa que a carga está completa, um DoD 100% significa que a bateria está sem carga [29].

Um BMS para as baterias de lítio divide-se em 5 partes: carregamento CC/CV, circuito de proteção, sistema de equilíbrio das células e estimação do SoC e do SoH. [29, 32]

O carregamento CC/CV prende-se com a corrente e a tensão de carregamento. Uma bateria de lítio é carregada com corrente limitada e constante no inicio, decrescendo assim que a tensão se aproxima do seu valor máximo. Deste modo, o carregador comporta-se como uma fonte de corrente constante (*Constant Current* - CC). Quando a tensão está próxima do seu valor máximo, a célula é carregada com tensão constante, ao mesmo tempo que a corrente decresce exponencialmente. Nesta fase o carregador comporta-se como uma fonte de tensão constante (*Constante Voltage - CV*), pois é a tensão que está limitada. Quando a tensão da célula chega ao seu valor máximo - tensão em circuito aberto (*Open circuit Voltage - OcV*) - o carregamento é concluído e a corrente é nula [33]. É nesta fase que entra o circuito de proteção, de modo a não sobrecarregar a célula. O limite máximo e mínimo da tensão encontra-se na *datasheet* do fabricante da célula. Por outro lado, quando a bateria está a ser descarregada por uma carga, o circuito de proteção também protege as células de se descarregarem mais que o seu limite. As

figuras 2.25 e 2.26 mostram a corrente de carregamento assim como o carregamento CC/CV para uma célula de lítio.

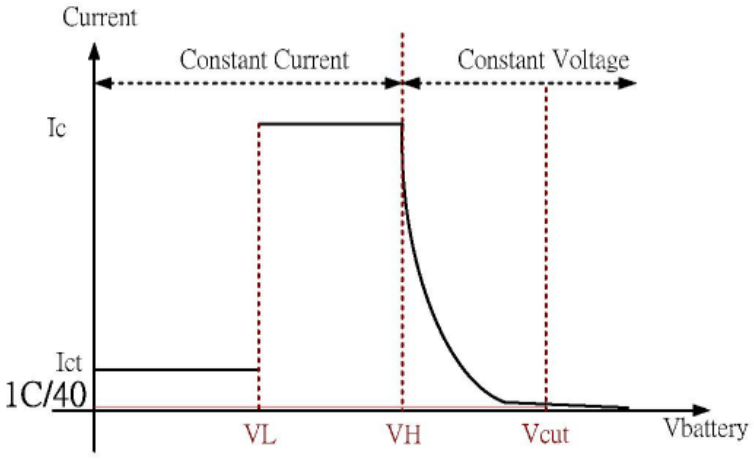


Figura 2.25: Corrente de carregamento para uma célula de lítio [33].

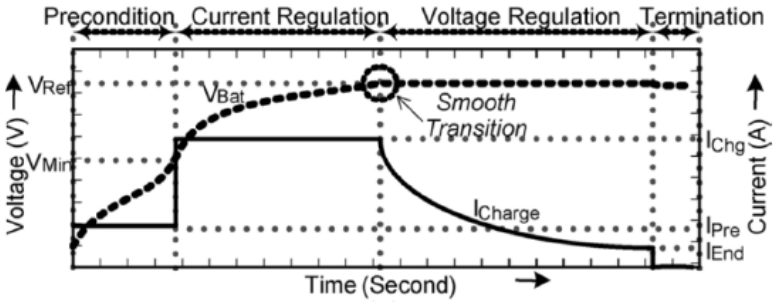


Figura 2.26: Carregamento CC/CV para uma célula de lítio [32].

Em relação ao equilíbrio, existem vários tipos, como é o caso do equilíbrio ativo, passivo e por chaveamento.

O equilíbrio passivo, também conhecido como resistivo, usa resistências que dissipam energia das células com mais carga de modo a igualar a tensão das várias células. Com a ajuda de transístores, o BMS sabe quais as resistências a "ativar"de modo a descarregar as células com mais carga. Este equilíbrio subdivide-se em dois grupos: *Fixed Shunt Resistor* e *Switched Shunt Resistor* [34].

- ***Fixed Shunt Resistor*:** Este método faz com que a corrente não passe por todas as células, sendo uma parte dissipada pelas resistências. Deste modo, as resistências acabam por limitar a tensão. Este método, embora seja de baixo custo e fácil de implementar, só pode ser usado em baterias Pb, NiCd e NiMH [34]

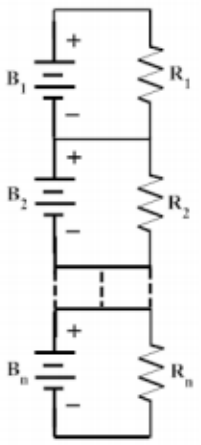


Figura 2.27: Equilíbrio passivo *fixed shunt resistor* [34].

- ***Switched Shunt Resistor*:** Este equilíbrio dissipa energia das células com mais carga através de transístores. Este sistema controla as células detetando as suas tensões para saber quais os transístores a ativar e desativar para dissipar energia. Este método também é simples de implementar e pode ser usado para baterias Li-Ion [34].

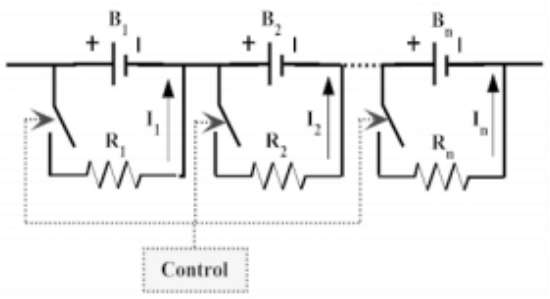


Figura 2.28: Equilíbrio passivo *switched shunt resistor* [34].

O equilíbrio ativo subdivide-se em dois métodos: capacitivo e indutivo. Este método de equilíbrio retira carga das células com mais energia e fornece às que têm menos carga, acabando por compensar a bateria. O equilíbrio ativo capacitivo usa condensadores que se carregam e descarregam com as várias células da bateria, acabando por carregar todas de igual forma. Embora este método não desperdice energia como o equilíbrio passivo, a eficiência vai decaindo com a redução das diferenças de carga entre as células. Por outro lado, é muito complexo e exige eletrónica dispendiosa. Este tipo de equilíbrio subdivide-se em 4 grupos: *Switched Capacitor*, *Single Switched*, *Double-Tiered Switched* e *Modularized Switched*.

- ***Switched Capacitor*:** Este método utiliza $n-1$ condensadores e $2n$ interruptores para equilibrar n células. É de simples controlo. No entanto, tem baixa eficiência [34].

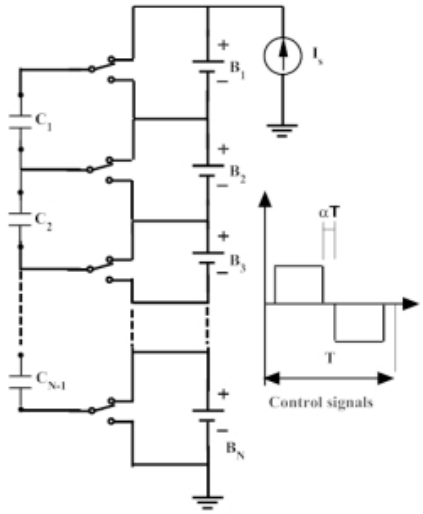


Figura 2.29: Equilíbrio ativo *switched capacitor* [34].

- ***Single Switched*:** é apenas usado um condensador e $n+5$ interruptores para equilibrar n células. Através do controlo, este deteta a célula com mais carga e liga o condensador a essa célula carregando-o. De seguida, desliga o condensador à célula e liga-o à célula mais fraca, carregando-a. Este método carrega as células mais fracas através das que têm mais carga. Necessita de mais complexidade no controlo de modo a aumentar a velocidade de equilíbrio [34].

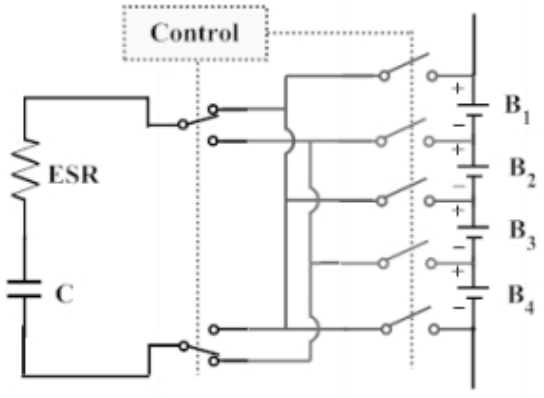


Figura 2.30: Equilíbrio passivo *single switched* [34].

- ***Double-Tiered Switched Capacitor*:** Deriva do *Switched Capacitor* e usa n condensadores e $2n$ interruptores para equilibrar n células. A vantagem deste método em relação ao *Switched Capacitor* é que o segundo condensador ajuda a reduzir o tempo de equilíbrio para um quarto [34].

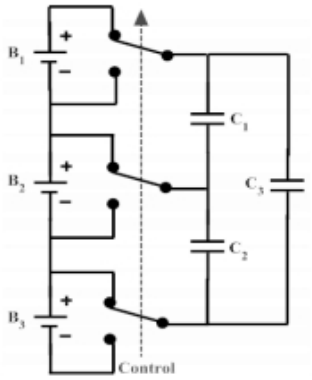


Figura 2.31: Equilíbrio passivo *Double-Tiered Switched Capacitor* [34].

- ***Modularized Switched*:** Este método é um pouco mais complexo pois divide o conjunto de células da bateria em vários módulos, ocorrendo equilíbrio dentro de cada módulo. Necessita de controlo mais complexo [34].

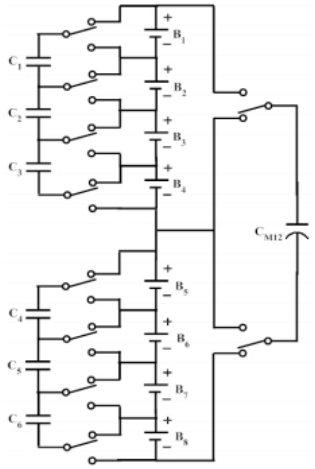


Figura 2.32: Equilíbrio passivo *Modularized-Switched* [34].

O equilíbrio ativo indutivo usa um transformador ligado aos dois polos da bateria que, com impulsos de energia da bateria, acaba por carregar as células descompensadas através do seu enrolamento secundário. Este método ocupa muito espaço devido ao transformador. Este equilíbrio subdivide-se em três grupos: *Single/Multi switched Inductor*, *Single-Winding Transformer* e *Multi-Windings Transformer*.

- ***Single/Multi switched Inductor*:** No *Single Inductor* é usado apenas uma bobina para transferir energia para a bateria inteira. O controlador lê a tensão das células e, através dos interruptores, liga as células a carregar à bobina. Já o *Multi Inductor* são usadas $n-1$ bobinas para n células [34].

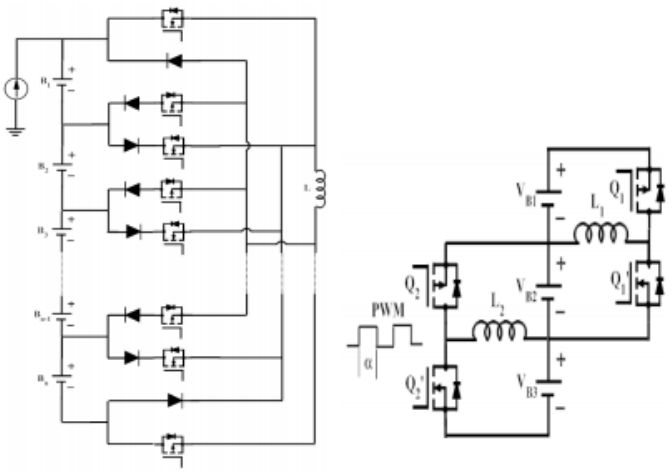


Figura 2.33: Equilíbrio ativo *Single/Multi switched Inductor* [34].

- ***Single-Winding Transformer*:** Este sistema utiliza a tensão da bateria para carregar individualmente cada célula, ligando a bobina secundária do transformador às baterias mais fracas através de interruptores [34].

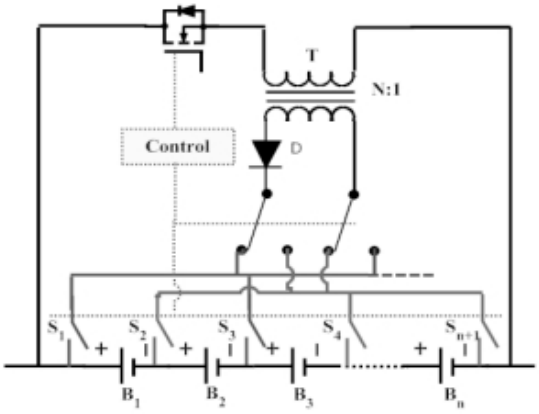


Figura 2.34: Equilíbrio ativo *Single Winding Transformer* [34].

- ***Multi-Windings Transformer*:** Este método apresenta um transformador com um enrolamento primário ligado à bateria e os secundários ligados às células individualmente. Com a ajuda do interruptor *S1*, a energia que irá acumular na bobina primária irá passar para cada célula individualmente. Este método é chamado de estrutura *flyback*. Por outro lado, a figura da direita da figura 2.35 apresenta um esquema semelhante (*forward structure*), com a diferença de que cada célula apresenta um interruptor, de modo a haver um melhor controlo individualmente. Este método é complexo e de elevado custo [34].

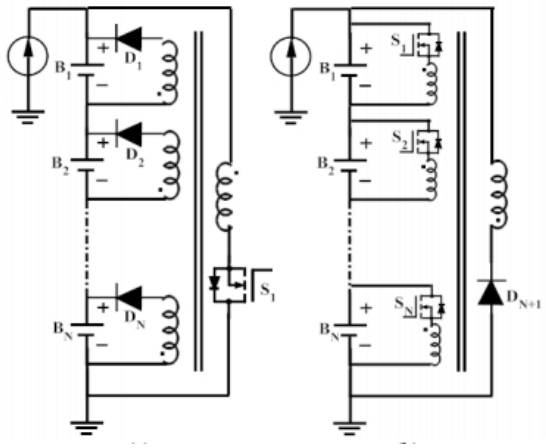


Figura 2.35: Equilíbrio ativo *Multi Windings Transformer* [34]

Por ultimo, o equilíbrio por conversores (*converter based*) liga as células individualmente aos dispositivos eletrónicos a serem alimentados pela bateria. Deste modo, o BMS acaba por alimentar as células independentes, fazendo com que a energia total não passe por entre as células, acabando por igualar os SoC das células da bateria. As figuras 2.36 e 2.37 mostram as células ligadas individualmente ao conversor *buck* (carregador) [34].

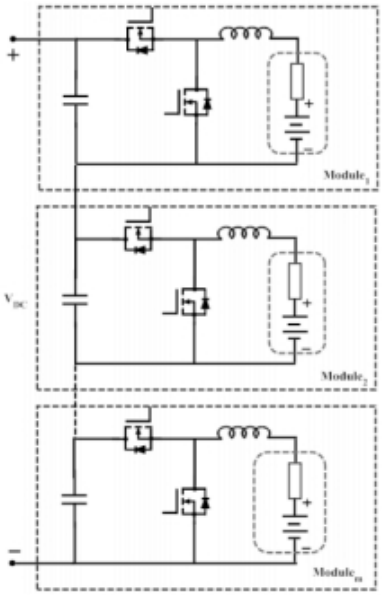


Figura 2.36: Equilíbrio por conversor 1 [34].

Dos métodos referidos, o ativo indutivo é o que consome menos energia. Por outro lado, o passivo é o único que não se pode aplicar à descarga, visto que desperdiça energia. Todos os métodos de equilíbrio baseiam-se na estimação do SoC e do SoH, pois são eles que irão controlar o equilíbrio da bateria [35].

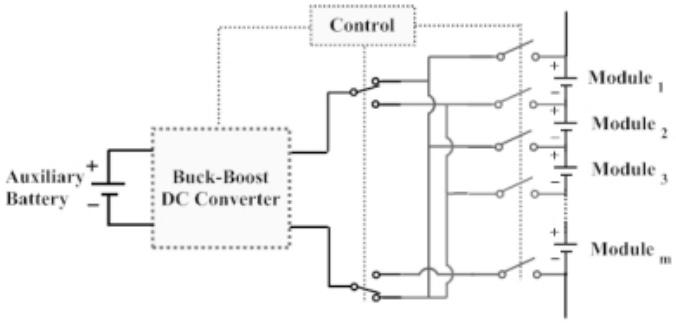


Figura 2.37: Equilíbrio por conversor 2 [34].

2.6 Conclusão

Este capítulo teve como objetivo apresentar todo o tipo de topologias referentes aos conversores e formas de controlo, assim como explorar melhor o funcionamento de uma UPS. Por outro lado, permitiu-nos conhecer todo o tipo de baterias recarregáveis, assim como os diferentes tipos de sistemas de gerenciamento de baterias. Deste modo, com o conhecimento adquirido, tornou-se mais fácil dimensionar os diferentes componentes para o desenvolvimento e construção da UPS Portátil.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

No presente capítulo, apresenta-se os métodos inerentes ao dimensionamento dos componentes dos sistemas de armazenamento, carregamento e descarregamento de energia.

3.1 Dimensionamento do Sistema de Armazenamento de Energia

A primeira etapa deste estudo tem como principal objetivo a seleção e o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia (bateria) que integrará a UPS. Deste modo, em primeiro lugar, são selecionados os tipos de célula mais adequados, efetuando-se, seguidamente, uma análise de mercado. Na secção seguinte, apresentam-se as potenciais aplicações da UPS que serão relevantes para o dimensionamento da bateria. Posteriormente, é escolhido o modelo da célula da bateria. Finalmente, descrevem-se as características da bateria dimensionada para a UPS.

3.1.1 Análise de mercado

De acordo com a tabela 2.2 da Secção 2.2, conclui-se que as células de lítio são as mais leves e pequenas em função da sua energia fornecida. De forma a cumprir o conceito de "portátil"da UPS, as células de lítio foram as selecionadas. Dentro destas, as células de lítio-metal e lítio-enxofre foram inicialmente excluídas devido aos seus baixos ciclos de vida útil, restando apenas as células de iões de lítio e de polímeros de lítio. Com o objetivo de tornar a UPS mais acessível ao consumidor, foi feita uma análise de mercado para as células de iões de lítio e para as de polímeros de lítio, apresentadas nas tabelas 3.1 e 3.2, respetivamente.

Tipo de bateria	**Fabricante**	**Fornecedor**	**Tensão (V)**	**Capacidade (Ah)**	**Energia (Wh)**	**Descarga**	**Custo (€)**
-	Turnigy	*HobbyKing*	3,7	2	7,4	10C (20A)	3,43
-	Turnigy	*HobbyKing*	3,7	2,5	9,25	8C (20A)	4,70
-	*Samsung*	*OnlyBattery*	3,7	2,6	9,62	0.2C (520mA)	10
-	*Nitecore*	*OnlyBattery*	3,7	2,3	8,51	2C (4,6A)	23,95
$FeLiO_4P$	*Enerpower*	*Nkon*	3,2	1,6	5,12	3C (4,8A)	2,25
$LiNiCoMnO_2$	*LG*	*Nkon*	3,7	3,2	11,84	3.1C (10A)	3,75
$LiNiCoMnO_2$	*Samsung*	*Nkon*	3,6	3,35	12,06	2.4C (8A)	3,95
$LiNiCoMnO_2$	*Samsung*	*Nkon*	3,6	3	10,8	5C (15A)	3,75
$FeLiPO_4$	*Sony (Murata)*	*Nkon*	3,6	3	10,8	10C (30A)	3,99
$LiNiCoMnO_2$	*Sony (Murata)*	*Nkon*	3,6	2,25	8,1	4.44C (10A)	2,6

Tabela 3.1: Análise de mercado para células de iões de lítio.

Fabricante	**Fornecedor**	**Tensão (V)**	**Capacidade (Ah)**	**Energia (Wh)**	**Descarga**	**Pico de descarga**	**Custo (€)**
Turnigy	*HobbyKing*	3,7	0,95	3,5	75C (71A)	150C (142,5A)	8,24
Turnigy	*HobbyKing*	3,7	0,5	1,85	25C (12,5A)	50C (25A)	3,57
Turnigy	*HobbyKing*	3,7	0,75	2,8	70C (52,5A)	140C (105A)	4,83
Turnigy	*HobbyKing*	3,7	0,6	2,22	75C (45A)	150C (90A)	4,91
Turnigy	*HobbyKing*	3,7	0,35	1,3	65C (21A)	130C (45,5A)	4,18
Turnigy	*HobbyKing*	7,4	1	7,4	25C (25A)	35C (35A)	4,72
Zippy	*HobbyKing*	7,4	0,85	6,29	25C (21A)	35C (30A)	5,61
Zippy	*HobbyKing*	11,1	1,6	17,76	20C (32A)	30C (48A)	9,37
GEBattery	-	3,7	10,5	40,7	5C (55A)	-	25

Tabela 3.2: Análise de mercado para células de polímeros de lítio.

Através da análise da tabela 3.1, verificou-se que as células de lítio $FeLiO_4P$ possuem menor tensão nominal, tal como sugere a tabela 2.3 da Secção 2.2.7.2. Por outro lado, também têm uma baixa capacidade, o que resulta numa baixa energia especifica e densidade de energia. Já as restantes células, cuja tensão nominal ronda os 3,7V, apresentam um bom rendimento, isto é, têm uma boa capacidade e suportam descargas razoáveis. Contudo, quanto maior for a sua taxa de descarga, menor é a sua capacidade.

Através da análise da tabela 3.2, as células de Li-Po apresentam maior taxa de descarga, pois conseguem ter correntes de descarga superiores às das Li-Ion. No entanto, o seu custo é mais elevado. Por outro lado, existem várias configurações no mercado: uma célula (3,7V); duas células em série (7,4V); três células em série (11,1V) e até mesmo dez células em série (37V). De acordo com as *datasheets* dos fabricantes (*Turnigy* e *Zippy*), se as células de Li-Po forem usadas perto da sua corrente máxima de descarga, estas apenas têm uma vida útil de aproximadamente 350 ciclos, enquanto as de Li-Ion possuem uma vida útil de cerca de 500 a 1000 ciclos.

Pelas tabelas conclui-se que o custo médio das baterias de Li-Ion é mais baixo que as de Li-Po.

3.1.2 Aplicações

Como referido na proposta da presente dissertação, existem três tipos de requisitos para a UPS Portátil: obrigatório, desejável e opcional.

O requisito obrigatório prende-se com uma saída de 230V CA monofásica com uma energia máxima de 2kW30min. Deste modo, o utilizador poderá ligar em qualquer lugar uma carga à UPS com um máximo de potência de 2kW durante 30min. Assim, a bateria terá de ser de 1kWh com uma descarga de 2C.

O requisito desejável é ter 2 saídas CC, uma de 12V e outra de 5V. Em relação à saída 12V, esta assemelha-se à saída de isqueiro de um automóvel, podendo o utilizador ligar vários aparelhos portáteis como um GPS, carregar um tablet, alimentar uma geladeira portátil de viagem, etc. Após a consulta de vários manuais de automóveis [36] [37], esta saída está limitada por um fusível entre 15A a 20A sendo suficiente para as cargas a que a saída está destinada, pelo que a saída de 12V da UPS também terá uma potência máxima de 240W (equação 3.1). Já a saída de 5V estará limitada a 10W, visto que esta é normalmente usada em carregamentos de dispositivos de baixo consumo como um smartphone, cuja corrente máxima de carregamento é aproximadamente de 2A. Como a bateria da UPS terá 1kWh, o seu descarregamento processa-se a 0.24C para a saída de 12V e 0.01C para a saída de 5V.

$$P = UI \tag{3.1}$$

Por último, a UPS apresenta como requisito opcional um *booster* para ajudar no arranque do motor de um automóvel caso a bateria deste se descarregue. Através do exemplo do motor de arranque da figura 2.20 da secção 2.4, este apresenta uma corrente de pico de aproximadamente 800A, atenuando de imediato para os 100A. Como a bateria de um automóvel tem uma tensão nominal de 12V, a UPS necessita de uma saída de cerca de 9,6kw de pico, atenuando para 1,2kW até o motor de combustão arrancar (descarga de 9.6C de pico e 1.2C constante).

3.1.3 Escolha da célula

Primeiramente, dimensionou-se uma bateria com células de polímeros de lítio. A célula utilizada foi a GEB10059156 3,7V 11Ah do fabricante GEBattery, por apresentar maior energia (40,7Wh, equação 3.2), e também por possuir uma das melhores taxas de descarga (55A). Adicionalmente, esta célula possui uma massa de 201,5g.

$$E = UAh \tag{3.2}$$

O motor de arranque de um automóvel opera numa gama de tensão entre 10,5V e 14,7V proveniente da bateria com que é equipado, cuja tensão nominal é de 12V. Neste sentido, a bateria foi dimensionada para uma tensão nominal igual a 11,1V, conseguidos pela associação de 3 células em série. De modo a obter uma bateria de pelo menos 1kWh (requisito obrigatório), é necessário colocar 9 *strings* em paralelo, obtendo-se, assim, um total de 27 células, resultando numa bateria com uma configuração de 3S9P. Pela *datasheet* do fabricante, cada célula consegue fornecer 55A (5C), pelo que a bateria dimensionada consegue fornecer um máximo de 495A. Para o motor da figura 2.20, esta corrente não é suficiente para atingir a corrente de pico, sendo necessário aumentar o número de *strings* em paralelo. Assim, para perfazer os 800A (9.6C) foi fundamental aumentar

as *strings* de 9 para 15, obtendo-se, assim, um total de 45 células. Deste modo, a bateria permite fornecer 825A, passando esta a possuir 1,831kWh. Como cada célula tem um custo de 25€, a bateria dimensionada apresenta um custo total de 1125€e uma massa de 9,068Kg.

Após o dimensionamento da bateria de polímeros de lítio, procedeu-se à determinação de uma bateria de iões de lítio para cumprir, igualmente, o requisito do *booster*. Estas células têm vantagem relativamente às de polímeros por possuírem um menor custo. Contudo, apresentam uma taxa de descarga mais reduzida.

Após a consulta de várias *datasheets*, a célula selecionada foi a INR18650-35E, uma vez que esta é uma das células de iões de lítio que apresenta maior energia (12,06Wh) e boa taxa de descarga (pico de 13A e 8A contínuos) do mercado. Como as células de iões de lítio e as de polímeros de lítio têm tensões nominais muito próximas (3,6V e 3,7V), a configuração da nova bateria coincide com a da anteriormente dimensionada, isto é, 3 células em série de modo a perfazer 10,8V nominais. A bateria requer pelo menos 1kWh, sendo necessárias 84 células, colocando-se 28 *strings* em paralelo (3S28P). Sendo a corrente de pico de cada célula 13A, a bateria conseguirá fornecer um total de 364A de pico. Para o motor de arranque da figura 2.20, esta bateria não é suficiente, sendo necessário aumentar as *strings*. Assim, a quantidade de *strings* passou de 28 para 62 (806A), aumentando-se o número de células de 84 para 186, passando a bateria a ter 2,243kWh com um custo total de 734,7€e uma massa de 9,3Kg.

Embora o custo da bateria de iões de lítio seja mais baixo que o da de polímeros, este continua a ser demasiado elevado para o utilizador (734,7€). Por outro lado, a sua massa (9,3Kg), ainda que seja uma das melhores soluções do mercado, também compromete o conceito de "portátil" para a UPS Portátil, pelo que foi decido não cumprir o requisito opcional: *booster*.

Deste modo, foi dimensionada uma bateria com capacidade de descarga inferior à do *booster*, de apenas 2C para satisfazer a saída CA 230V 2kW30min e as saídas CC de 12V e 5V. As células de iões de lítio são mais baratas que as de polímeros e suficientes para aguentar a descarga máxima de 2C, portanto, a célula INR18650-35E foi a selecionada para a bateria.

A tabela 3.3 apresenta as características da célula escolhida, de acordo com a sua *datasheet* [38].

Característica	Valor	Unidade
Tensão nominal	3,6	V
Tensão máxima	4,2	V
Tensão mínima	2,65	V
Capacidade	3,350	Ah
Energia	12,06	Wh
Corrente de carga ideal	1,020	mA
Corrente de carga máxima	2,000	mA
Corrente máxima de descarga (contínua)	8	A
Corrente máxima de descarga (pico)	13	A
Ciclos	500 (60% capacidade)	-
Resistência interna	0,035	Ω
Peso	50	g
Preço	3,95	€

Tabela 3.3: Características da célula Samsung INR18650-35E [38].

3.1.4 Configuração da bateria

Como mostrado na secção anterior, para a configuração de 10,8V, são definidas 84 células obtendo-se uma bateria 3S28P. Esta configuração é vantajosa para a UPS pois como as células têm uma tensão máxima de 4,2V (tabela 3.3) e uma tensão nominal de 3,6V, a bateria dimensionada irá ter uma tensão máxima de 12,6V e uma tensão nominal de 10,8V. Como a bateria de um automóvel se encontra na mesma gama de tensão (10,5V - 14,7V), a saída 12V poderá ser ligada diretamente à bateria sem necessitar do auxílio de componentes, como um conversor abaixador. A bateria apresentará um custo de 332€e uma massa de 4,2Kg, sendo, então, acessível ao consumidor.

3.1.5 Conclusão

Este capítulo teve como objetivo o dimensionamento da bateria para a UPS. Neste sentido, realizou-se uma análise de mercado relativa às células de lítio para uma melhor compreensão das suas características. Com base nestas e nos requisitos da UPS, escolheu-se as células de iões de lítio, uma vez que possuem um custo menor em relação às de polímeros, beneficiando o utilizador da UPS. Por fim, dimensionou-se a configuração da bateria com base nas aplicações da UPS, chegando-se ao resultado de uma bateria Li-Ion com 84 células INR18650-35E com uma configuração de 3S28P.

3.2 Sistema de Carregamento de Energia

Na segunda etapa do estudo, desenvolveu-se o sistema de carregamento da bateria. Inicialmente, apresenta-se a arquitetura do sistema com o objetivo de simplificar os subsistemas envolvidos.

3.2.1 Arquitectura do Sistema de carregamento

À semelhança das aplicações da UPS, o sistema de carregamento também possui três requisitos distintos. O requisito obrigatório é ter um carregamento ligado à rede elétrica 230V CA. Já o requisito desejável envolve um carregamento através de uma fonte CC de 12V e 24V. Por último, o requisito opcional passa por um carregamento através de um painel fotovoltaico. A figura 3.1 mostra o diagrama de blocos da implementação do sistema de carregamento ao longo desta secção consoante os seus requisitos, facilitando, assim, a sua compreensão.

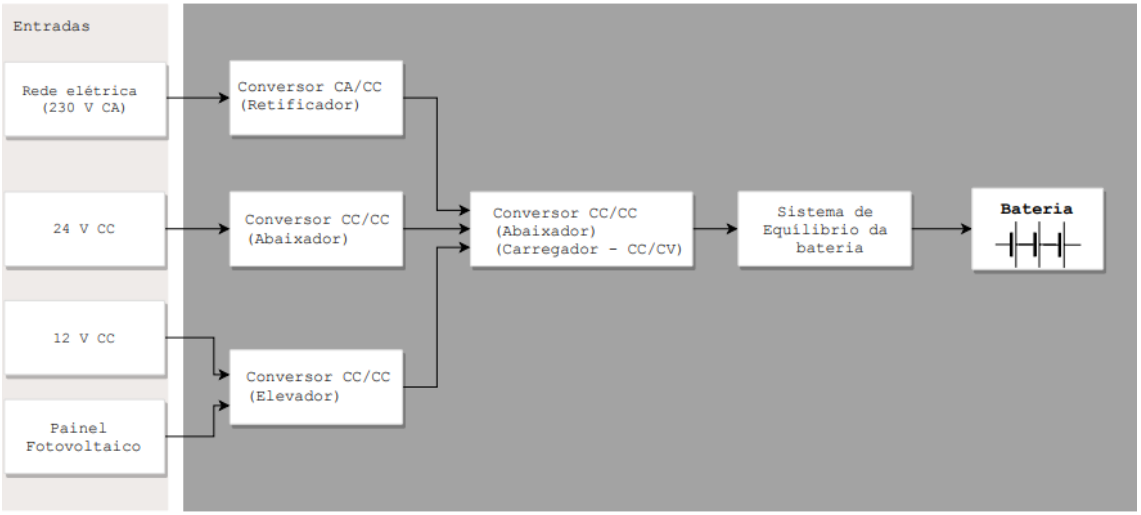


Figura 3.1: Arquitetura do Sistema de Carregamento.

Um dos objetivos desta dissertação é criar uma UPS Portátil acessível ao consumidor pelo que se optou por uma estrutura de UPS *Offline* para a sua construção, pois apresenta um baixo custo (secção 2.1).

Como tal, foi implementado um carregador unidirecional, o qual tem como única função carregar as baterias. Este carregador é representado na figura 3.1 por um conversor CC/CC abaixador que recebe uma tensão contínua fixa de entrada proveniente do conversor CA/CC quando a UPS está ligada à rede elétrica.

Caso o utilizador se encontre num automóvel, por exemplo, também pode carregar a UPS através da ficha de isqueiro de 12V, existindo um conversor elevador que eleva a tensão da bateria do automóvel para a tensão necessária para o funcionamento do carregador CC/CC. Caso a bateria que equipa o automóvel seja de 24V, como é o caso de camiões, é necessário um conversor CC/CC

abaixador, visto que o carregador irá funcionar com uma tensão menor que 24V, tal como irá ser referido na secção 3.2.3.

Por fim, caso o consumidor se encontre num local remoto sem uma fonte de energia próxima, também poderá carregar a UPS através de um painel fotovoltaico. Como os painéis fotovoltaicos apresentam uma baixa tensão e elevada corrente, este terá de ser ligado ao conversor elevador dos 12V para elevar a sua tensão, para que o carregador possa funcionar.

Nas próximas secções irá ser abordado cada subsistema do carregamento.

3.2.2 Conversor CA/CC (Retificador)

Para converter a corrente alternada proveniente da rede elétrica em corrente contínua para o carregador é necessário um conversor CA/CC (retificador). Como se pretende um conversor unidirecional, implementou-se um retificador de onda completa composto por uma ponte de díodos, seguido de um condensador representando o barramento CC. A figura 3.2 representa o retificador usado.

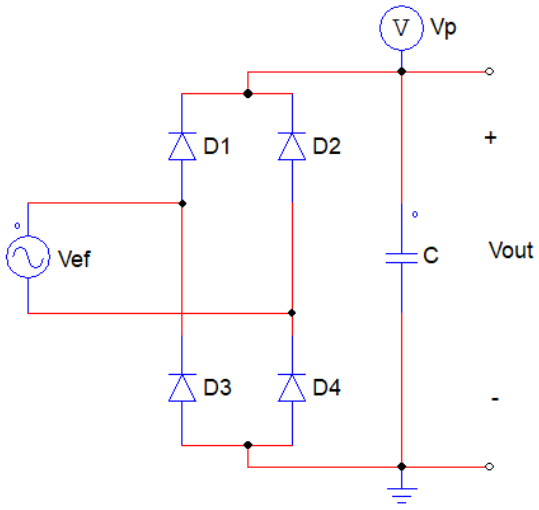


Figura 3.2: Retificador de ponte completa do conversor CA/CC.

Inicialmente, a corrente proveniente da rede elétrica flui através dos díodos dispostos em anti-paralelo, onde durante as arcadas positivas a corrente passa pelos díodos $D1$ e $D4$, enquanto que nas arcadas negativas a corrente flui pelos díodos $D2$ e $D3$. Deste modo, o condensador é carregado com uma tensão de pico $\sqrt{2}Vef$.

Posteriormente mostrar-se-á que é vantajoso usar uma tensão ligeiramente superior à da bateria para o carregador, sendo esta tensão inferior à tensão de pico do barramento CC. Para isso, recorreu-se à utilização de uma transformador de modo a baixar a tensão. Como um transformador de frequência igual à da rede elétrica (50Hz) ocupa um volume considerável, é necessário usar um transformador de alta-frequência reduzindo assim o seu tamanho. Por outro lado, o uso de um transformador também oferece isolamento da rede elétrica.

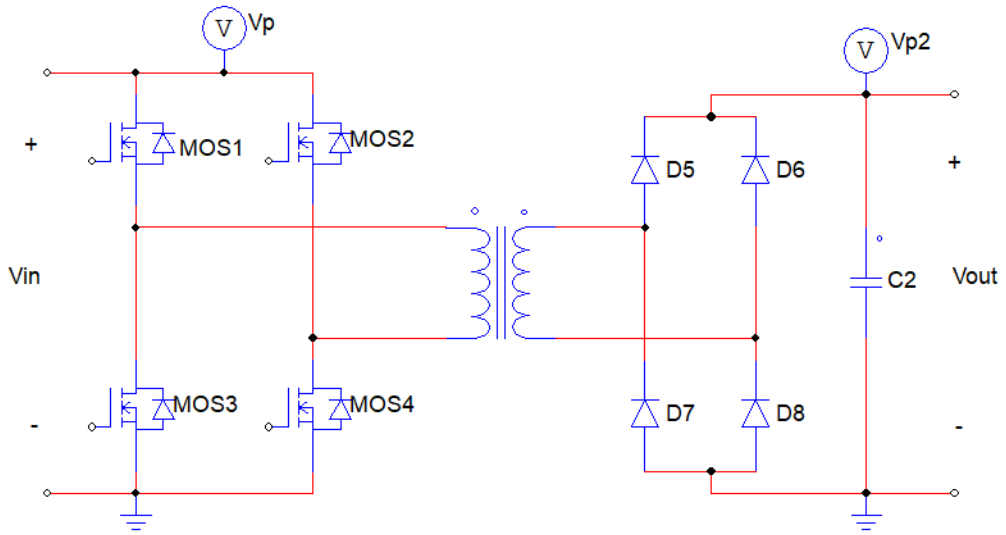


Figura 3.3: Transformador de alta-frequência do conversor CA/CC

A figura 3.3 mostra a implementação do transformador de alta-frequência. Como um transformador funciona apenas com corrente alternada, é necessário converter a tensão contínua do barramento CC em tensão alternada. Deste modo, foi usada uma ponte de MOSFETs semelhante à dos díodos do retificador.

A tensão de pico proveniente do barramento CC entra nos MOSFETs controlados por uma onda quadrada de alta frequência. Quando o $MOS1$ se encontra fechado, o $MOS4$ também se encontra fechado, estando os restantes dois MOSFETs abertos. Deste modo, a corrente flui num sentido. Quando os dois MOSFETs $MOS1$ e $MOS4$ se abrem, os MOSFETs $MOS2$ e $MOS3$ fecham-se, fazendo com que a corrente flua num sentido contrário, transformando, assim, a corrente contínua, novamente, em alternada. Os dois pares de MOSFETs não se podem abrir e fechar simultaneamente, caso contrário ocorreria um curto-circuito.

O transformador de alta frequência, como já foi referido, tem como função transformar a tensão de entrada numa tensão de valor diferente. Como se pretende uma tensão de saída mais baixa para o carregador, o transformador vai, assim, reduzir a sua tensão através do número de espiras.

Após o transformador insere-se um novo retificador igual ao implementado inicialmente, pois é necessário converter novamente a corrente alternada em contínua para o carregador. Deste modo, a corrente flui pelos díodos $D5$ e $D8$ nas arcadas positivas, enquanto nas arcadas negativas passa pelos díodos $D6$ e $D7$, carregando o novo barramento CC ($C2$) com a tensão necessária para o carregador.

3.2.3 Conversor CC/CC (Abaixador) - Carregador

Para o carregamento das baterias foi implementado um conversor CC/CC abaixador. A sua topologia está representada na imagem 3.4.

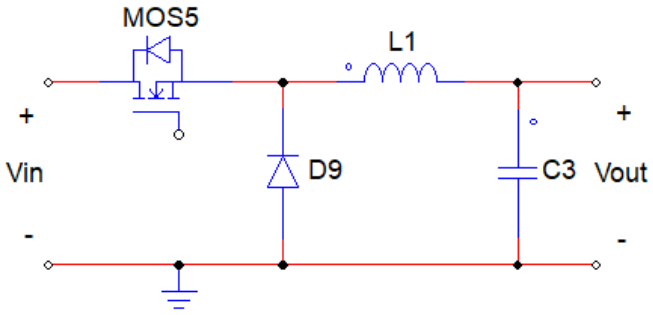


Figura 3.4: Conversor CC/CC abaixador (Carregador).

Este conversor recebe a tensão contínua do barramento CC ($C2$) proveniente do conversor CA/CC baixando-a para a tensão exata para carregar as baterias. Por outro lado, este conversor necessita de um controlador para carregar as baterias no modo CC/CV, já revisto na análise bibliográfica.

Inicialmente, quando o MOSFET $MOS5$ se encontra ligado, isto é, quando se encontra fechado, o díodo $D9$ torna-se inversamente polarizado, fazendo com que a corrente carregue a bobina $L1$, alimentando ao mesmo tempo o condensador $C3$ e a carga $Vout$. Quando o MOSFET se abre, a energia acumulada na bobina é libertada com a ajuda do díodo $D9$ que fica diretamente polarizado alimentando a carga. Assim, a bobina tem como objetivo controlar o *ripple* da corrente, enquanto o condensador controla o *ripple* da tensão.

Neste conversor, a tensão de saída varia linearmente com o tempo de abertura e fecho do MOSFET, D (*Duty-Cycle*), para uma dada tensão de entrada, como mostra a equação 3.3.

$$\frac{Vout}{Vin} = D \tag{3.3}$$

Deste modo, o MOSFET $MOS5$ é controlado por um sinal PWM que consiste na comparação entre um sinal de erro amplificado com amplitude $D4$ e uma onda triangular (ou dente de serra) denominada de portadora, responsável pela frequência de comutação, com um *Duty-Cycle* de 0,5. Esta comparação resulta num sinal PWM de onda quadrada. Quando o sinal de erro é maior que a onda quadrada, o sinal PWM toma o valor de *High*, resultando no fecho do MOSFET, permitindo que a corrente flua por ele. A figura 3.5 mostra a implementação do sinal PWM e a figura 3.6 o sinal de erro com amplitude 0,625 a ser comparado com uma onda portadora triangular de f=20kHz, resultando no sinal PWM.

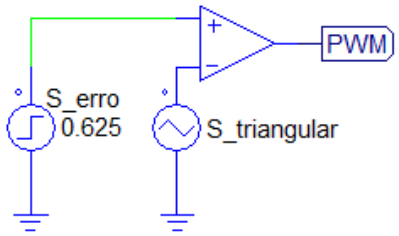


Figura 3.5: Sinal PWM.

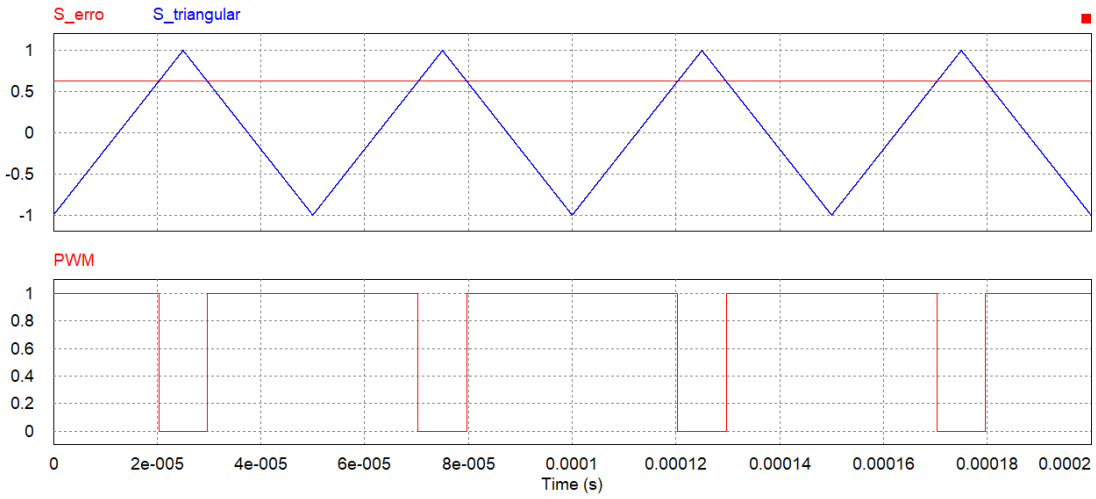


Figura 3.6: Forma de onda do sinal PWM.

Anteriormente, referiu-se que a utilização de uma tensão ligeiramente superior à da bateria apresenta vantagens para o carregador, nomeadamente para a sua bobina, pois quanto mais próxima a tensão de entrada do conversor for da tensão de saída, mais alto será o *Duty-Cycle*, resultando numa bobina de menor tamanho, como mostra a equação 3.4. Este cálculo da bobina é utilizado para conversores em que se pretenda uma saída fixa, cuja entrada pode sofrer variações, como é o caso de fontes de alimentação e da UPS. Caso se pretenda uma saída variável, como o controlo de um motor CC, a equação para a bobina é a 3.5. A capacidade do condensador é calculado pela equação 3.6.

$$Il = \frac{TsVout}{2L}(1-D) \tag{3.4}$$

$$Il = \frac{TsVin}{2L}D(1-D) \tag{3.5}$$

$$\Delta Vout = \frac{Ts}{8C}\frac{Vo}{L}(1-D)Ts \tag{3.6}$$

O modo de controlo CC/CV tem como função efetuar um controlo em corrente constante até a bateria atingir um certo nível de tensão. De seguida, o controlo é alterado para controlo em tensão constante com corrente limitada até a bateria alcançar o seu valor máximo de tensão, desligando o seu carregamento. A *datasheet* da célula escolhida (INR18650-35E) refere este controlo como método de carregamento.

A figura 3.7 mostra o controlo em corrente que consiste na leitura da corrente na bobina do conversor que é enviada para o sistema de controlo. Já no sistema de controlo, é obtido um erro que se define pela diferença da corrente pretendida (I_ref) e a corrente lida (i_lido). Por sua vez, esse erro entra no controlador PI (proporcional-integral) e um limitador, responsáveis por manter a corrente em regime permanente da maneira mais rápida. Como se pretende estabilizar um erro, eliminando ruído, a escolha de um controlador PI é suficiente. O sinal (*Duty-Cycle*) gerado pelo controlador passa pelo limitador responsável por limitar o erro quando ocorrem grandes perturbações. De seguida, o *Duty-Cycle* é comparado pela onda portadora triangular (S_triangular), gerando, assim, o sinal PWM necessário para manter a corrente fixa no conversor.

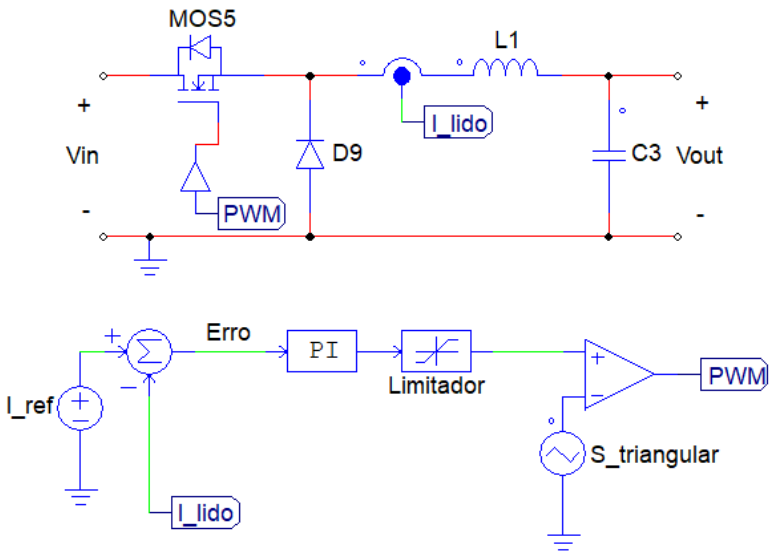


Figura 3.7: Controlo em corrente constante (CC).

O controlo em tensão constante com corrente limitada prende-se com um sistema de controlo um pouco mais complexo, visível na figura 3.8. Para isso, é necessário obter o valor de tensão à saída do conversor, que é o mesmo valor da tensão da bateria. Este valor é enviado para o sistema de controlo, obtendo-se um erro definido pela diferença da tensão pretendida (V_ref) e da tensão lida (V_lida). Este erro entra num controlador PI responsável, mais uma vez, por manter a tensão em regime permanente. De seguida, o valor do *Duty-Cycle* gerado entra num limitador que irá gerar a corrente de saída. É neste limitador que se define a corrente máxima pretendida, visto que este valor será comparado com o valor da corrente lida na bobina (I_lido) resultando num novo

erro. Por fim, este sinal entra num outro controlador PI e num limitador, resultando num *Duty-Cycle* final que é comparado pela onda portadora triangular (S_triangular), gerando o sinal PWM para manter a tensão constante com corrente limitada.

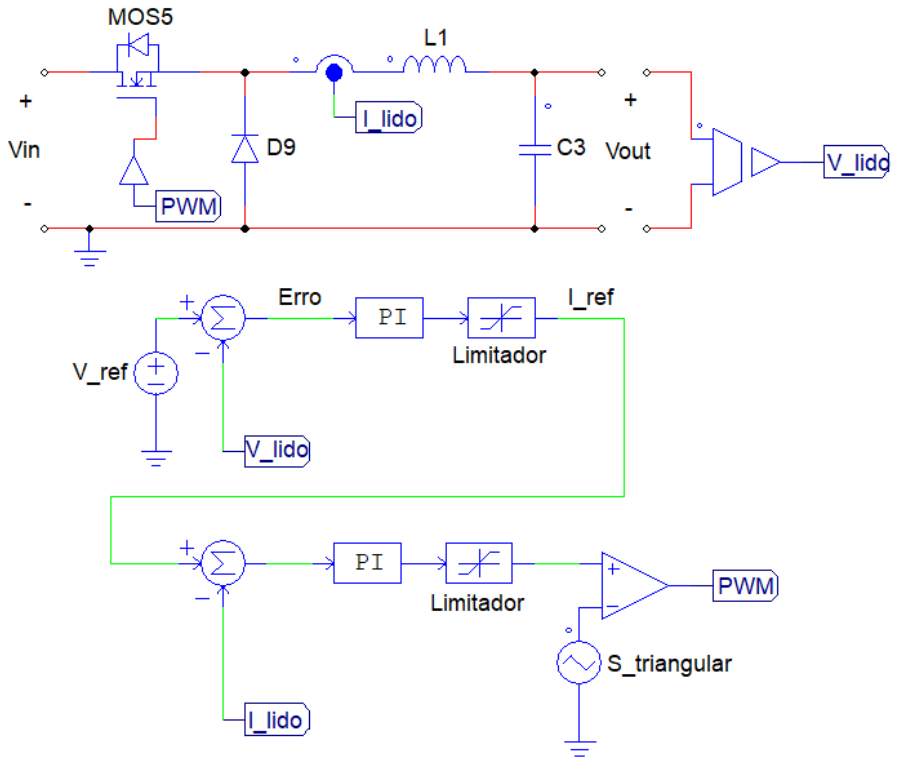


Figura 3.8: Controlo em tensão constante com corrente limitada (CV).

3.2.4 Sistema de Equilibro da bateria

O sistema de equilíbrio da bateria, como já referido na análise bibliográfica, tem como objetivo equilibrar a carga nas células igualando a sua tensão. As células que se encontram em paralelo já se compensam entre si, sendo necessário equilibrar as células que se encontram em série. O circuito proposto (figura 3.9) foi cedido pela dissertação [39].

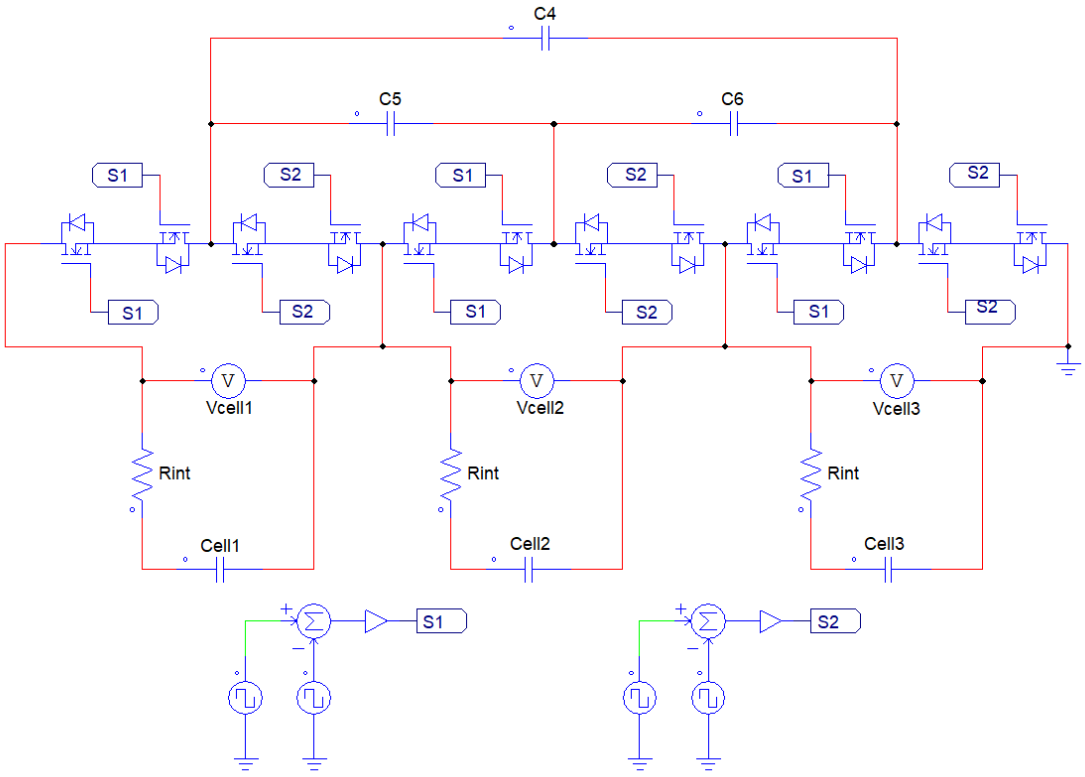


Figura 3.9: Sistema de equilíbrio da bateria.

Este circuito foi dimensionado para três células em série, de acordo com a configuração anteriormente definida para a bateria (3S28P). Este circuito consiste em seis pares de MOSFETs, havendo dois sinais distintos para cada três pares de MOSFETs. Cada célula é constituída por dois pólos (negativo e positivo), onde são colocados os pares de MOSFETs controlados pelo mesmo sinal. Deste modo, quando o sinal $sinal1$ é ativado (o sinal $sinal2$ está desativado), a célula $Cell1$ carrega o condensador $C5$ enquanto a célula $Cell2$ carrega o condensador $C6$. Por sua vez, ambas as células carregam o condensador $C4$. Quando o sinal $sinal2$ é ativado, o sinal $sinal1$ é desativado, passando a energia do condensador $C5$ para a célula $Cell2$ e a energia do condensador $C6$ para a célula $Cell3$. O condensador $C4$, anteriormente carregado pelas células $Cell1$ e $Cell2$ passa a sua energia para as células $Cell2$ e $Cell3$.

Os sinais que ativam os MOSFETs processam-se através do erro entre duas ondas quadradas, estando estes sinais desfasados 180^{o}, de modo a intercalarem entre si. Mais uma vez, os diferentes pares de MOSFETs não podem abrir-se e fechar-se simultaneamente, ocorrendo um curto-circuito. Quanto mais alta for a frequência de comutação entre os sinais e quanto maior for a capacidade dos condensadores, mais rápido será atingido o equilibro das células [40, 41].

3.2.5 Conversor CC/CC (Abaixador)

Caso o utilizador necessite de carregar a UPS e apenas tenha uma bateria de 24V disponível, como é o caso das baterias que equipam os camiões, poderá fazê-lo. Como referido na secção 3.2.3, é necessário baixar a tensão de entrada para uma tensão próxima à da bateria, de modo a reduzir o tamanho da bobina no carregador.

O seu circuito é apresentado na figura 3.10 sendo um conversor abaixador equivalente ao do carregador. Como se pretende uma tensão de saída fixa, foi feito um controlo em tensão. Este sistema de controlo segue o mesmo princípio que o controlo em corrente do carregador.

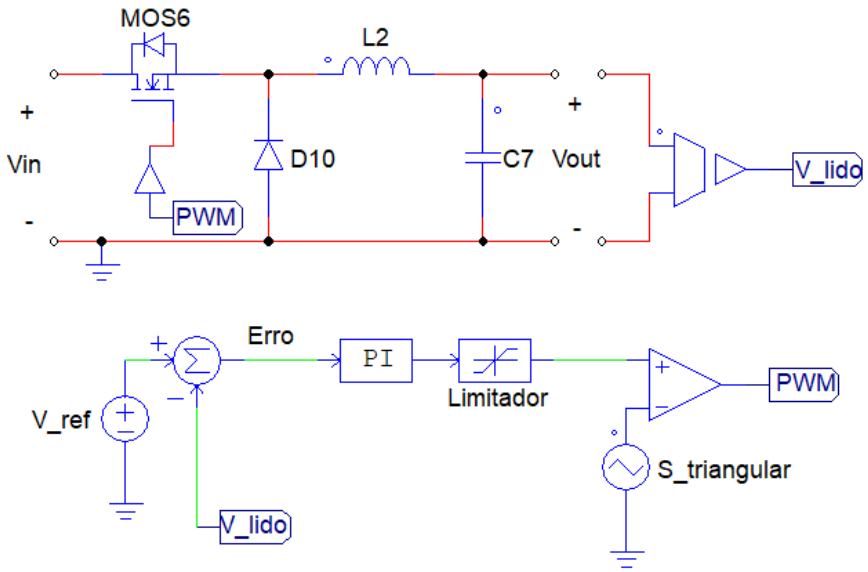


Figura 3.10: Conversor CC/CC abaixador 24V.

3.2.6 Conversor CC/CC (elevador)

Por fim, se o utilizador pretender carregar a UPS no isqueiro do automóvel, também o poderá fazer. Contudo, a saída do isqueiro 12V é limitada entre 15A a 20A conforme o veículo. Para tornar a UPS acessível a todos os veículos, dimensionou-se o seu carregamento para a saída mais fraca (15A). Assim, a UPS poderá carregar em qualquer veículo pela saída de isqueiro sem consumir mais potência, evitando danos no fusível do automóvel. Para tal, foi dimensionado o circuito CC/CC elevador da figura 3.11.

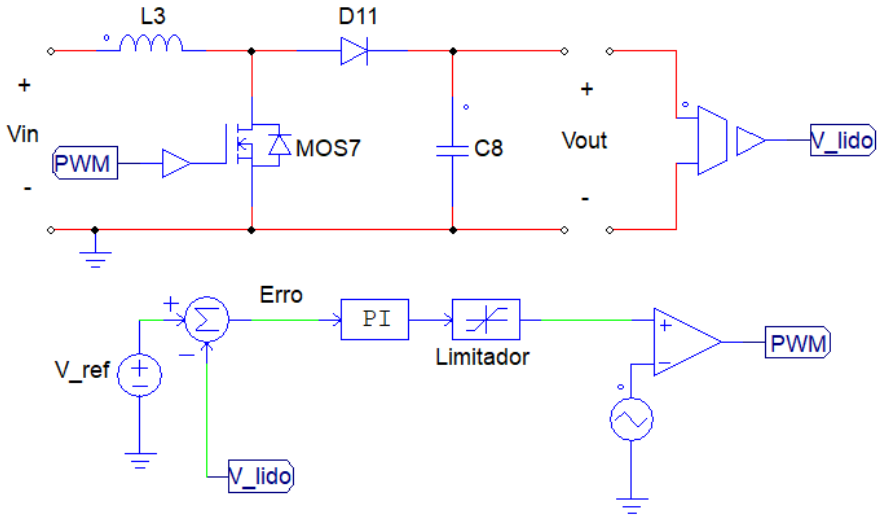


Figura 3.11: Conversor CC/CC elevador 12V.

Este conversor recebe a tensão contínua de 12V da saída de isqueiro do automóvel, aumentando-a para a tensão necessária para o carregador funcionar. Deste modo, quando o MOSFET está em *High*, o díodo retificador torna-se inversamente polarizado, isolando a saída, fazendo com que a corrente que entra no conversor atravesse a bobina *L3*, carregando-a unicamente. Quando o MOSFET se desliga, a energia acumulada na bobina soma-se à energia que entra no conversor, fluindo pelo díodo que se torna diretamente polarizado, alimentando a carga e o condensador com uma tensão superior à de entrada do conversor. Neste, a tensão de saída varia inversamente com $1-D$ para uma dada tensão de entrada, como mostra a equação 3.7. À semelhança do conversor abaixador, a bobina controla o *ripple* da corrente (equação 3.8), enquanto o condensador controla o *ripple* da tensão na carga (equação 3.9).

$$\frac{Vout}{Vin} = \frac{1}{1-D} \tag{3.7}$$

$$Il = \frac{TsVout}{2L}(1-D) \tag{3.8}$$

$$\Delta Vout = \frac{Ts}{8C}\frac{Vo}{L}(1-D)Ts \tag{3.9}$$

Como se pretende uma tensão de saída fixa para o carregador funcionar, foi utilizado um sistema de controlo em tensão semelhante ao do conversor CC/CC abaixador de 24V.

3.3 Sistema de Descarregamento de Energia

A última etapa deste estudo tem como objetivo o desenvolvimento do sistema de descarregamento de energia, já referido na secção do dimensionamento do sistema de armazenamento de energia. De seguida, realizou-se uma breve revisão sobre os métodos implementados para cada requisito deste sistema.

3.3.1 Arquitectura do Sistema de Descarregamento

A figura 3.12 mostra a arquitetura deste sistema disposto, mais uma vez, em diagrama de blocos, facilitando a sua compreensão. Como o requisito obrigatório para a saída da UPS é uma saída de 230V CA monofásica, foi implementado um conversor CC/CA (Inversor), cuja função é converter a corrente contínua da bateria em alternada com a potência obrigatória. Em relação ao requisito desejável, para a saída de 5V foi usado um conversor CC/CC abaixador. Já a saída de 12V é ligada diretamente à bateria pois, como já foi concluído, a tensão nominal da bateria dimensionada (10,8V) encontra-se na mesma gama de tensão que a saída de 12V do automóvel (10,5V - 14,7V).

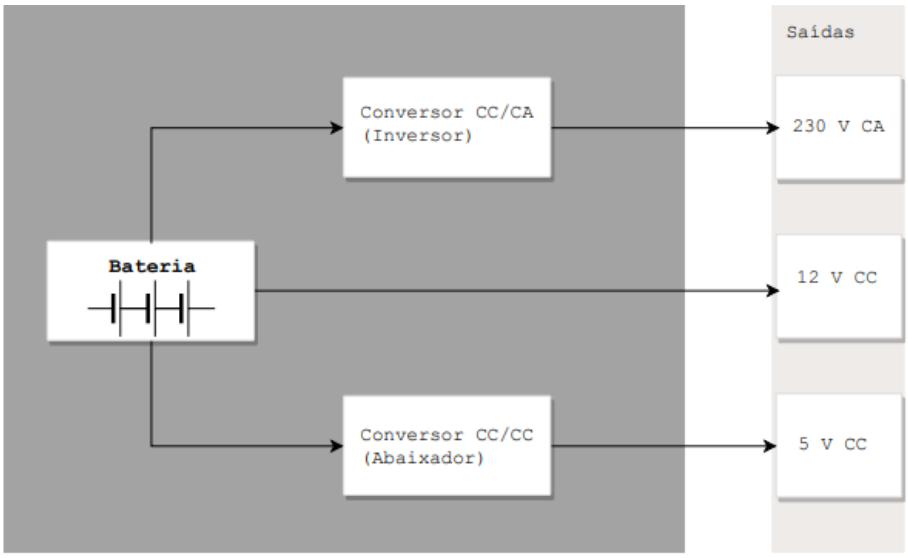


Figura 3.12: Arquitetura do Sistema de Descarregamento.

3.3.2 Conversor CC/CA (Inversor)

Para que a saída obrigatória da UPS seja de corrente alternada, é necessário converter a corrente contínua da bateria. Contudo, tendo a bateria da UPS uma tensão nominal de 10,8V, é necessário aumentar a tensão nominal para obter os 230V de valor eficaz. Deste modo, implementou-se um transformador de alta frequência de modo a reduzir o seu volume consideravelmente. A topologia deste transformador, representada na figura 3.13, é semelhante à do conversor CA/CC para o carregamento da bateria.

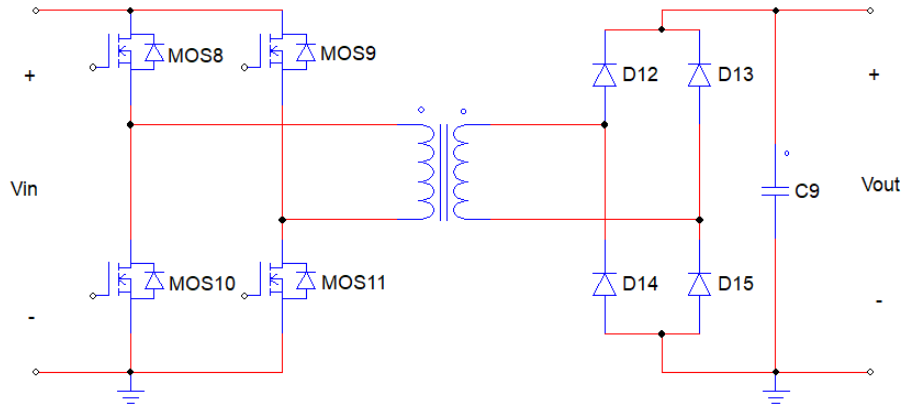


Figura 3.13: Transformador de alta-frequência do conversor CC/CA.

Inicialmente, a corrente contínua proveniente da bateria entra na ponte de MOSFETs controlados por uma onda quadrada de alta frequência. Quando o par de MOSFETs $MOS8$ e $MOS11$ se encontra ativado, o par $MOS9$ e $MOS10$ encontra-se desativado, permitindo que a corrente flua num sentido. Quando o primeiro par é desligado, o par $MOS9$ e $MOS10$ é ligado, fazendo com que a corrente flua num sentido contrário. Deste modo obtém-se uma corrente alternada à entrada do transformador.

As espiras presentes no transformador têm como função variar a tensão de entrada. Como se pretende uma tensão maior, o enrolamento secundário deste tem um número de espiras superior ao do enrolamento primário, elevando-se, assim, a tensão para o valor pretendido.

Após o transformador, é necessário converter a corrente alternada em contínua, para, posteriormente, converter-se novamente em alternada controladamente, de acordo com os valores da rede elétrica. Assim, através de uma ponte de díodos disposta em anti-paralelo, a corrente flui pelos díodos $D12$ e $D15$, enquanto nas arcadas negativas passa pelos díodos $D13$ e $D14$, obtendo-se uma corrente contínua carregando o barramento CC ($C9$) com a tensão de pico aumentada pelo transformador.

Após se elevar a tensão para o valor pretendido, é necessário converter novamente para alternada. Assim, usou-se uma nova ponte de MOSFETs (figura 3.14) controlados de forma a se obter uma frequência na saída do inversor igual à da rede elétrica: 50Hz.

3.3.2.1 Controlo PWM

O controlo nos MOSFETs prende-se com um controlo PWM, que é a comparação entre uma onda sinusoidal com frequência fm igual à desejada na saída do inversor, denominada de onda moduladora, com uma onda triangular responsável pela frequência fp de comutação dos MOSFETs, denominada de onda portadora. A figura 3.15 mostra a comparação entre as duas ondas, resultando no sinal PWM da figura 3.16. Este método denomina-se de PWM Bipolar, visto que a tensão de saída varia entre $+Vd$ e $-Vd$, sendo Vd a tensão no barramento CC ($C9$).

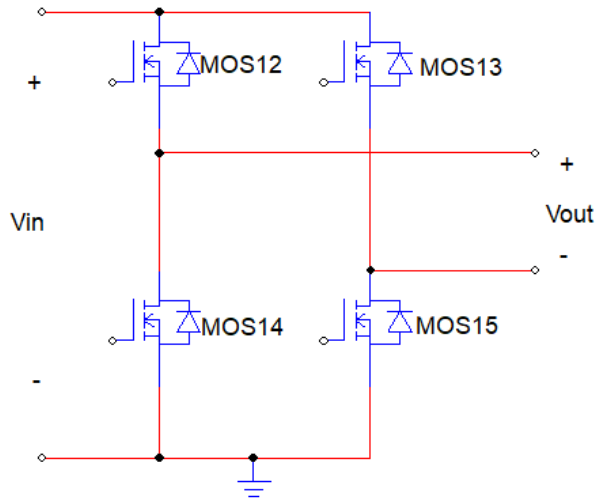


Figura 3.14: Ponte de MOSFETs do conversor CC/CA.

Por outro lado, este controlo funciona com a comutação de dois pares de MOSFETs dispostos na diagonal [4].

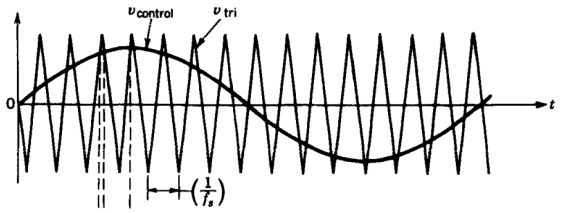


Figura 3.15: Comparação entre a onda moduladora (sinusoidal) e a portadora (triangular) [4].

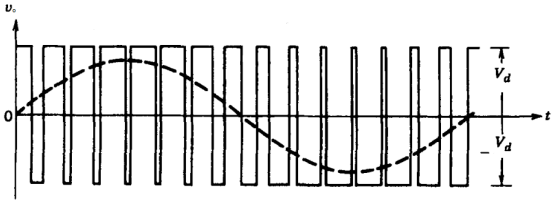


Figura 3.16: PWM Bipolar resultante [4].

O PWM Unipolar consiste em duas ondas sinusoidais de igual frequência mas com amplitude de sinais diferentes a serem comparadas com a onda triangular portadora, como mostra a figura 3.17, resultando no sinal PWM da figura 3.18. O termo Unipolar deriva do facto de a tensão à saída do inversor variar entre $+Vd$ e 0 ou 0 e $-Vd$ sempre que os MOSFETs comutam [4].

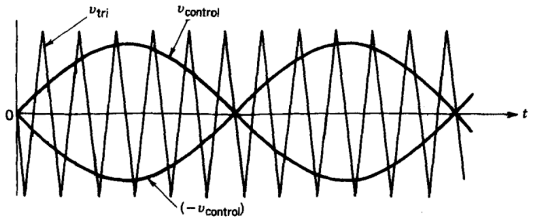


Figura 3.17: Comparação entre as ondas moduladoras (sinusoidais) e a portadora (triangular) [4].

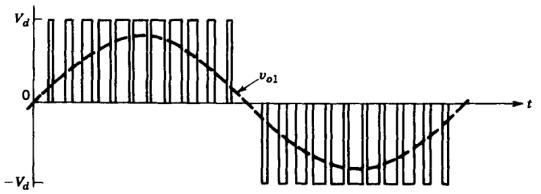


Figura 3.18: PWM Unipolar resultante [4].

O PWM Unipolar tem vantagem sobre o Bipolar, uma vez que apresenta menos harmónicos às altas frequências, como mostram as figuras 3.19 e 3.20. Embora seja mais complexo que o Bipolar, visto que controla os MOSFETs separadamente, o PWM Unipolar foi utilizado para o controlo do inversor da UPS [4].

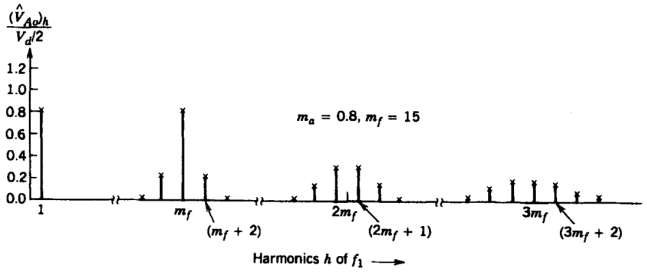


Figura 3.19: Espectro harmónico do PWM Bipolar [4].

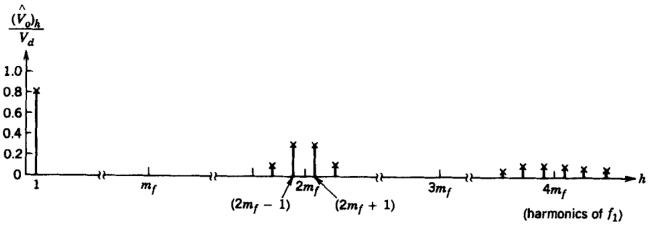


Figura 3.20: Espectro harmónico do PWM Unipolar [4].

A figura 3.21 mostra o controlo PWM Unipolar utilizado.

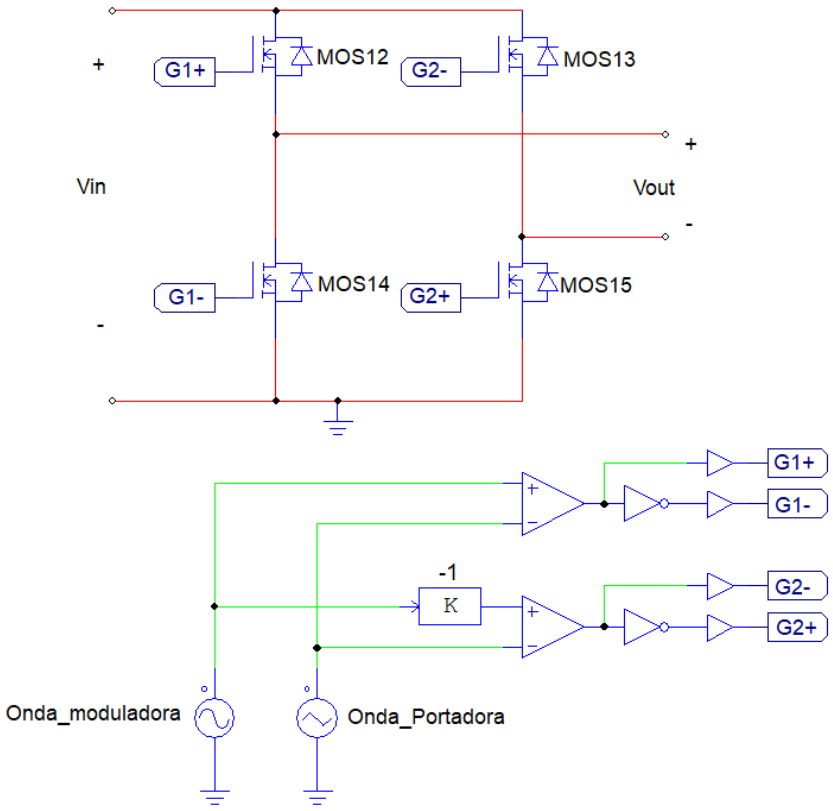


Figura 3.21: Controlo dos MOSFETs do conversor CC/CA.

Nesta topologia, os MOSFETs são comutados separadamente. Isto é, o controlador proporcional com ganho -1 vai inverter o sinal de uma das ondas moduladoras sinusoidais, permitindo que os MOSFETs se comutem alternadamente nesse par. A figura 3.22 representa a comparação entre a onda moduladora sinusoidal com a triangular portadora num par de MOSFETs, enquanto que a figura 3.23 representa a mesma comparação no mesmo instante de tempo, mas com o controlador proporcional no outro par de MOSFETs, permitindo que estes se comutem entre si. É de salientar que à saída dos comparadores existe uma porta lógica negada, permitindo que os MOSFETs se comutem alternadamente e não em par, resultando, assim, no PWM Unipolar.

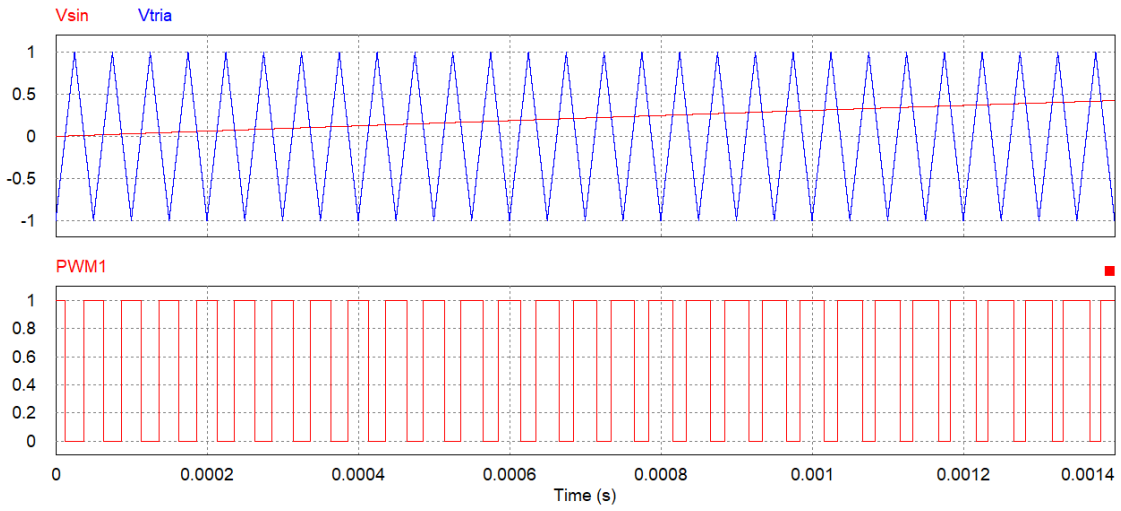


Figura 3.22: PWM nos MOSFETs $MOS12$ e $MOS14$.

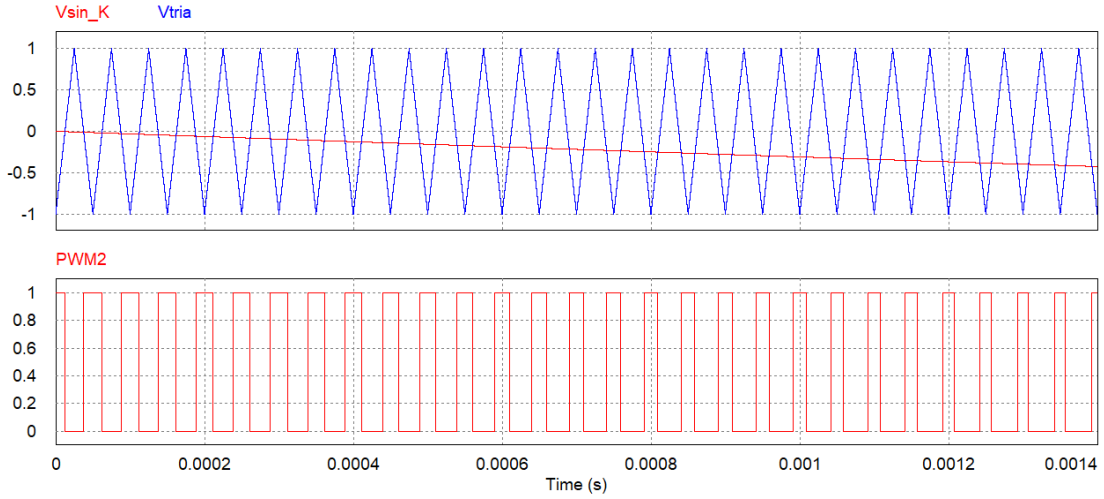


Figura 3.23: PWM nos MOSFETs $MOS13$ e $MOS15$.

A equação 3.10 descreve o cálculo do índice de modulação entre a onda moduladora sinusoidal e a portadora triangular.

$$Ma = \frac{Moduladora_Sin}{Portadora_Tri} \tag{3.10}$$

Por fim, a equação 3.11 mostra que o valor da tensão de saída do inversor varia linearmente com o índice de modulação obtido anteriormente para uma dada tensão de entrada (barramento CC ($C9$).

$$Vout = MaVin \tag{3.11}$$

3.3.2.2 Filtro LC

Após a saída da ponte de MOSFETs, já em corrente alternada com o valor de pico pretendido, é necessário filtrar a saída de modo a obter uma onda sinusoidal pura na frequência desejada. Para isso é necessário implementar um filtro passa-baixo, representado na figura 3.24, de modo a deixar passar as baixas frequências impedindo as altas frequências. Como os MOSFETs comutam com frequência fp, sendo a frequência da onda moduladora sinusoidal de fm=50Hz, é necessário dimensionar um filtro obtendo a frequência de corte (ωc) entre $10fm$ e $0.1Fp$ ($10fm < \omega c < 0.1fp$) [42]. A equação 3.12 mostra a gama de valores em que a frequência de corte se encontra.

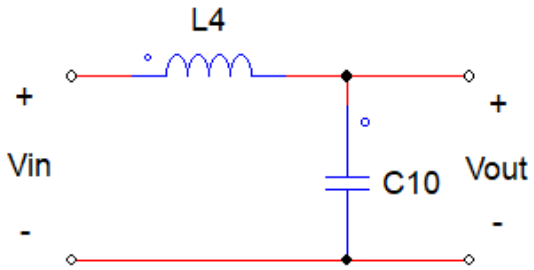


Figura 3.24: Filtro LC Passa-Baixo.

$$\omega c = \frac{1}{\sqrt{L4C10}} \tag{3.12}$$

Após o filtro, a saída do inversor apresenta-se com a forma de onda desejada, de 230V de valor eficaz CA.

3.3.3 Conversor CC/CC (12V)

Como já referido na secção 3.3.1, a tensão de saída da bateria encontra-se na mesma gama que a saída de 12V do isqueiro do automóvel, pelo que esta é ligada diretamente aos terminais da bateria.

3.3.4 Conversor CC/CC (5V)

Por fim, o ultimo requisito do sistema de descarregamento de energia corresponde a uma saída de 5V CC limitada a 10W. Para isso foi utilizado um conversor CC/CC abaixador, permitindo baixar a tensão da bateria para os 5V, limitando a saída a 2A. Este conversor é semelhante ao conversor CC/CC carregador e ao conversor CC/CC de 24V do sistema de carregamento de energia. O sistema de controlo também é semelhante ao controlo CV do carregador, isto é, recebe o valor de tensão à saída do conversor comparando-o de seguida com a tensão pretendida (V_ref - 5V) obtendo-se um erro que é verificado pelo controlador PI, gerando uma corrente. Essa corrente é limitada pelo limitador, como já foi referido no carregador no

modo CV. De seguida, essa corrente é comparada com a corrente lida do conversor, gerando um novo erro, sendo controlado por um novo controlador PI. Por fim, o *Duty-Cycle* é comparado com uma onda triangular gerando o sinal PWM necessário para limitar a saída a 10W.

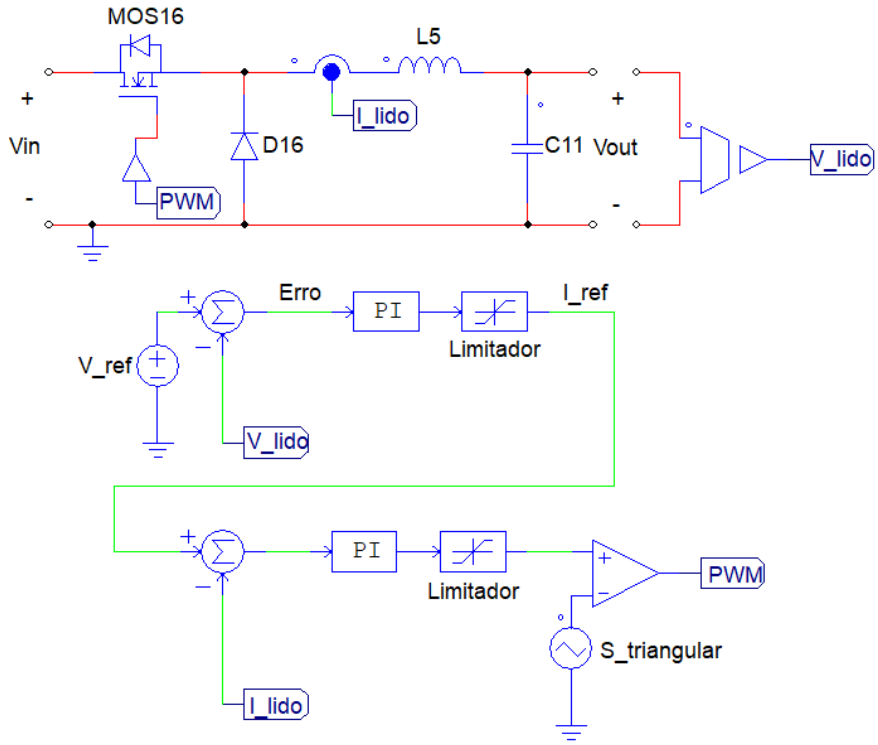


Figura 3.25: Conversor CC/CC abaixador 5V.

3.4 Conclusão

A finalidade deste capítulo prendeu-se com o estudo de todos os requisitos da UPS a nível do armazenamento, carregamento e descarregamento do sistema de energia. Adicionalmente, foram dimensionadas soluções para cumprir os requisitos, tendo sido revista cada solução individualmente. É de salientar o dimensionamento da bateria para a UPS. Neste sentido, realizou-se uma análise de mercado relativa às células de lítio para uma melhor compreensão das suas características. Com base nestas e nos requisitos da UPS, escolheu-se as células de iões de lítio, uma vez que possuem um custo menor em relação às de polímeros, beneficiando o utilizador da UPS. Por fim, dimensionou-se a configuração da bateria com base nas aplicações da UPS, chegando-se ao resultado de uma bateria Li-Ion com 84 células INR18650-35E com uma configuração de 3S28P. No presente capítulo, foram ainda definidos os métodos de análise dos restantes componentes da UPS, apresentando-se os resultados obtidos no capítulo seguinte.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo, procedeu-se à simulação das topologias propostas no capítulo anterior, apresentando-se os resultados obtidos. Assim, efetuou-se a simulação de todos os subsistemas do sistema de carregamento de energia, seguindo-se a simulação dos subsistemas do sistema de descarregamento de energia.

As simulações efetuadas para o estudo dos sistemas da UPS foram realizadas usando o software **Psim**, uma vez que é uma ferramenta promissora no desenvolvimento de circuitos de potência e de controlo, tendo sido já abordada ao longo do percurso académico. Para as simulações que se seguirão, foram usadas pontas de prova para se obter os gráficos para análise.

4.1 Sistema de Armazenamento de Energia

Para as simulações, foi necessário proceder-se a uma aproximação da bateria no **Psim**. Assim, simulou-se a bateria da UPS com um condensador seguido de uma resistência, representando a capacidade da bateria e a sua resistência interna. Foi escolhida esta aproximação da bateria pois é a aproximação mais básica de uma bateria, sendo o principal objetivo deste capítulo a simulação dos conversores [43]. Assim, através das equações 4.1 e 4.2 foi possível calcular o valor da capacidade do condensador correspondente à bateria dimensionada.

$$C = \frac{Q}{\Delta V}(Farad) \tag{4.1}$$

$$Q = 3600Ah(Colombo) \tag{4.2}$$

Como cada célula da bateria apresenta uma tensão máxima de 4,2V e uma tensão mínima de 2,65V, então a bateria terá uma tensão máxima de 12,6V e uma tensão mínima de 7,95V, visto que a configuração é 3S28P. Por outro lado, cada série da bateria apresenta 28 células em paralelo, tendo cada célula 3,35Ah. Assim, obteve-se um condensador de capacidade 72619F.

Relativamente à resistência interna, cada célula apresenta uma resistência de 0,035Ω. A resistência total de resistências em paralelo é dada pela equação 4.3. Já a resistência equivalente

de resistências em série é dada pela equação 4.4. Deste modo, obteve-se uma resistência total da bateria de 3,75mΩ.

$$\frac{1}{Req} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + ... + \frac{1}{Rn} \tag{4.3}$$

$$Req = R1 + R2 + ... + Rn \tag{4.4}$$

A figura 4.1 representa a bateria simulada no software Psim.

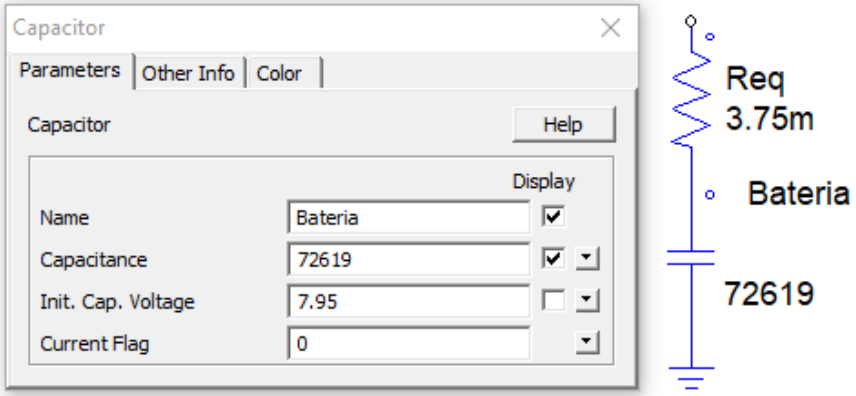


Figura 4.1: Bateria simulada no software **Psim**.

Contudo, nalgumas simulações é necessário simular a bateria com o seu formato de três células em série. No caso da simulação do sistema de equilíbrio de células, por exemplo, é imprescindível este formato, pois a simulação tem como objetivo equilibrar a carga das células da bateria. Assim, nessa simulação utilizou-se o formato da bateria apresentado na figura 4.2. O cálculo do condensador equivalente a 28 células em paralelo é dado pelas equações 4.1 e 4.2, sendo o cálculo da resistência equivalente pela equação 4.3.

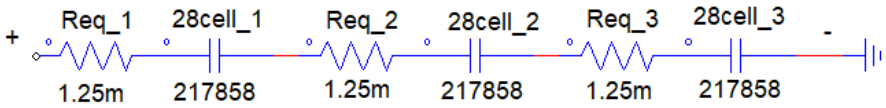


Figura 4.2: Bateria simulada no **Psim** com o seu formato de 3S28P.

4.2 Sistema de Carregamento de Energia

Inicialmente, efetuou-se a simulação do conversor CC/CC (carregador), visto que este irá ditar parte da potência do conversor CA/CC retificador. Após o seu dimensionamento, simulou-se as três entradas disponíveis para o carregamento da UPS: o conversor CA/CC retificador, conversor CC/CC abaixador proveniente de uma bateria de 24V e o conversor CC/CC elevador da saída de 12V de isqueiro do automóvel.

4.2.1 Conversor CC/CC (Abaixador) - Carregador

Como a bateria tem uma tensão máxima de 12,6V, definiu-se uma tensão de entrada do carregador próxima à da bateria, de 15V, de modo a reduzir o tamanho da bobina, já referido no capítulo anterior. Deste modo, o *Duty-Cycle* foi calculado pela equação 3.3 pois pretende-se uma saída de tensão fixa, obtendo-se um D de 0,84. Para a frequência da onda portadora, foi definida uma frequência fp de 20kHz, com *Duty-Cycle* de 0,5.

Cada célula da bateria é carregada a 1,02A [38], e tendo a bateria 28 células em paralelo em cada série, esta vai ser carregada a 28,56A. Assim, para o *ripple* da corrente (*Ilpeak*) decidiu usar-se uma variação máxima de 0,2A (28,46A a 28,66A). Logo, esta corrente vai ter uma variação de 0,007A em cada célula (1,016A a 1,024A). Através das equações 3.4 e 4.5 obteve-se uma bobina de 0,423mH.

$$Ilb = \frac{1}{2} Ilpeak \tag{4.5}$$

Por último, as células de lítio não podem ultrapassar o valor da sua tensão máxima, pelo que o ripple da tensão foi definido para um valor mínimo de 0,002V. Como a bateria tem três séries, esta variação vai ser de 0,0006V em cada célula (4,1997V a 4,2003V). Pela equação 3.6 obteve-se um condensador de capacidade $745\mu F$.

O conversor CC/CC é apresentado na figura 4.3.

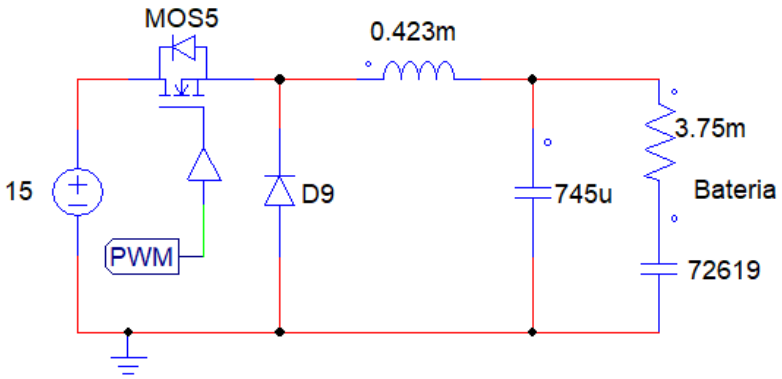


Figura 4.3: Conversor CC/CC abaixador (carregador) simulado.

Para carregar a bateria definiu-se uma tensão máxima de controlo em corrente constante para 12,3V, o que significa que cada célula irá carregar em modo de corrente constante até atingir 4,1V. Após esta tensão, o carregador muda o seu controlo de corrente constante para tensão constante, limitando a corrente. Inicialmente, realizar-se-á um carregamento com a bateria no seu valor mínimo (7,95V) de modo a implementar-se um carregamento CC até esta atingir os 12,3V.

4.2.1.1 Modo CC

Para este modo de controlo, é necessário calcular o ganho (K) e a constante de tempo (T) do controlador PI do sistema de controlo, responsável por manter a corrente no valor de referência com a menor variação possível. Por pré-definição do software **Psim**, a função de transferência do controlador PI é a representada na equação 4.6.

$$G(s) = K\frac{1+sT}{sT} \tag{4.6}$$

Para esta função de transferência, o ganho K do controlador corresponde ao ganho proporcional $K1$ calculado pela equação 4.7. O ganho integral $K2$ é dado pela equação 4.8 e a constante de tempo T é descrita pela equação 4.9 [44].

$$K1 = \frac{T_a}{2K_o\tau_0} \tag{4.7}$$

$$K2 = \frac{1}{2K_o\tau_0} \tag{4.8}$$

$$T = \frac{K1}{K2} = T_a \tag{4.9}$$

T_a corresponde à constante de tempo do sistema em malha fechada. Por outro lado, τ_0 corresponde à constante de tempo em malha aberta. Para este caso, considerou-se o valor da constante de tempo do sistema em malha fechada próximo do valor do sistema em malha aberta, $T_a = \tau_0$, pois se a constante de tempo fosse muito inferior o sistema poderia ser instável. A variável K_o corresponde ao valor de corrente para qual o sistema atenua, sendo neste caso 28,56A. Por fim, T_a refere-se ao tempo que se demora a alcançar $63\%K_o$. De modo a obter-se estes dois valores foi necessário simular o carregador CC/CC em malha aberta, como mostra a figura 4.4. Como a bateria recebe uma corrente elevada quando sujeita a uma tensão elevada, devido à sua baixa resistência e ao condensador, foi necessário aplicar uma tensão próxima à tensão atual (7,95V) de modo a obter-se uma corrente próxima de 28,56A. Assim, adquiriu-se um *Duty-Cycle* de 0,538 correspondente a uma tensão de 8,07V. Devido ao tempo de simulação, diminuiu-se a capacidade da bateria cem vezes, mantendo-se o valor da resistência interna. O gráfico do carregamento em malha aberta é apresentado na figura 4.5.

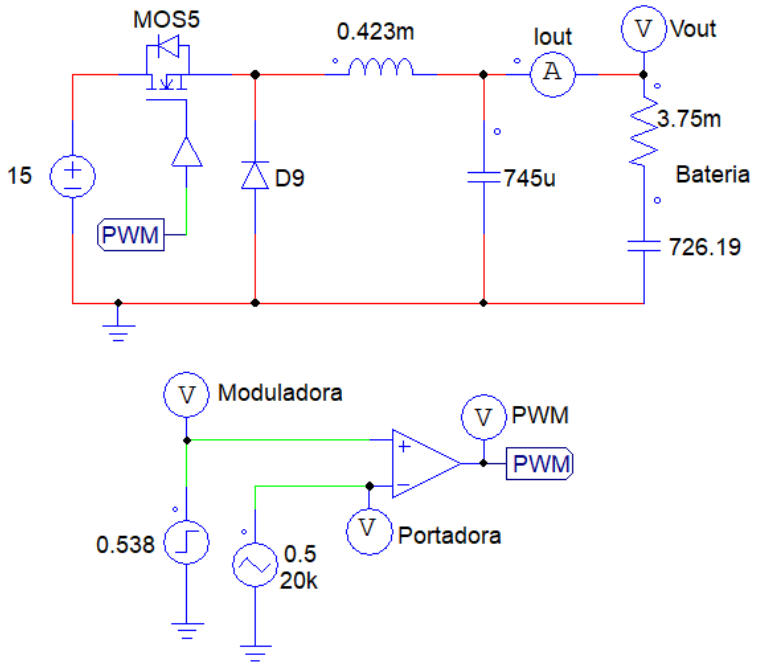


Figura 4.4: Carregamento em malha aberta.

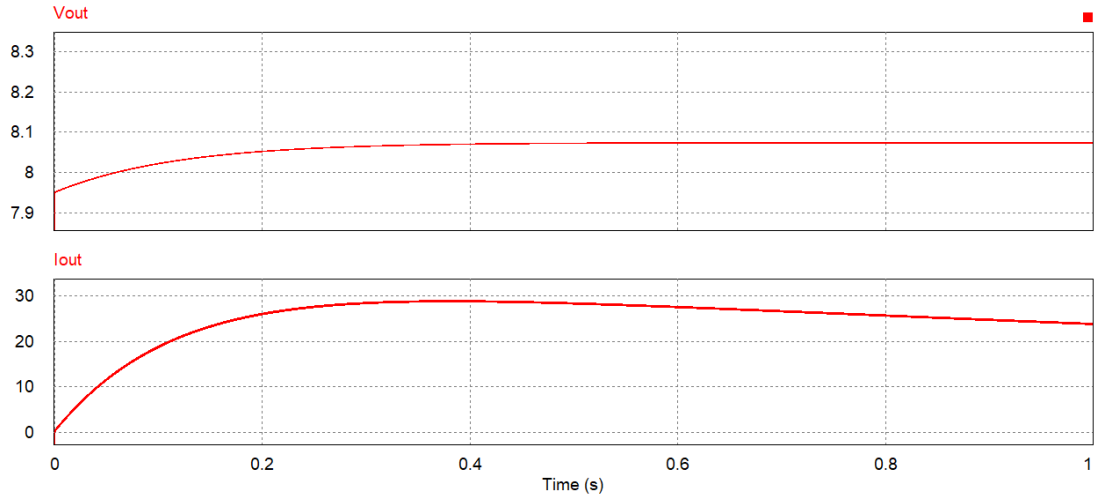


Figura 4.5: Gráfico do carregamento em malha aberta.

Pela análise do gráfico, verifica-se o correto funcionamento do controlo PWM, mantendo a tensão da bateria nos 8,07V e uma corrente máxima de 28,9A, como pretendido. Deste modo, 63% da corrente máxima equivale a cerca de 18,2A. O tempo de alcance T que o carregador demora a alcançar esta corrente foi obtido aproximando-se o gráfico da corrente. Pela análise do gráfico 4.5 verificou-se que o tempo de alcance é aproximadamente 0,0937s.

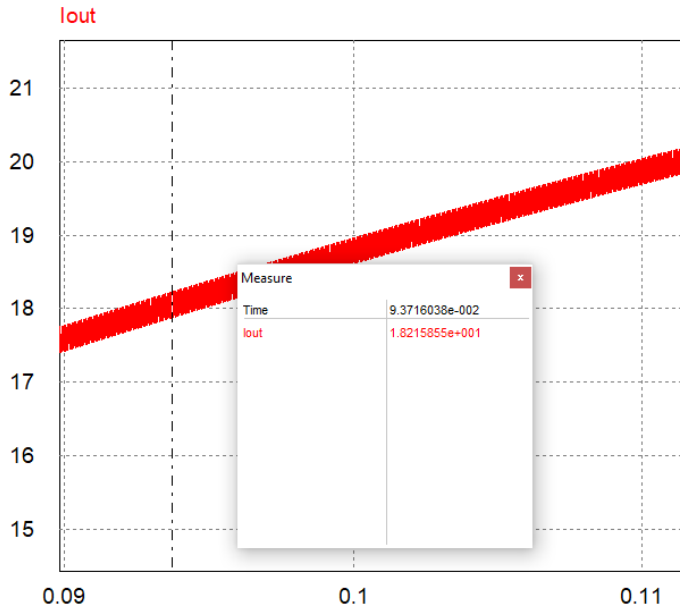


Figura 4.6: Tempo de alcance T do carregamento CC em malha aberta

Assim, o controlador PI do sistema de controlo apresenta um ganho K de 0,017 e um tempo de alcance T de 0,0937s. O limitador restringiu-se a uma gama de valores entre 0 e 0,99 de modo a evitar variações bruscas. As figuras 4.7 e 4.8 mostra o carregamento com controlo em corrente constante.

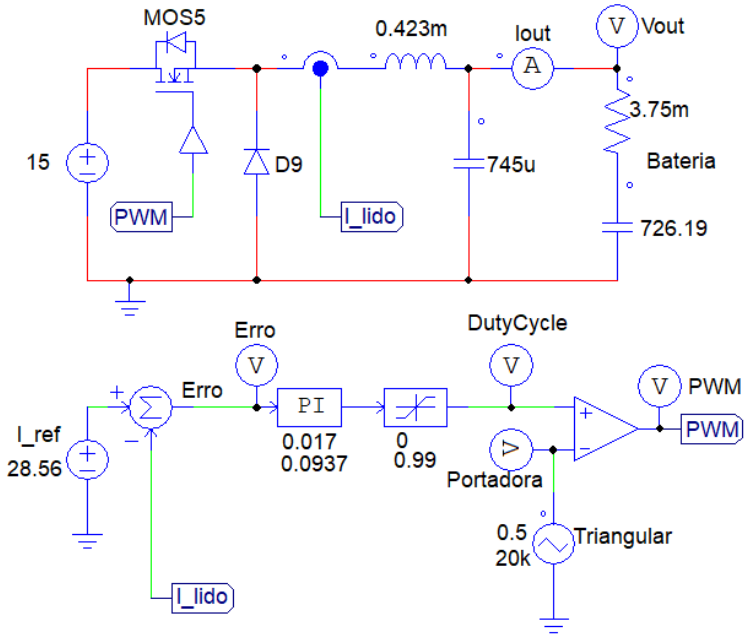


Figura 4.7: Carregamento com controlo em corrente constante.

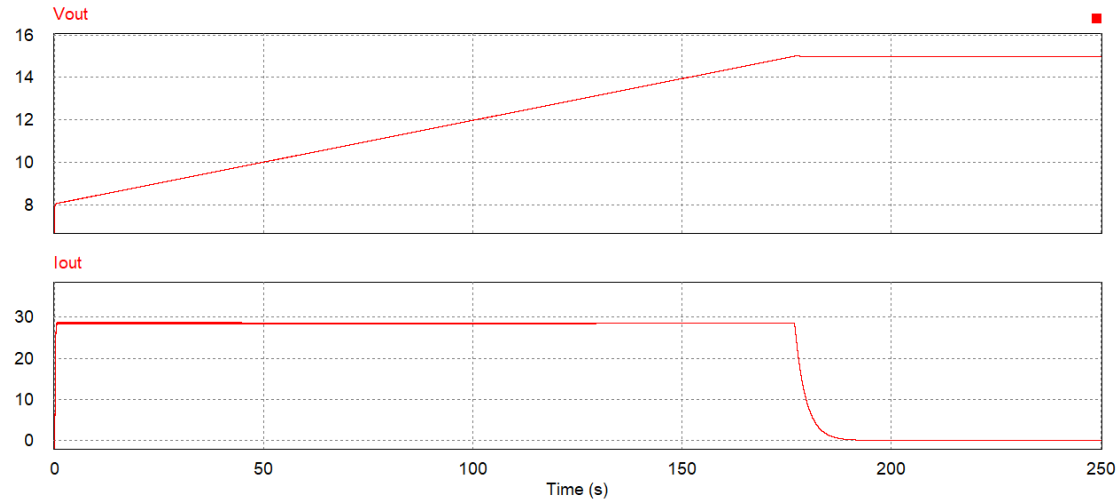


Figura 4.8: Gráfico do carregamento com controlo em corrente constante.

A figura 4.9 mostra o erro da corrente durante o carregamento. Inicialmente, a corrente possui um valor de 0A, logo, o erro terá um valor de 28,56A, diminuindo para 0 assim que esta atinge o seu valor de referência.

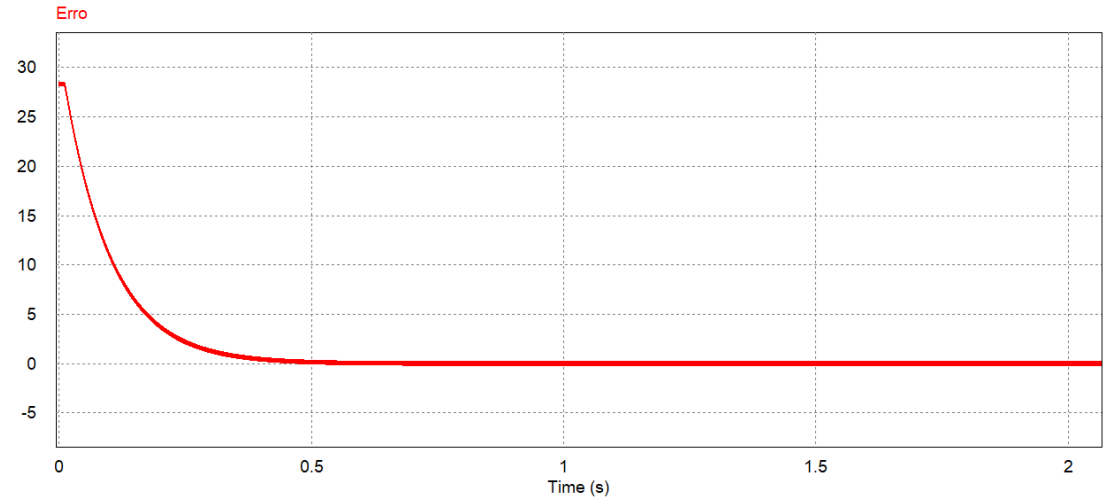


Figura 4.9: Erro do sistema de controlo.

Como já referido, o controlador PI é responsável pela diminuição do erro. Para isso, o controlador origina um *Duty-Cycle* responsável pela sua diminuição. Como em malha aberta a corrente de referência (28,56A) corresponde a um *Duty-Cycle* de cerca de 0,538, é de esperar que o controlador PI origine um *Duty-Cycle* igual a este valor em malha fechada. A figura 4.10 mostra o sinal à saída do PI, começando este sinal em 0,538, valor igual ao do *Duty-Cycle* em malha aberta, concluindo-se que o sistema de controlo está em correto funcionamento.

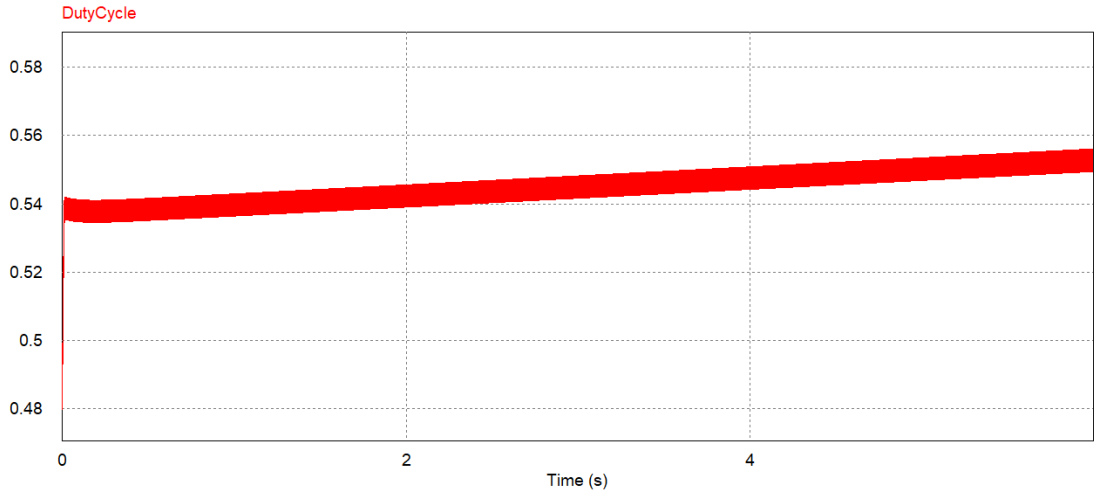


Figura 4.10: *Duty-Cycle* originado pelo controlador PI.

Por fim, o *Duty-Cycle* é comparado com a onda portadora, originando o PWM responsável pelo controlo do MOSFET *MOS*5. A figura 4.11 mostra o sinal PWM resultante.

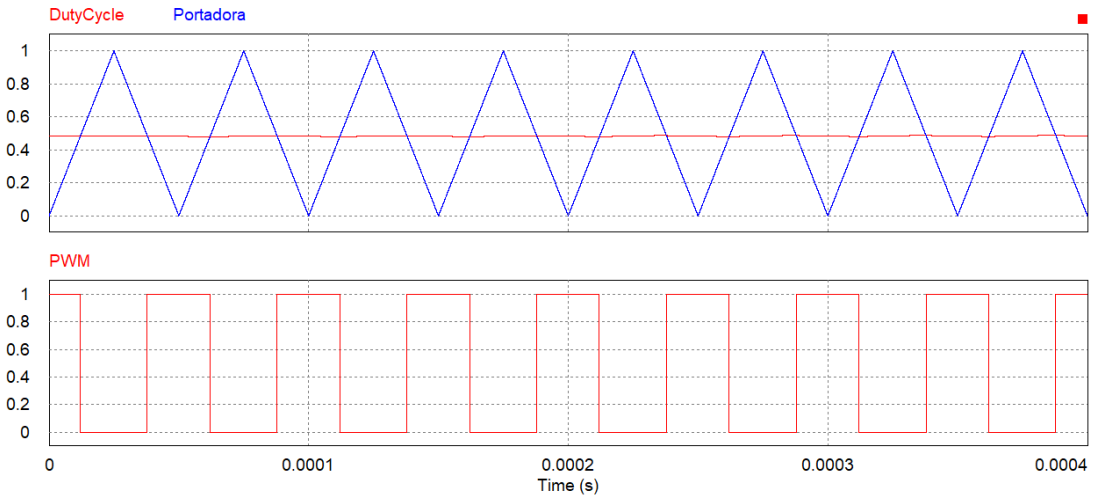


Figura 4.11: Sinal PWM resultante do sistema de controlo para uma corrente de 28,56A

Após a análise do gráfico 4.8, conclui-se que a tensão aumenta na bateria dos 7,95V até aos 15V, tensão que é aplicada à entrada do conversor, com uma duração de 175s. Para o modo CC pretende-se que a bateria atinja uma tensão de 12,3V (108s), trocando o modo de controlo para modo CV.

4.2.1.2 Modo CV

Após a bateria atingir os 12,3V (4,1V por célula), é necessário que esta carregue com uma tensão constante com a corrente limitada. A datasheet das células refere que estas terminam o seu carregamento com uma tensão de 4,2V e uma corrente de 0,068mA. Como a bateria apresenta 28 células em paralelo em cada série, a corrente final será de 1,904A. Já a tensão será de 12,6V.

Mais uma vez, é necessário calcular o ganho do controlador PI responsável por manter a tensão da bateria no valor de referência (12,6V). Sendo este sistema de controlo composto por dois controladores PI, já revistos no capítulo anterior, foi obtido o ganho e a constante de tempo para o primeiro controlador relativo ao controlo da tensão da mesma forma que o modo CC. Assim, simulou-se o circuito em malha aberta representado na figura 4.12. Como se pretende uma tensão final de 12,6V, o *Duty-Cycle*, obtido pela equação 3.3 , é de 0,84. Por outro lado, como a constante de tempo T do controlador PI equivale a $63\%K_o$, sendo K_o igual a 12,6V, foi necessário simular a bateria com uma tensão inicial de 7,94V pois $63\%K_o$ equivale a 7,938V. A simulação é apresentada na figura 4.13.

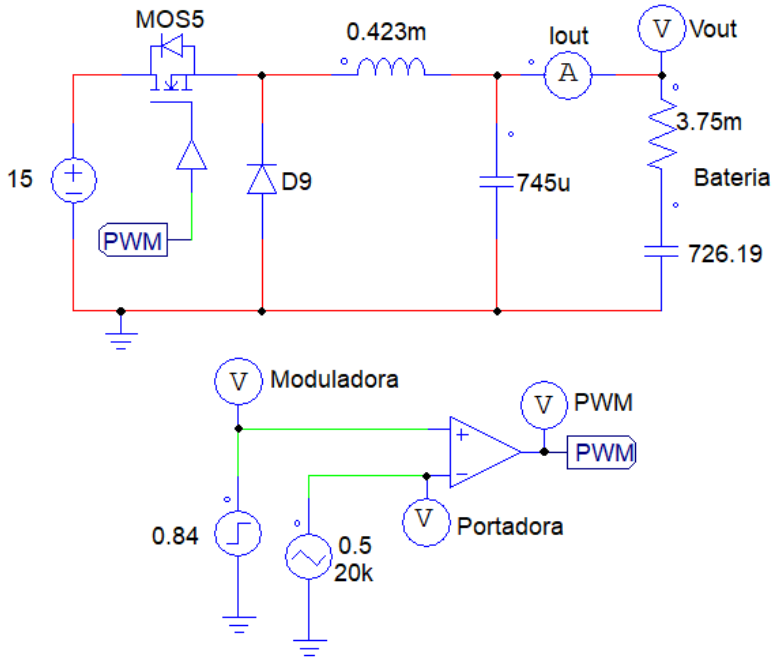


Figura 4.12: Carregamento CV em malha aberta.

O gráfico da simulação do carregamento CV em malha aberta é apresentado na figura 4.13.

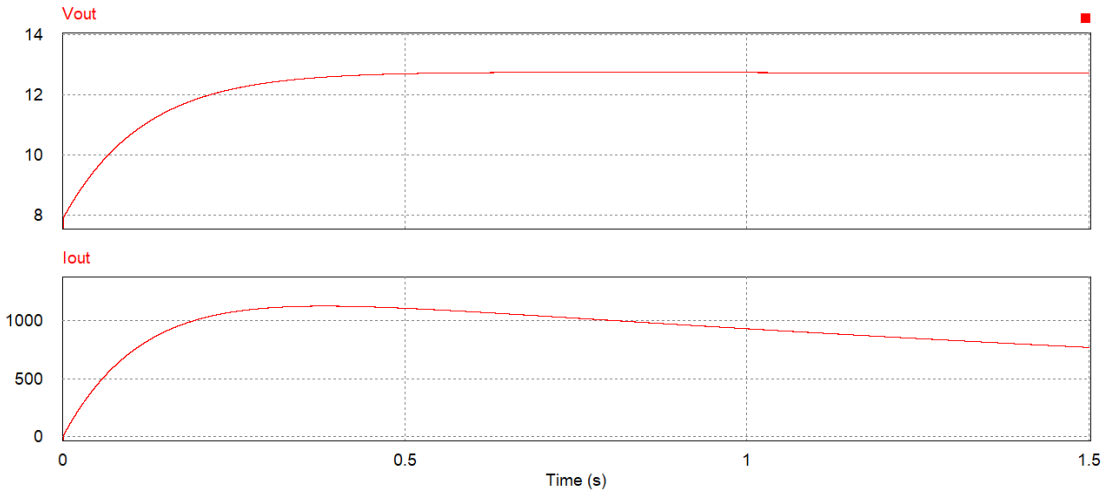


Figura 4.13: Gráfico do carregamento CV em malha aberta.

Assim, através das equações 4.7 e 4.9 obteve-se um ganho K de 0,0397 e uma constante de tempo T de 0,0009 como mostra a figura 4.14.

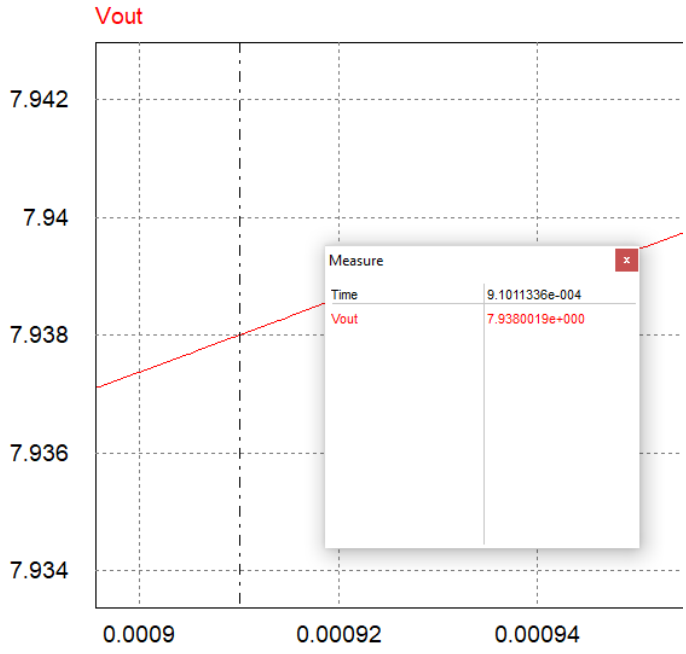


Figura 4.14: Tempo de alcance T do carregamento CV em malha aberta.

O segundo controlador, responsável pelo controlo da corrente limitada, foi obtido através de várias validações experimentais, chegando-se a um resultado de um ganho K de 0,1 e de uma constante de tempo T de 0,001.

De seguida, simulou-se o carregamento com controlo em tensão constante com corrente limitada, apresentado na figura 4.15. À saída do controlador PI da tensão é encontrado um

limitador, responsável por definir a corrente mínima e máxima de carregamento. Como a bateria termina o carregamento com uma corrente de 1,904A, este limitador é dimensionado com uma corrente máxima de 1,904A, sendo a corrente mínima de 0A. O gráfico 4.16 mostra a simulação da bateria em modo CV.

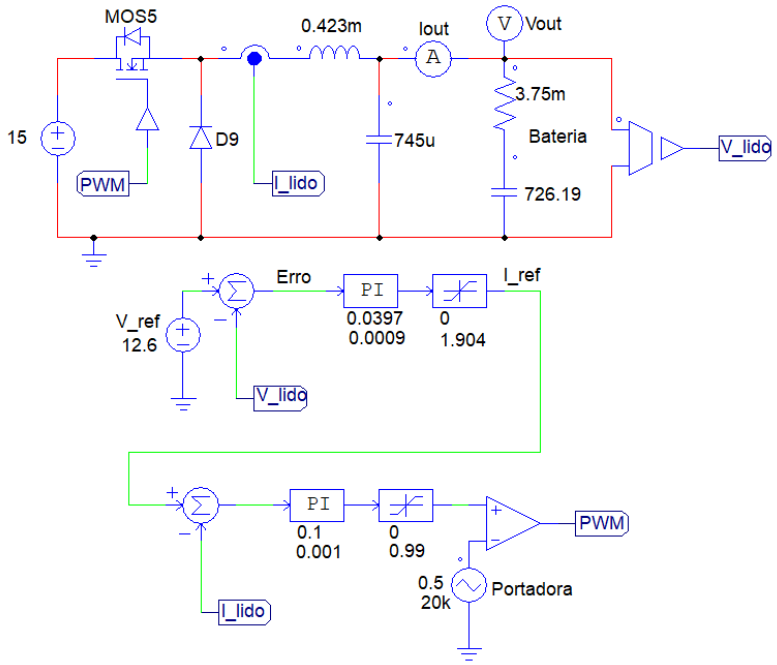


Figura 4.15: Carregamento com controlo em tensão constante com corrente limitada.

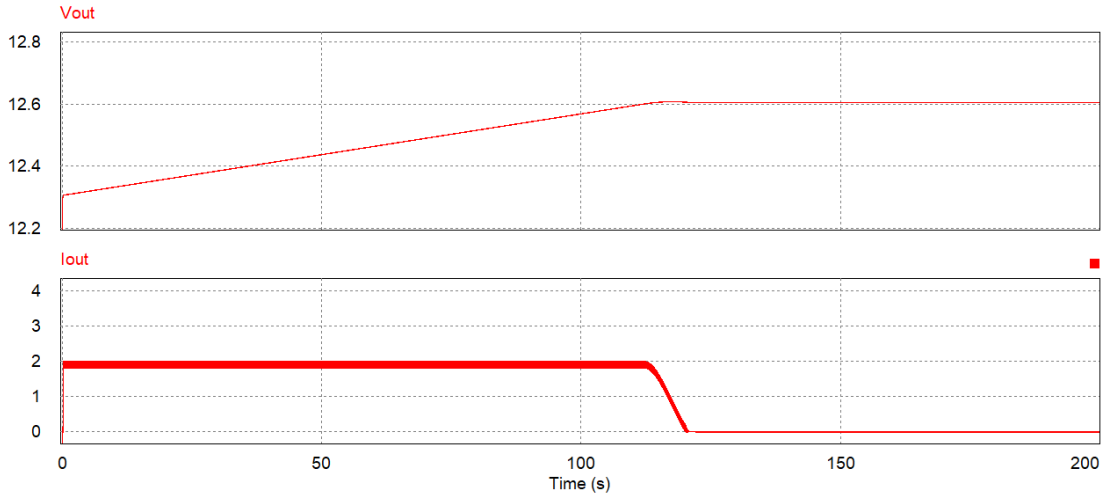


Figura 4.16: Gráfico do carregamento com controlo em tensão constante com corrente limitada.

Pela análise da figura conclui-se que a bateria é carregada com tensão constante a 12,6V com corrente limitada a 1,904A, terminando o seu carregamento assim que a tensão chega ao seu valor

máximo.

Como já referido, a bateria carrega em modo CC dos 7,95V até aos 12,3V, mudando para o modo CV até ao final do carregamento. Para haver uma troca de sistemas de controlo, é necessário implementar um novo controlador responsável por essa troca.

4.2.1.3 Controlador

O controlador cujo objetivo é alterar os modos de carregamento foi feito com um bloco C no software **Psim**, definindo-se como variável de entrada a leitura da tensão na bateria e como variáveis de saída valores binários correspondentes aos controlos do modo CC e CV. A figura 4.17 mostra o controlador com as suas entradas e saídas.

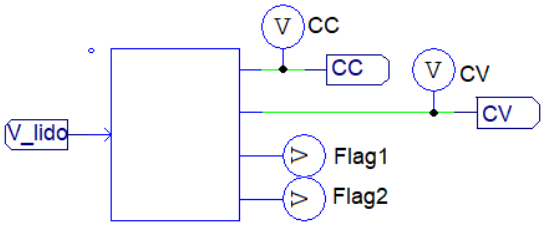


Figura 4.17: Controlador.

Se a tensão da bateria for menor que 12,3V o controlador ativa uma saída binária denominada de *CC*. Caso a bateria apresente uma tensão igual ou superior a 12,3V o controlador desativa a saída binária *CC* e ativa a saída binária *CV*. Deste modo, é efetuada uma comparação com portas lógicas nos PWMs dos sistemas de controlo, como posteriormente se descreverá, permitindo que seja ativado um modo de carregamento de cada vez.

A figura 4.18 mostra as variáveis definidas. Primeiramente definiu-se uma variável $x1$ do tipo *float* responsável por receber o valor da tensão da bateria. De seguida foram definidas quatro variáveis do tipo *int* pois apenas têm como objetivo saídas binárias. Duas dessas saídas, denominadas como *flags* são declaradas com valor 0, visto que é fundamental para o código que iniciem com valor zero.

```
#include <Stdlib.h>
#include <String.h>

 int g_nInputNodes=0;
 int g_nOutputNodes=0;

 int g_nStepCount=0;

float x1;
int x2=0, x3=0, y1, y2;
```

Figura 4.18: Variáveis do controlador.

```
 g_nStepCount++;


x1 = in[0];

if (x1 < 12.3 && x2 == 0)
{
y1=1;
y2=0;
}

if (x1 >= 12.3)
{
x2=1;
}

if (x2 == 1)
{
y1=0;
y2=1;
}

if (x1 >= 12.6)
{
x3 = 1;
}

if (x3 == 1)
{
y1=0;
y2=0;
}

out[0] = y1;
out[1] = y2;
out[2] = x2;
out[3] = x3;
```

Figura 4.19: Programação do controlador.

Por outro lado. a figura 4.19 mostra o código de controlo. Neste código, é definida a variável de entrada (tensão da bateria). De seguida, utiliza-se uma condição que compara a tensão da bateria com o valor referência (12,3V). Caso se verifique que a tensão da bateria é inferior a 12,3V e a *flag1* igual a zero, o controlador ativa a saída $y1$ que corresponde à saída binária do modo CC. Quando a tensão atinge os 12,3V (ou superior), o controlador muda o valor da *flag1*, desativando o modo CC. Assim que esta flag muda de valor para 1, é ativado o modo CV. Assim que a bateria alcance os 12,6V, o controlador ativa a *flag2*, que corresponde à desativação do modo CV, indicando que a bateria está carregada. Por fim, são definidas as variáveis de saída. A variável $y1$ corresponde ao modo CC, e a variável $y2$ ao modo CV, enquanto as variáveis $x2$ e $x3$ correspondem às *flags* de modo a facilitar-se a visualização das ativações e desativações dos sistemas de controlo nos gráficos que se apresentarão posteriormente.

Para este código, foi necessário criar duas *flags* devido ao *ripple* da tensão, pois o controlador comutaria várias vezes entre os modos de carregamento, não havendo uma troca definitiva.

Como o controlador apresenta como saída variáveis binárias, foi necessário usar portas lógicas nos sistemas de controlo, possibilitando a comparação do valor das saídas do controlador com os sinais PWM dos sistemas de controlo. A figura 4.20 mostra o carregador e os sistemas de controlo

com as portas lógicas nos sinais PWM.

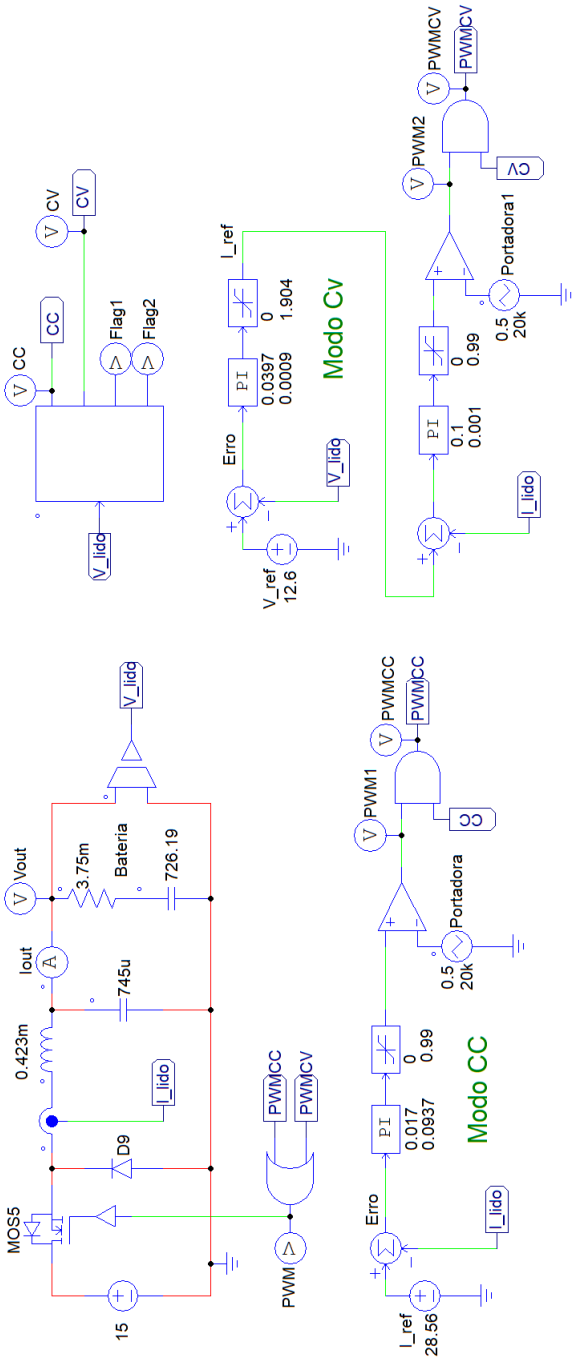


Figura 4.20: Carregador com controlo.

Em relação ao sistema de controlo de corrente constante (CC), há uma porta lógica *AND* responsável por ativar o sinal *PWMCC*. Esta porta lógica apenas é ativada quando as duas entradas são diferentes de 0. Assim, quando a bateria toma um valor inferior a 12,3V, o controlador ativa a saída binária *CC*. Deste modo, a porta lógica apresenta nas entradas o valor

binário 1 do controlador e o sinal $PWM1$, originando o sinal $PWMCC$. Por outro lado, quando o modo de carregamento é alterado, a saída binária CC passa a 0, passando a porta lógica a impedir a passagem do sinal $PWM1$. Simultaneamente, a saída binária CV é ativada e a porta lógica do sistema de controlo de tensão constante (CV) permite a passagem do sinal $PWM2$ responsável pelo controlo CV, originando o sinal $PWMCV$. Por fim, existe uma porta lógica OR no carregador que indica qual dos sinais PWM ativa o MOSFET. Se o $PWMCC$ proveniente do modo CC estiver ativo, encontrando-se o $PWMCV$ do modo CV desativado, a porta lógica permite a passagem do sinal $PWMCC$ para o MOSFET. Quando os sinais trocam, a porta lógica deixa passar o sinal $PWMCV$.

Através da simulação do carregador, foi obtido o gráfico 4.21, no qual é possível verificar um aumento da tensão da bateria com uma corrente constante de 28,56A (CC) até atingir 12,3V, demorando cerca de 100s. Seguidamente, a bateria é carregada lentamente com uma corrente de 1,904A (CV) terminando o seu carregamento aos 300s.

Tal como foi referido anteriormente no código do controlador, a ativação da flag1, implica a desativação do carregamento CC, permitindo o carregamento em modo CV. Por fim, quando a bateria atingir a sua tensão máxima, a *flag2* ativa-se, desligando o carregamento CV, como é visível na figura 4.22.

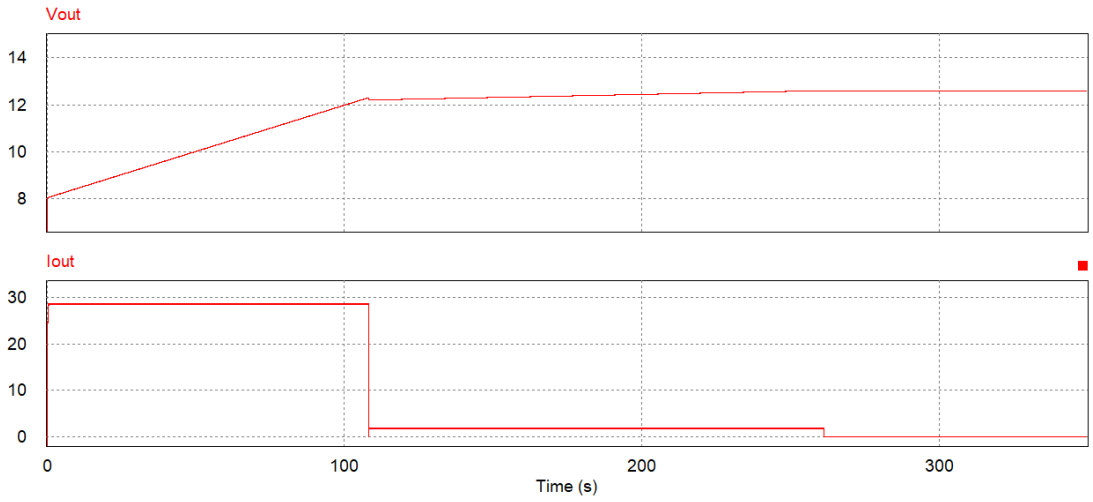


Figura 4.21: Carregamento com modo CC e CV.

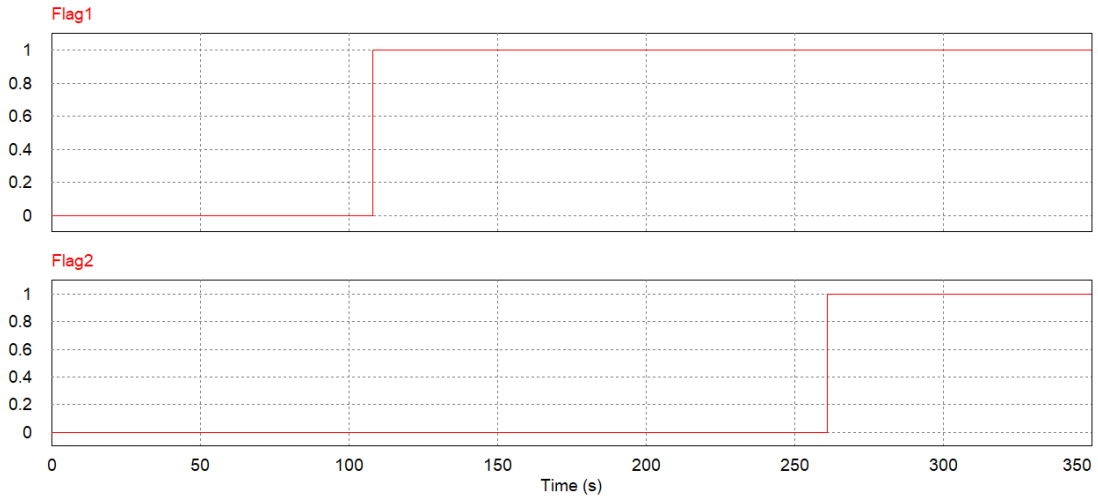


Figura 4.22: *Flags* do carregamento com modo CC e CV.

É de notar o ripple da corrente e da tensão durante o carregamento, correspondente à variação máxima de 0,2A e de 0,002V, calculados anteriormente na bobina e no condensador.

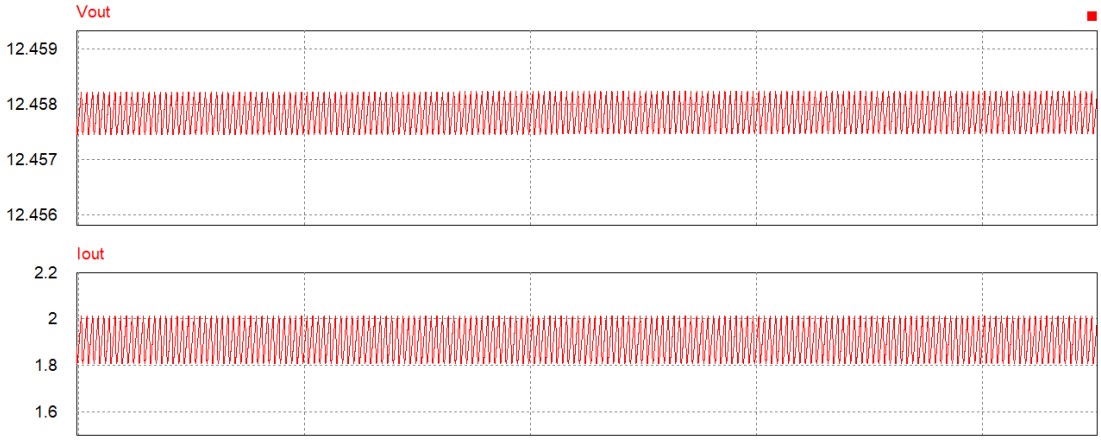


Figura 4.23: *Ripple* da corrente e da tensão.

Por último, a figura 4.24 mostra a desativação do sinal PWM do modo CC e a ativação do sinal PWM do modo CV devido às portas lógicas. No terceiro e quarto gráfico é possível observar um pequeno intervalo de tempo na ativação do sinal $PWMT$ após a ativação da porta lógica CV, o que influencia o sinal $PWM2$. Esse atraso na ativação prende-se com a corrente na bateria, pois como no carregamento CC a bateria carrega a 28,56A, no carregamento CV apenas recebe 1,904A, logo o sinal PWMT não se encontra em funcionamento pois necessita que a corrente diminua para o seu valor de referência (1,904A) limitado pelo limitador. Assim que a corrente se aproxima dos 1,904A, o $PWMT$ entra em funcionamento mantendo a corrente nesse valor. É devido a este curto espaço de tempo que origina uma pequena queda de tensão na bateria visível na figura 4.21.

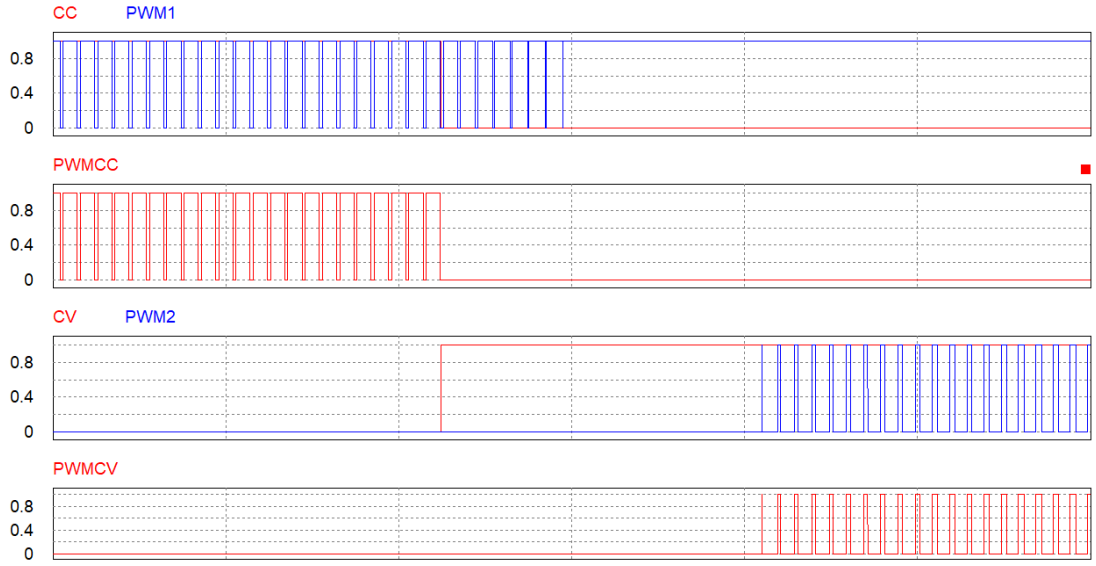


Figura 4.24: Ativação e desativação dos sinais PWM.

Na figura 4.25 é possível observar a troca do sinal PWM na porta lógica *OR* do MOSFET.

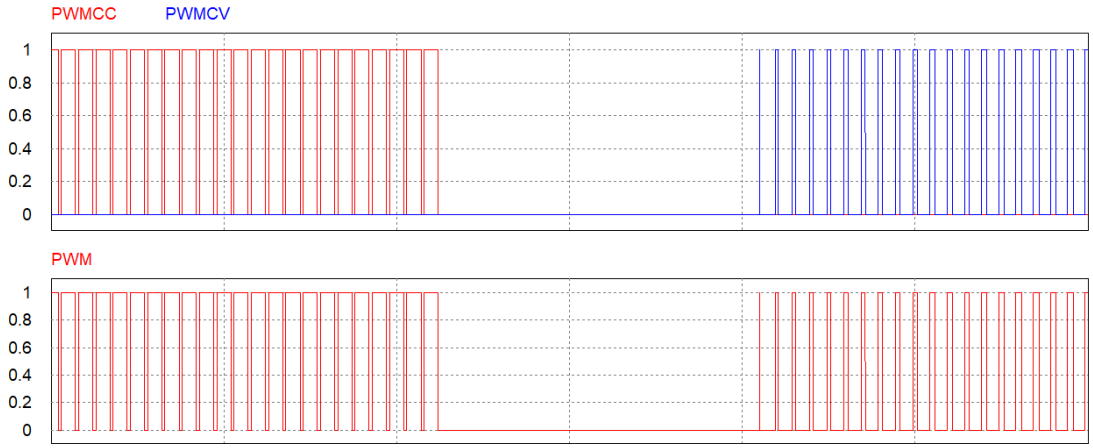


Figura 4.25: Troca de sinais na porta lógica *OR* do carregador.

4.2.2 Sistema de equilíbrio da bateria

Como referido no capítulo anterior, este circuito é composto por três condensadores responsáveis por equilibrar a carga das baterias. Como um condensador consegue carregar e descarregar muito rápido, o circuito consegue, dependendo da capacidade dos condensadores, equilibrar mais ou menos rápido as células. Por outro lado, a frequência de comutação dos MOSFETs, responsáveis pelo carregamento e descarregamento dos condensadores, também influencia no tempo de equilíbrio.

Para a simulação deste circuito, usou-se a bateria com a forma de três células em série, presente na figura 4.2. O valor das tensões das células é diferente, de modo a verificar-se que as células atingem o equilíbrio. Deste modo, a primeira célula encontra-se a 3,6V enquanto a segunda se encontra a 3,5V e a terceira a 3,75V. Nesta simulação, reduziu-se mil vezes a capacidade das células devido ao tempo das simulações.

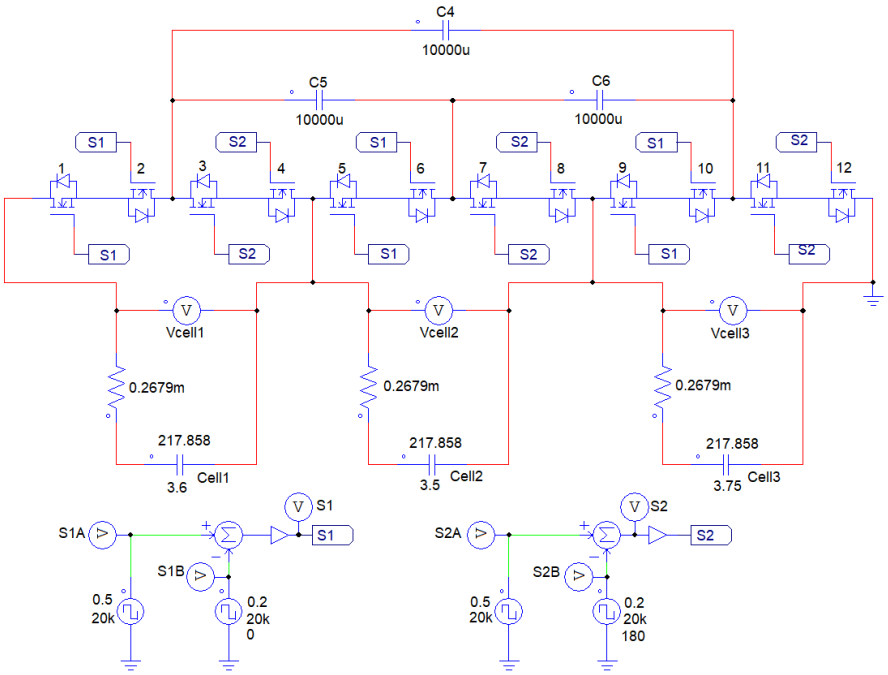


Figura 4.26: Sistema de equilíbrio da bateria com a bateria dimensionada

Inicialmente, procedeu-se à análise dos sinais de controlo dos MOSFETs, existindo dois sinais distintos responsáveis pelo controlo dos pares de MOSFETs: o sinal $S1$ e o sinal $S2$. O sinal $S1$ é originado pela diferença entre uma onda quadrada ($S1A$) de *Duty-Cycle* 0,5 e uma onda quadrada ($S1B$) de *Duty-Cycle* 0,2 (figura 4.27). Como ambas as ondas têm frequência 20kHz, o sinal $S1$ resultante é uma onda quadrada de frequência 20kHz e um *Duty-Cycle* de 0,3, como mostra a figura 4.28.

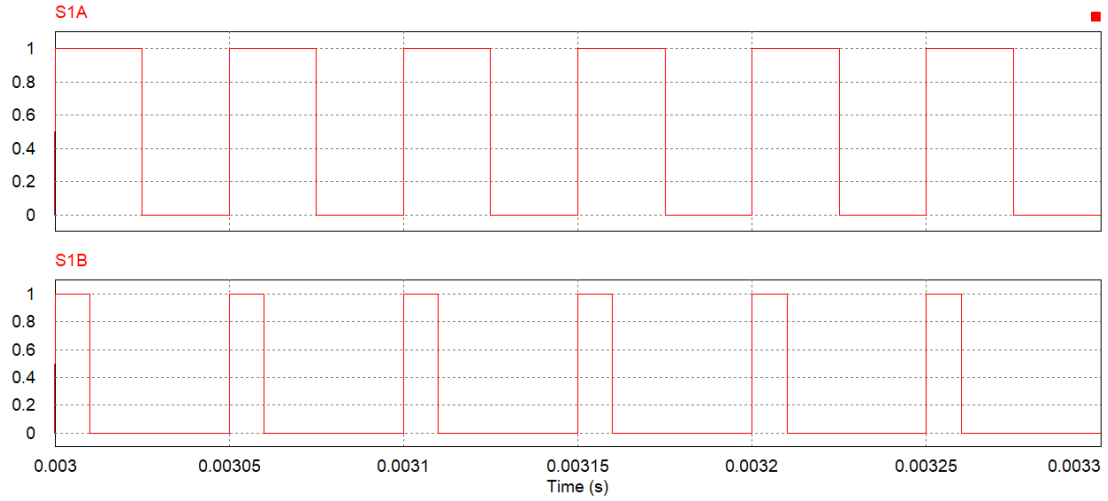


Figura 4.27: Sinais $S1A$ e $S1B$.

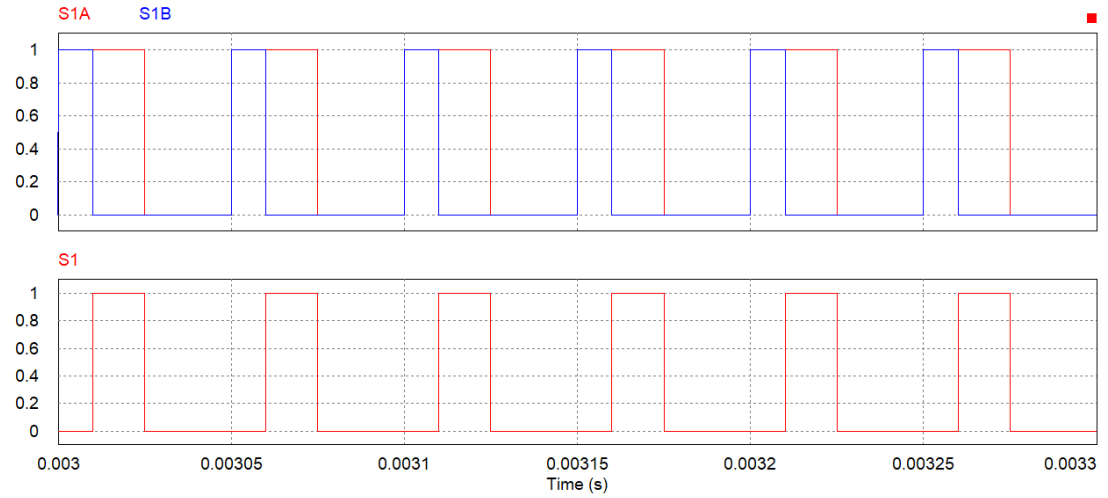


Figura 4.28: Sinal $S1$ resultante.

Após o dimensionamento do sinal ($S1$) de controlo de um par de MOSFETs, é necessário dimensionar um outro sinal ($S2$) para o outro par de MOSFETs. Deste modo, como se pretende um controlo alternado, o outro sinal irá ser ativado quando o sinal $S1$ se desativar. Para isso, o sinal $S2$ foi definido da mesma forma, com a excepção de ter um desfasamento de 180^{o}, permitindo que o sinal $S2$ apresente um atraso de 180^{o} (figuras 4.29 e 4.30) .

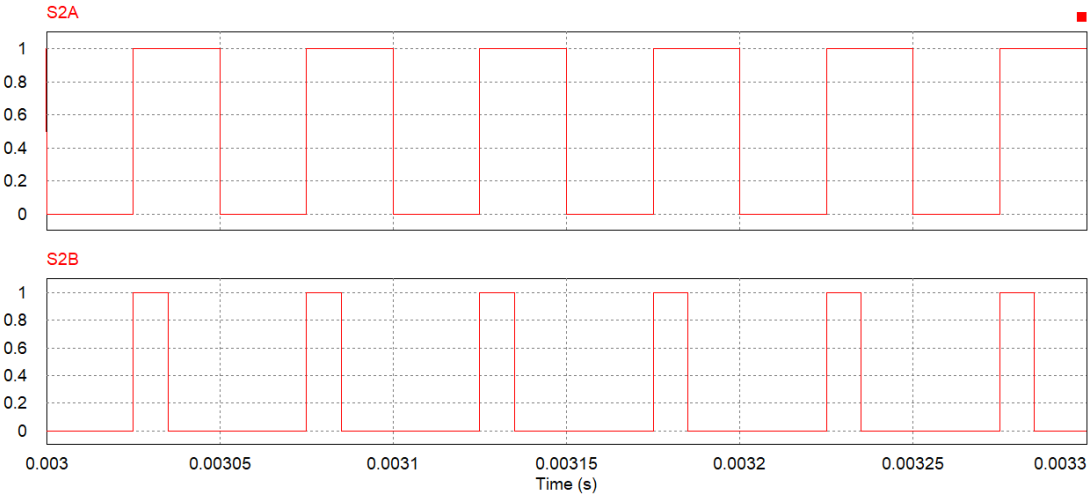


Figura 4.29: Sinais *S*2*A* e *S*2*B*.

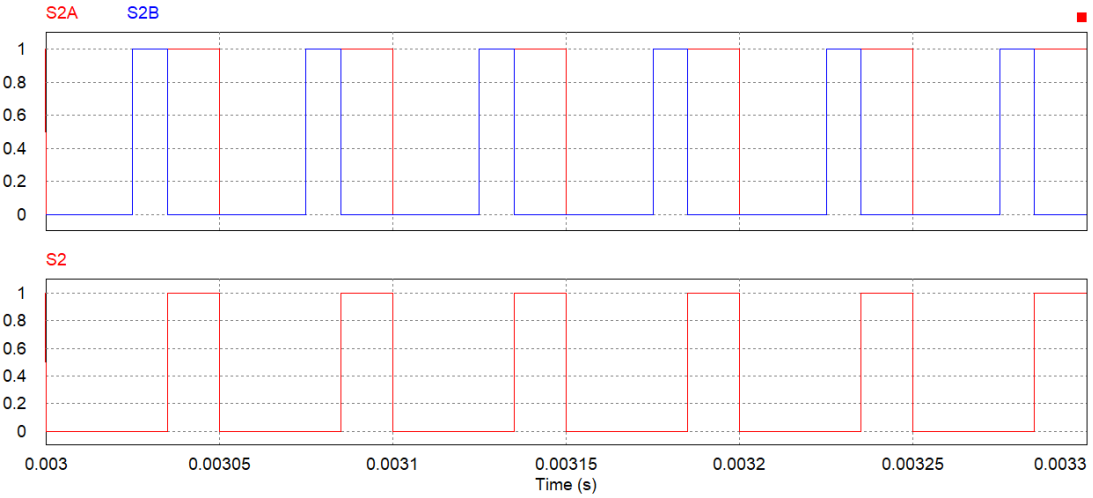


Figura 4.30: Sinal *S*2 resultante.

Deste modo, obtém-se dois sinais (*S*1 e *S*2) a comutarem alternadamente, como mostra a figura 4.31.

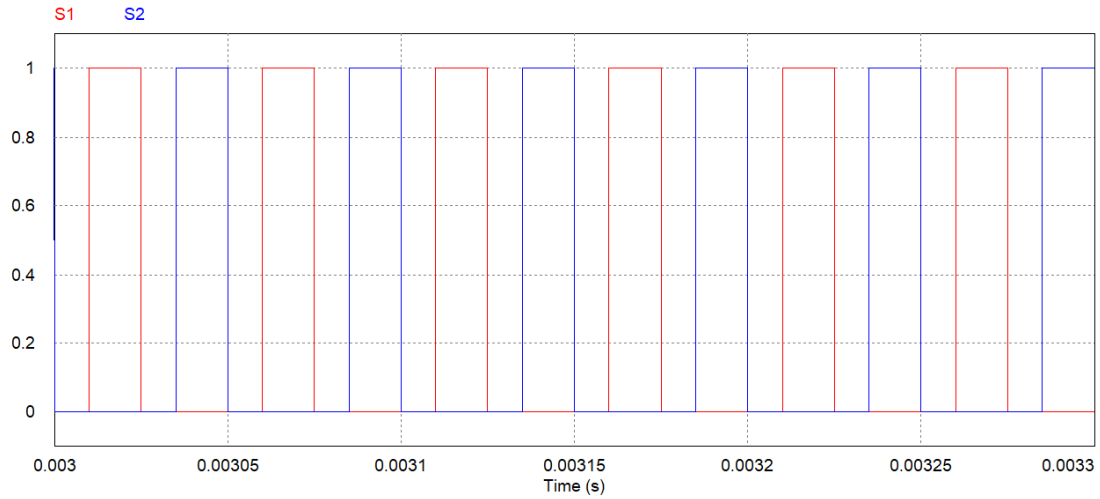


Figura 4.31: Sinais $S1$ e $S2$.

Após o dimensionamento do controlo dos MOSFETs, procedeu-se à simulação do circuito. Quando o sinal $S1$ está ativo, estando o sinal $S2$ desativado, os MOSFETs 1, 2, 5, 6, 9 e 10 são ativados, permitindo que a corrente flua entre eles. Assim, a célula $Cell1$ (equivalente a 28 células em paralelo da bateria) carrega o condensador $C5$ pelos MOSFETs 1, 2, 5 e 6. Por sua vez, a célula $Cell2$ carrega o condensador $C6$ pelos MOSFETs 5, 6, 9 e 10. Por último, o condensador $C4$ é carregado pelas células $Cell1$ e $Cell2$ através dos MOSFETs 1, 2, 9 e 10.

Quando os sinais de controlo trocam ($S1$ é desativado e $S2$ ativado), os MOSFETs 3, 4, 7, 8, 11 e 12 são ativados, fazendo com que o condensador $C5$ se descarregue para a célula $Cell2$ pelos MOSFETs 3, 4, 7 e 8. Por sua vez, o condensador $C6$ descarrega-se para a célula $Cell3$ pelos MOSFETs 7, 8, 11 e 12. Por fim, o condensador $C4$ descarrega-se para as células $Cell2$ e $Cell3$ pelos MOSFETs 3, 4, 11 e 12. Caso a célula $Cell3$ se encontre com tensão superior à do condensador $C6$, por exemplo, será esta célula a carregar o condensador, fazendo com que o condensador se descarregue para a célula $Cell2$ quando o sinal $S1$ estiver ativo.

O uso do condensador $C4$ permite que o circuito equilibre as células mais rapidamente, fazendo com que distribua melhor a carga pelo circuito.

A figura 4.32 mostra a comutação dos MOSFETs com o carregamento e o descarregamento das células. Quando $S1$ está ativo, as células $Cell1$ e $Cell2$ descarregam-se para os condensadores. A célula $Cell3$ mantém-se pois não tem conexão com os condensadores durante o sinal $S1$. Por sua vez, quando os sinais de controlo trocam, a célula $Cell3$ passa a ter ligação com os condensadores, descarregando-se. A célula $Cell2$ continua a ter ligação com os condensadores, pelo que se descarrega e carrega sempre.

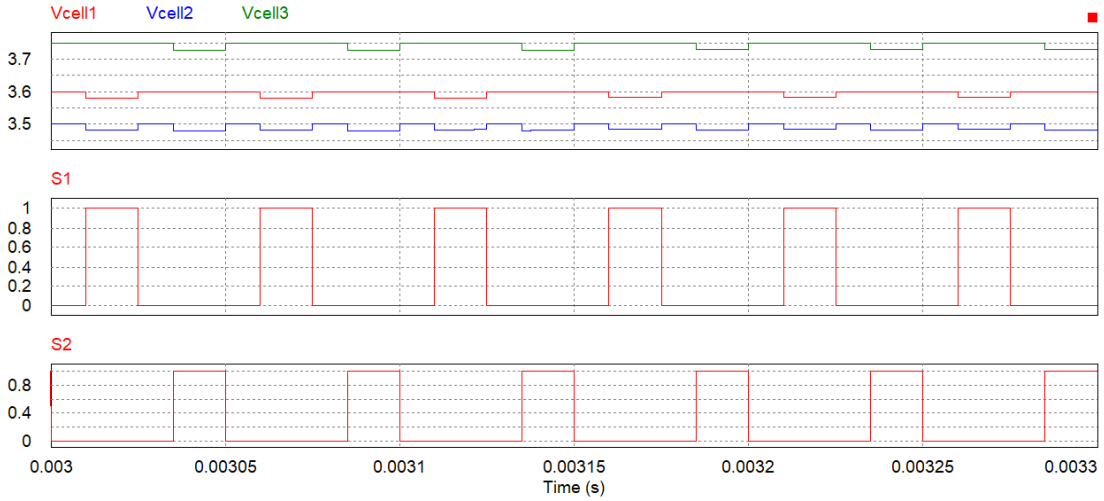


Figura 4.32: Sinais $S1$ e $S2$.

Por último, a figura 4.33 mostra o equilíbrio das células, demorando aproximadamente 250s a atingir a sua igualdade.

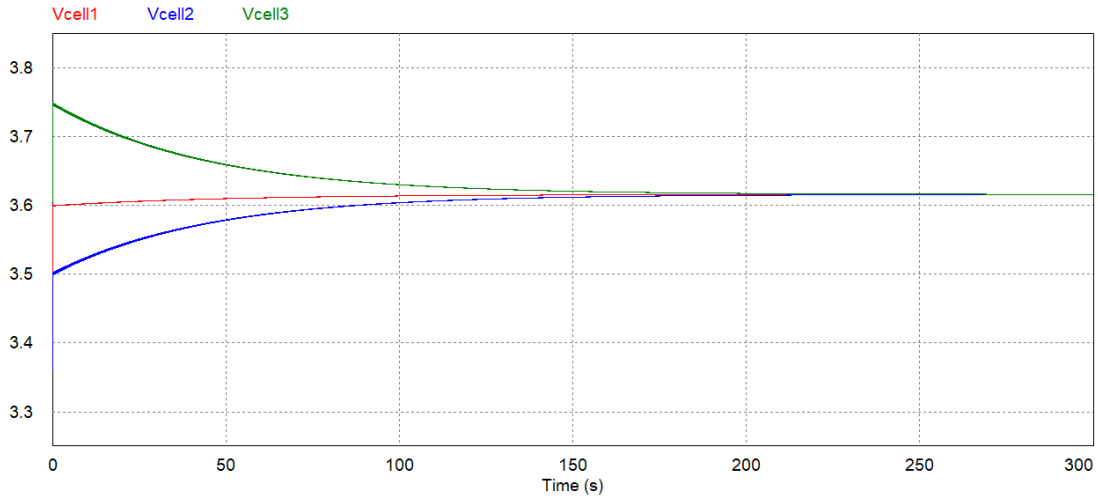


Figura 4.33: Sistema de equilíbrio das células dimensionado.

Como o sistema de equilíbrio ativo capacitivo pode ser usado durante o carregamento e o descarregamento das células, e até mesmo quando estas se encontram em repouso, ligou-se este circuito ao carregador CC/CC, como mostra a figura 4.34. O carregador tem, assim, como objetivo carregar as células e equilibra-las, em simultâneo. Devido ao elevado tempo de simulação, a capacidade das células foi reduzida mil vezes, tal como no sistema de equilíbrio. Os ganhos e as constantes de tempo dos controladores dos sistemas de controlo de carregamento foram recalculados pelo método anteriormente descrito para o modo CC e CV. As tensões das células $Cell1$, $Cell2$ e $Cell3$ apresentam os valores 2,98V, 2,99V e 3V, respetivamente.

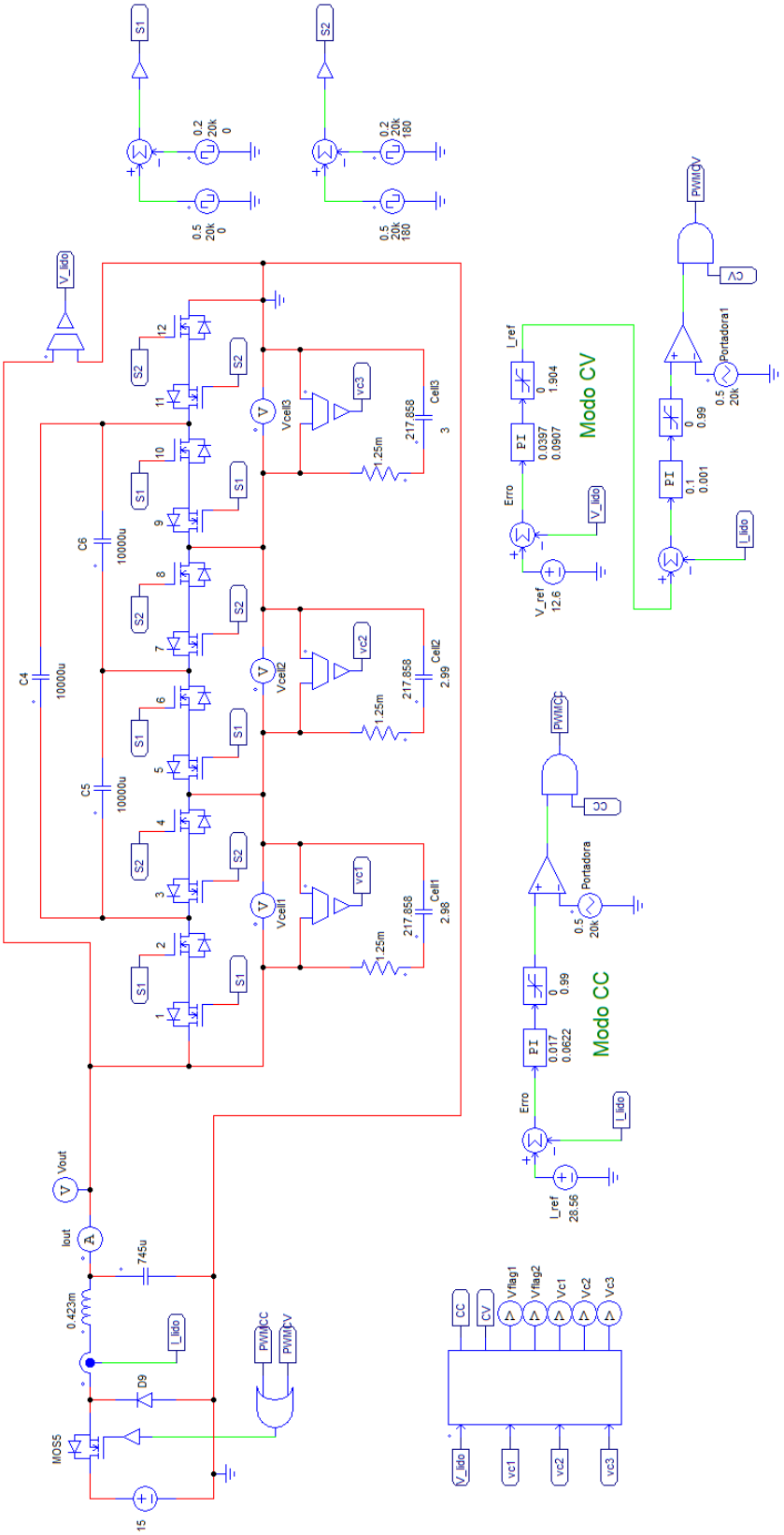


Figura 4.34: Carregador com controlo e sistema de equilíbrio.

Inicialmente, o carregador apenas carrega a bateria quando as suas células se encontram equilibradas. Por exemplo, para se atingir o valor máximo de tensão de carregamento (12,6V), estando uma das células 3,7V e as duas restantes a 4V, a célula que inicialmente possuía menor valor de tensão adquirirá uma tensão de 4V e as restantes de 4,3V. Para as células de lítio é extremamente perigoso exceder a sua tensão máxima pois, como já foi revisto na análise bibliográfica, pode ocorrer o risco de explosão. Deste modo, foi necessário equilibrar primeiro as células até que estas se encontrem com o mesmo valor de tensão. É de salientar que o sistema de equilíbrio continua a equilibrar as células mesmo durante o seu carregamento. Assim, foi adicionado ao controlador responsável por comutar os modos de carregamento (CC e CV) uma leitura da tensão das três células ($vc1$, $vc2$ e $vc3$). Estas variáveis ($vc1$, $vc2$ e $vc3$), do tipo *float*, são multiplicadas por 512, visto que os controladores funcionam à base de potências de 2. De seguida, o resultado da multiplicação é guardado numa variável do tipo *int*, pois apenas se pretende a parte inteira da multiplicação. Deste modo, quando as três variáveis tomarem valores iguais significa que as células estão equilibradas aproximadamente até à casa centesimal e o carregamento começa. Por exemplo, se uma célula se encontrar a 3,93V a sua multiplicação por 512 dará 2012. Se a outra célula estiver a 3,94V a sua multiplicação dará 2017. Assim, quando o valor das tensões destas se aproxima, a sua multiplicação também, significando que as células estão equilibradas e prontas para o carregamento.

```
#include <Stdlib.h>
#include <String.h>

 int g_nInputNodes=0;
 int g_nOutputNodes=0;

 int g_nStepCount=0;

float vo, vc1, vc2, vc3;
int flag1=0, flag2=0;
int  y1, y2, y7, y8, y9;
```

Figura 4.35: Novas variáveis do controlador.

A figura 4.35 mostra as variáveis introduzidas para este código, no qual é possível verificar quatro variáveis do tipo *float*, representando a tensão total da bateria e a tensão individual das células. As *flags* presentes são as mesmas que anteriormente, indicando os modos de carregamento (CC e CV). Por último, $y7$, $y8$ e $y9$ guardam o valor inteiro da multiplicação e $y1$ e $y2$ são responsáveis pela ativação dos sistemas de controlo de carregamento, sendo variáveis do tipo *int*. A figura 4.36 mostra o código do novo controlador, onde é possível observar que este começa por verificar o equilíbrio das células. Assim que $y7$, $y8$ e $y9$ forem iguais, o controlador inicia o carregamento. É de salientar que na condição em que se inicia o carregamento foi necessário acrescentar uma variável de tempo, sendo este maior que 2s, pois no inicio da simulação há uma pequena queda de tensão nas células devido à sua resistência interna, pelo que o controlador detetaria logo de inicio que as células estariam equilibradas.

```
 g_nStepCount++;

vo = in[0];
vc1 = in[1];
vc2 = in[2];
vc3 = in[3];

y7=-(vc1*512);
y8=-(vc2*512);
y9=-(vc3*512);

if (y7 == y8 && y8 == y9 && t>2)
{
if (vo < 12.3)
{
y1 = 1;
y2 = 0;
}

if (vo >= 12.3 && vo < 12.6)
{
flag1 = 1;
}

if (flag1 == 1 && flag2 == 0)
{
y1=0;
y2=1;
}

if (vo >= 12.6)
{
flag1 = 0;
flag2 = 1;
}

if (flag2 == 1 && flag1 == 0)
{
y1=0;
y2=0;
}
}

out[0] = y1;
out[1] = y2;
out[2] = flag1;
out[3] = flag2;
out[4] = y7;
out[5] = y8;
out[6] = y9;
```

Figura 4.36: Nova programação do controlador.

Finalmente, a imagem 4.37 mostra o resultado da simulação, verificando-se que o carregamento apenas se inicia após as células estarem equilibradas. No gráfico 4.38 observa-se a tensão das células assim como a sua multiplicação no controlador, dando origem ao carregamento ao fim de 110s após o equilíbrio.

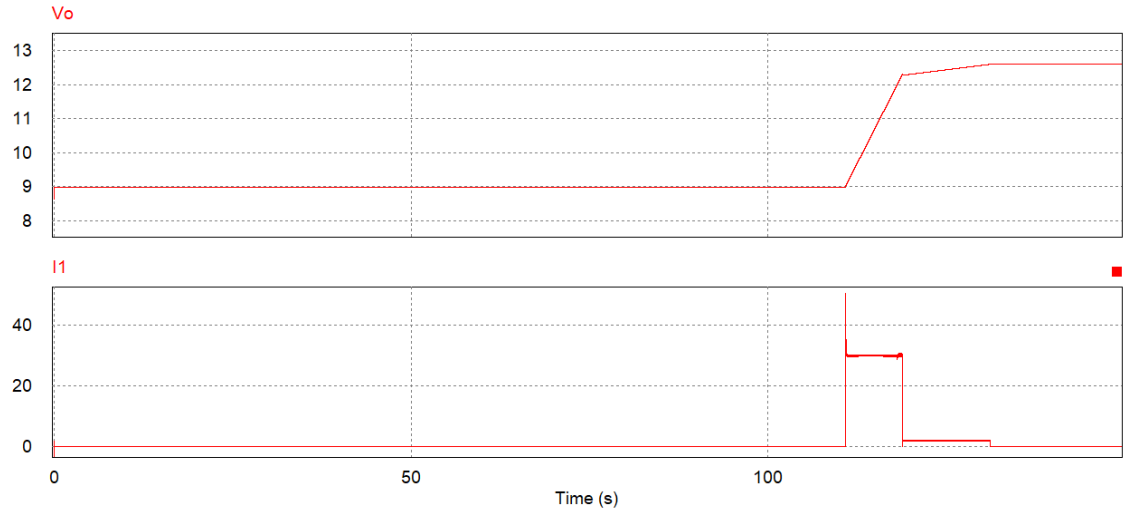


Figura 4.37: Carregamento com modo CC e CV e equilíbrio das células.

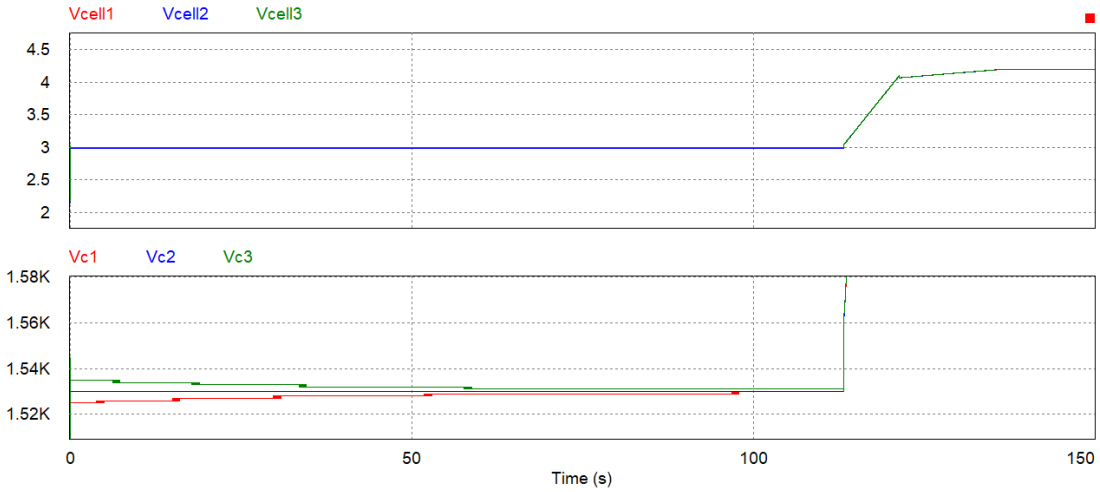


Figura 4.38: Tensão das células na bateria e o equivalente no controlador.

4.2.3 Conversor CA/CC

Quando a UPS recebe energia pela rede elétrica, é necessário transformar o seu valor eficaz, 230V CA, para 15V CC, tensão imposta à entrada do carregador. Deste modo, construiu-se o circuito mostrado na figura .

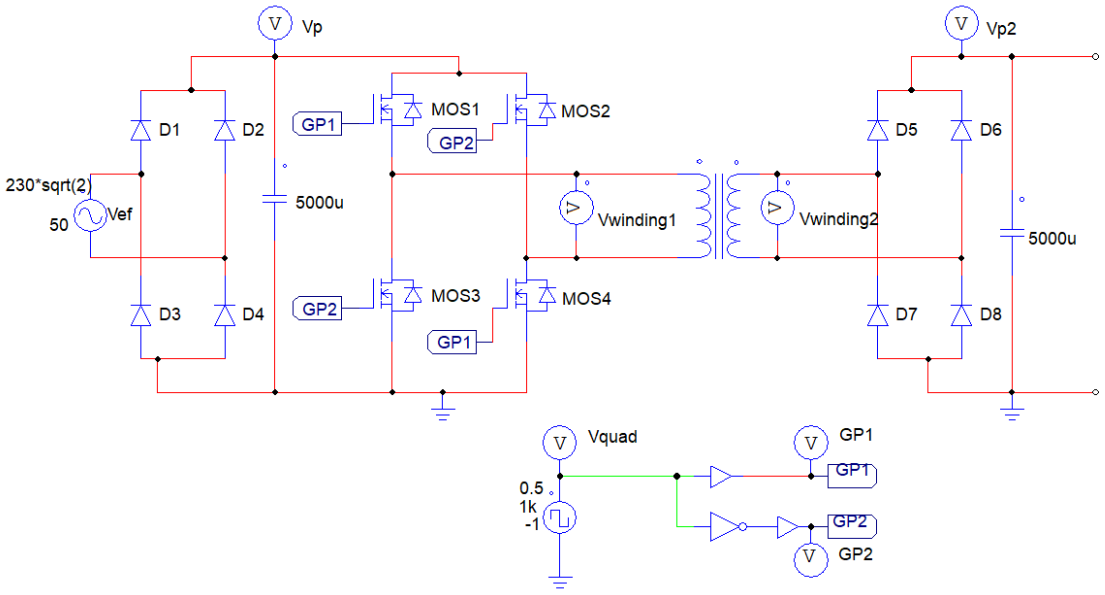


Figura 4.39: Retificador de ponte completa do conversor CA/CC proposto.

Inicialmente, a energia proveniente da rede elétrica (230V de valor eficaz com uma frequência de 50Hz) flui por uma ponte de díodos carregando o barramento CC com uma tensão de pico igual à da rede elétrica, visível na figura 4.40. Após o barramento, encontra-se uma ponta de MOSFETs que, comutados a alta frequência, converte a corrente contínua em alternada para o transformador, de modo a reduzir o seu tamanho.

O gráfico 4.41 mostra o sinal de controlo dos MOSFETs. A onda que origina a comutação dos MOSFETs é uma onda quadrada de frequência 1kHz, tendo um *Duty-Cycle* de 0,5. Esta onda varia de -1 a 1 pois desta forma é possível obter um controlo comutado entre os MOSFETs devido à saída negada (*NAND*) visível na figura 4.39.

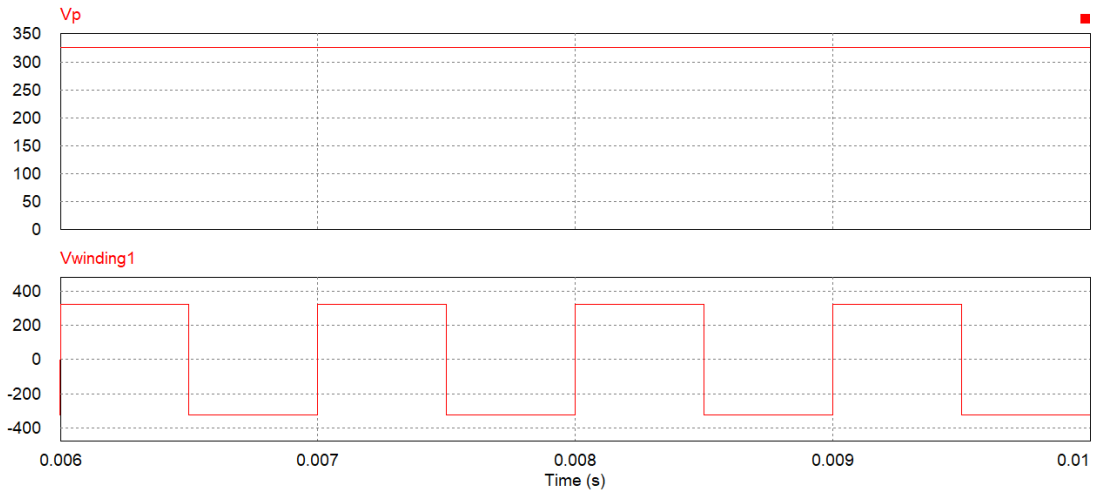


Figura 4.40: Tensão de pico no primeiro barramento CC e após a ponte de MOSFETs.

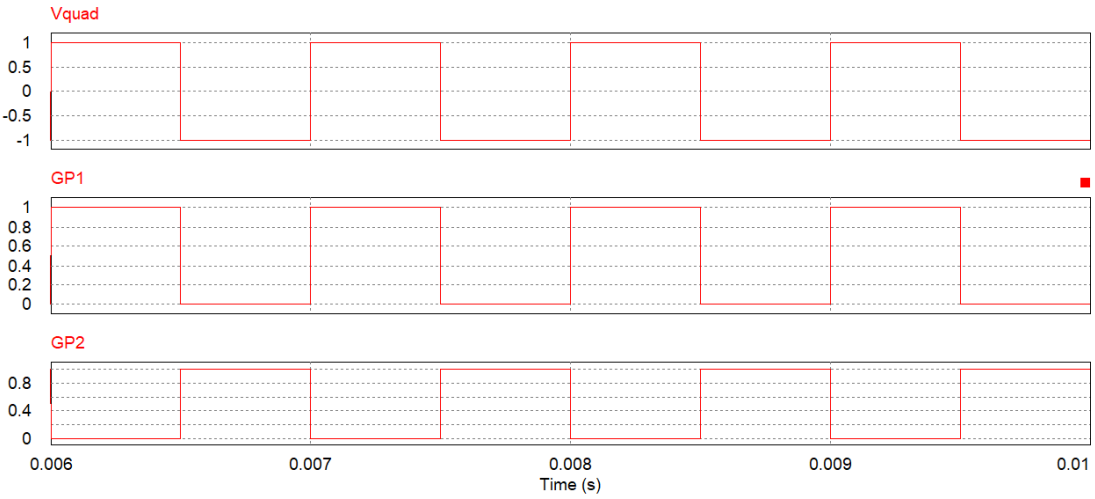


Figura 4.41: Sinal de controlo dos MOSFETs do conversor CA/CC (retificador).

Como se pretende uma saída no transformador de 15V, é necessário baixar a tensão de entrada do conversor CA/CC. Assim, sendo a tensão de pico de entrada do transformador de cerca de 325V (figura 4.39), dimensionou-se as espiras do enrolamento primário do transformador para 325. Já a sua saída, apresenta 15 espiras. Os restantes valores para o transformador foram estimados de modo a se aproximar o transformador de um transformador ideal (4.42. Assim, obteve-se à saída do transformador uma tensão alternada de 15V, como mostra a figura 4.43.

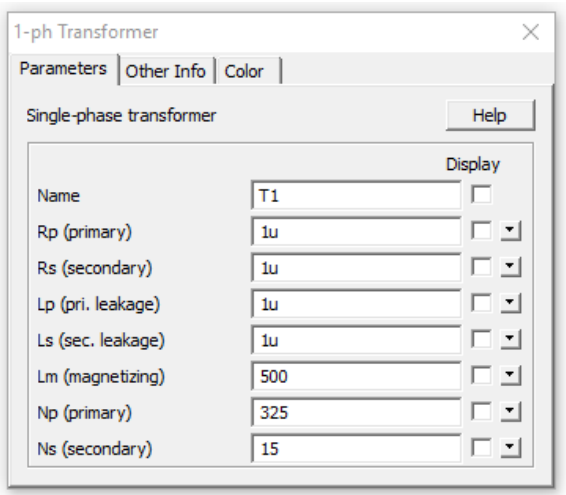


Figura 4.42: Transformador de alta frequência do conversor CA/CC (retificador).

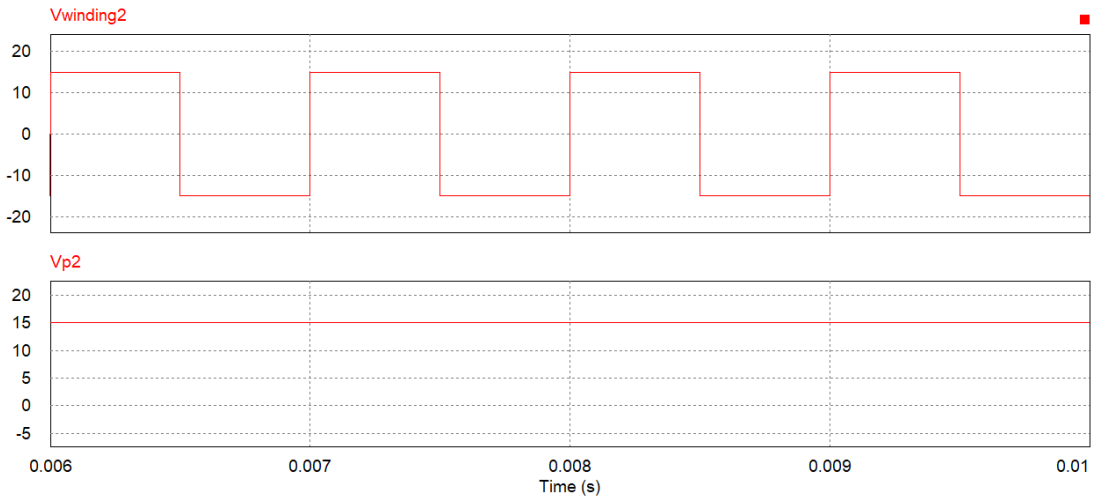


Figura 4.43: Tensão após o transformador e no segundo barramento (CC).

Após o transformador, é necessário obter corrente contínua de modo a entrar no carregador. Para isso, utilizou-se uma ponte de díodos de modo a converter a corrente. A figura 4.43 mostra também a tensão final ($Vp2$) do retificador no segundo barramento CC.

Após o dimensionamento do retificador, ligou-se este à entrada do carregador, como mostra a figura 4.45. De seguida, procedeu-se à sua simulação, presente na figura . Pela análise desta, verifica-se que o carregamento é igual ao da simulação com entrada de 15V proveniente de uma fonte contínua. Por outro lado, observa-se também que o valor de pico à entrada do carregador ($Vp2$) apresenta continuamente 15V, demonstrando-se que o retificador se encontra em correto funcionamento.

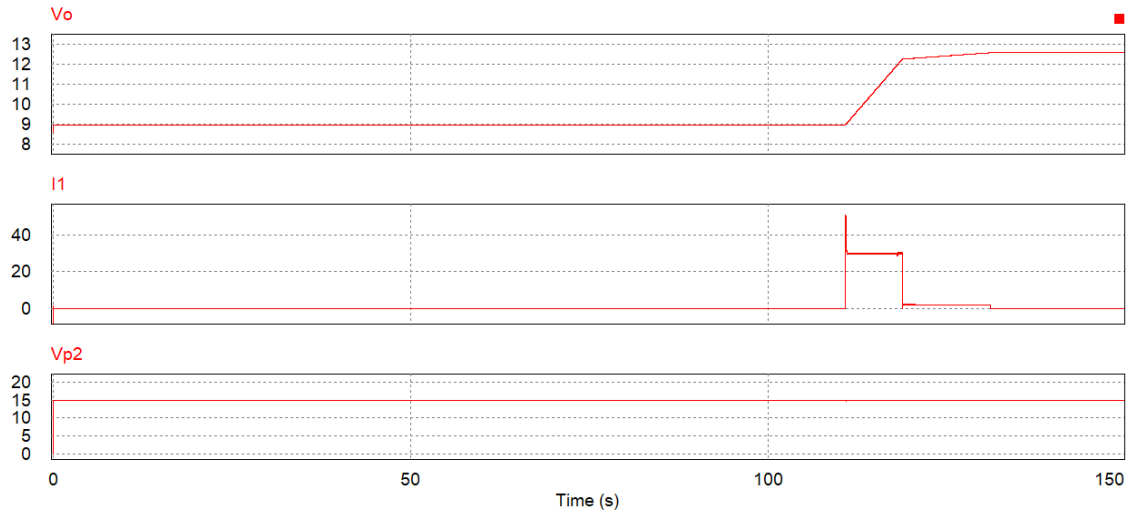


Figura 4.44: Carregamento com modo CC e CV equilíbrio das células com conversor CA/CC.

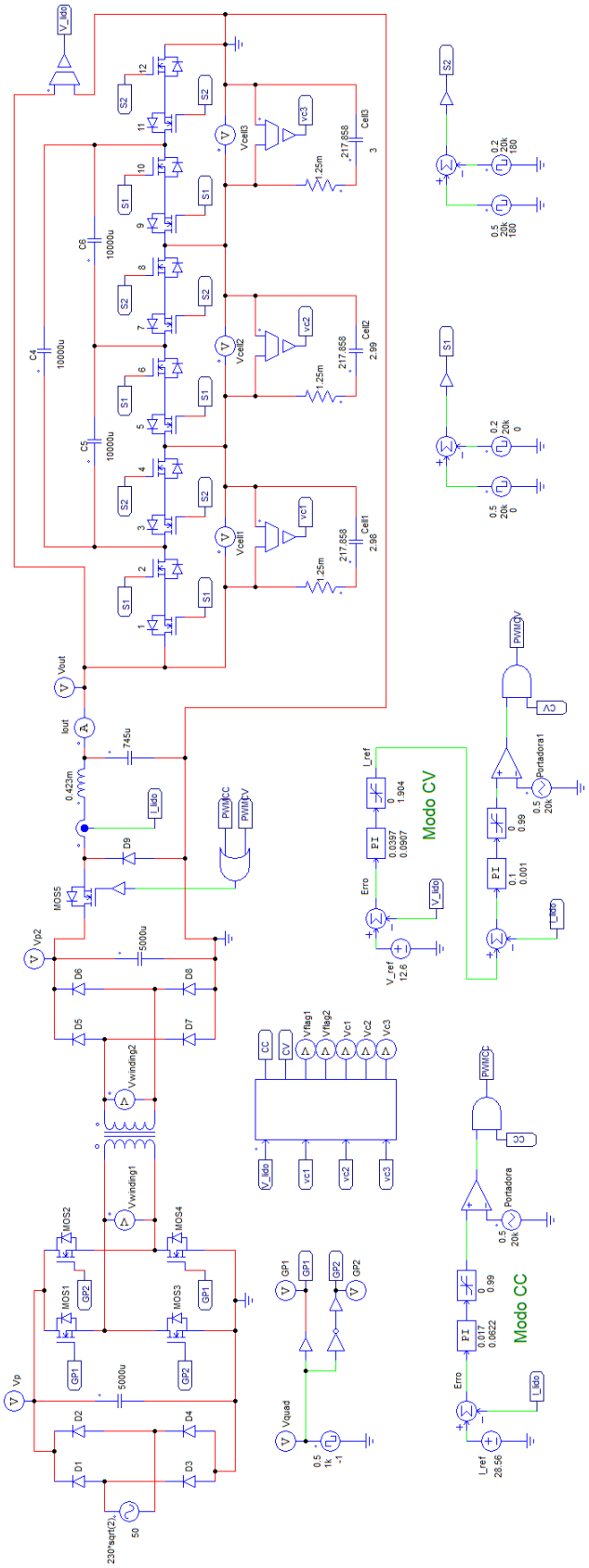


Figura 4.45: Carregador com equilíbrio e retificador.

4.2.4 Conversor CC/CC (Abaixador)

Como referido no capítulo anterior, se o utilizador pretender ligar a UPS Portátil a uma bateria de 24V que equipa os camiões, também o poderá fazer. Deste modo, foi dimensionado um conversor abaixador de 24V para 15V de modo a ligar ao carregador, resultando num *Duty-Cycle* de 0,625. Como se pretende uma tensão constante de saída, foi necessário acrescentar um sistema de controlo em tensão, dimensionando-se novamente um controlador PI.

Em primeiro lugar, para este circuito definiu-se um *ripple* na corrente de 0,3A, pelo que o dimensionamento da bobina foi feito pelas equações 3.4 e 4.5, resultando numa bobina de 938μH. Já para o condensador, foi definido um *ripple* na tensão de 0,2V, tendo sido dimensionado pela equação 3.6, obtendo-se um condensador de 9,37μF.

Como o carregador tem a sua potência máxima quando carrega a bateria com controlo em corrente constante (12,3V a 28,56A), foi calculada a sua potência pela equação 3.1, sendo de aproximadamente 370W. Assim, o conversor abaixador de 24V tem como objetivo fornecer uma saída com um mínimo de 370W com uma tensão contínua de 15V. Deste modo, para se calcular o ganho e a constante de tempo do controlador PI do sistema de controlo, simulou-se o conversor em malha aberta com uma carga de 0,6Ω, obtendo-se uma potência máxima de 375W. As figuras 4.46 e 4.47 mostram o conversor abaixador com uma carga de teste em malha aberta e a sua simulação.

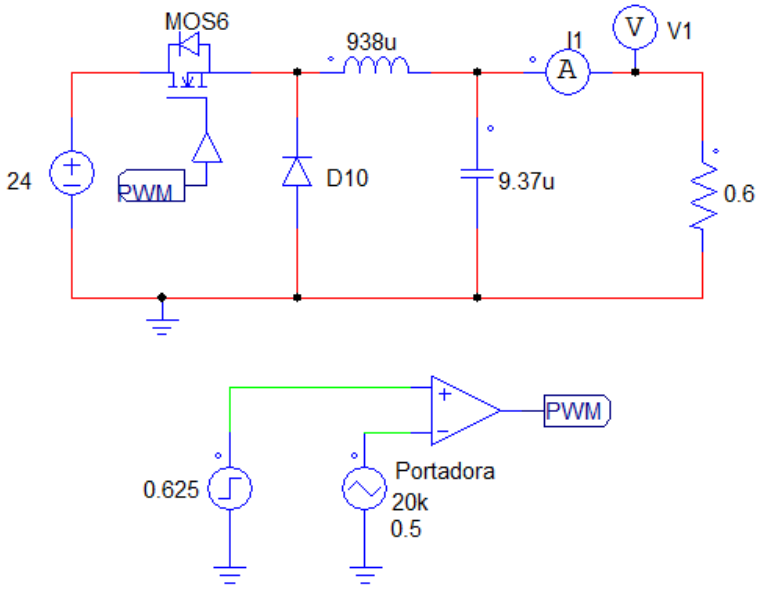


Figura 4.46: Conversor CC/CC Abaixador 24V - 15V em malha aberta.

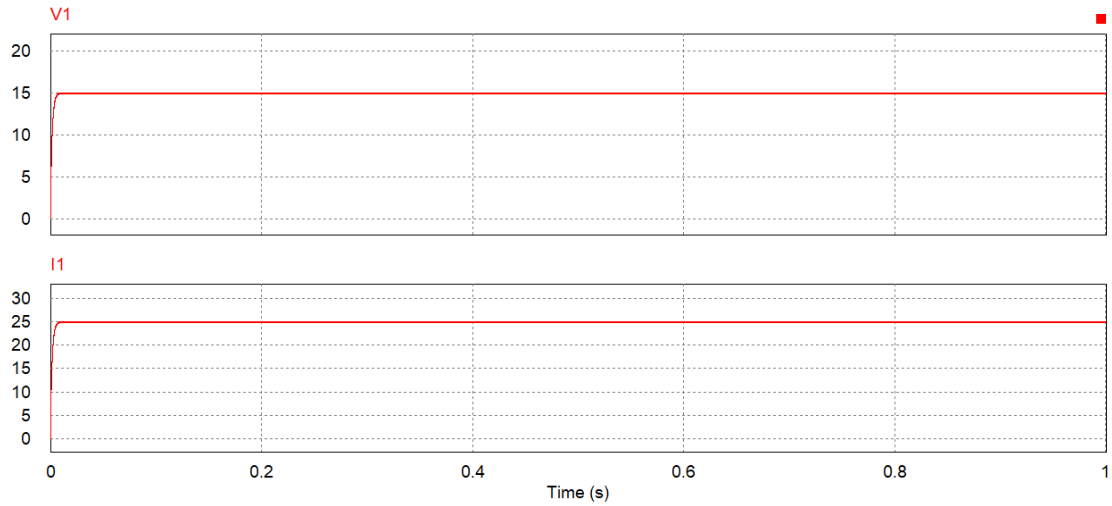


Figura 4.47: Simulação do conversor CC/CC Abaixador 24V - 15V em malha aberta.

Pela simulação da figura 4.47, é possível verificar que a tensão atenua para o valor pretendido (K_o = 15V), pelo que se calculou o ganho do controlador PI através da equação 4.7, sendo este igual a 0,033. Por sua vez, a constante de tempo é igual a 0,0016 (equação 4.9,) pois é o tempo que se demora a atingir 63%K_o. Já o limitador, foi limitado entre 0 e 0,99 para, mais uma vez, evitar variações bruscas. A figura mostra o conversor abaixador com o seu sistema de controlo.

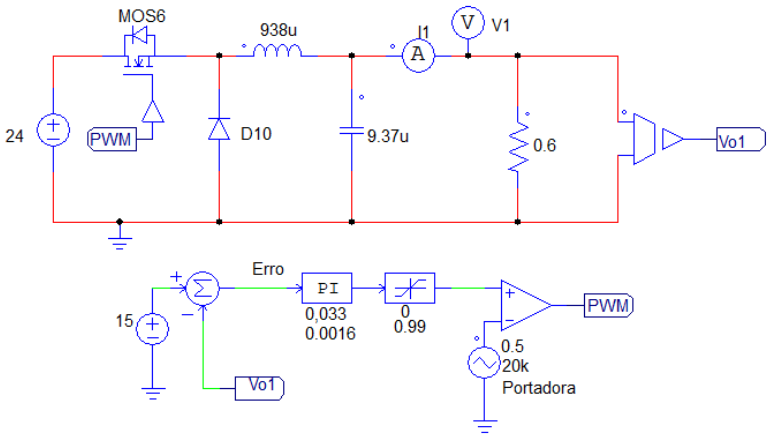


Figura 4.48: Conversor CC/CC Abaixador 24V - 15V em malha fechada.

De seguida, procedeu-se à ligação entre o conversor abaixador e o carregador, como mostra a figura 4.49 e simulou-se o carregamento (figura 4.50). Entre os dois conversores abaixadores foi necessário adicionar um condensador de acoplamento. Este condensador, visível na figura 4.49, foi dimensionado com uma capacidade de 40mF pois devido à potência do carregador para carregar a bateria, era necessário um condensador de grande capacidade. Contudo, devido a este condensador, o ganho do controlador teve de ser alterado pelo que, através de várias validações

experimentais, calculou-se um ganho K de 0,0001. Devido ao tempo de simulação, a capacidade da bateria foi reduzida cem vezes e não se teve em conta o sistema de equilíbrio, pois o objetivo é apenas o carregamento da bateria.

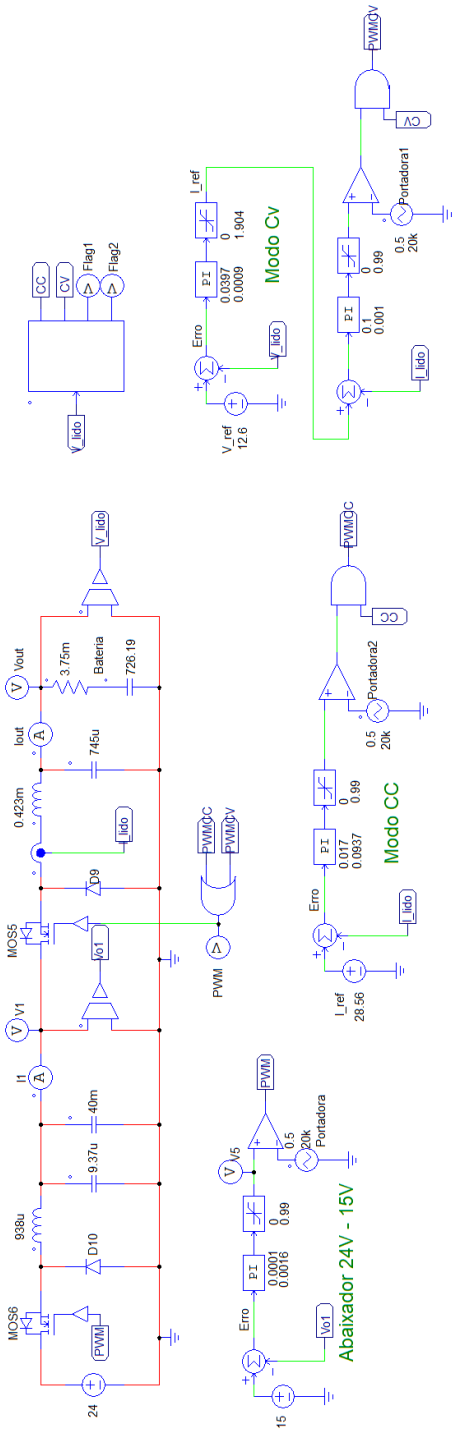


Figura 4.49: Carregamento por conversor abaixador 24V - 15V.

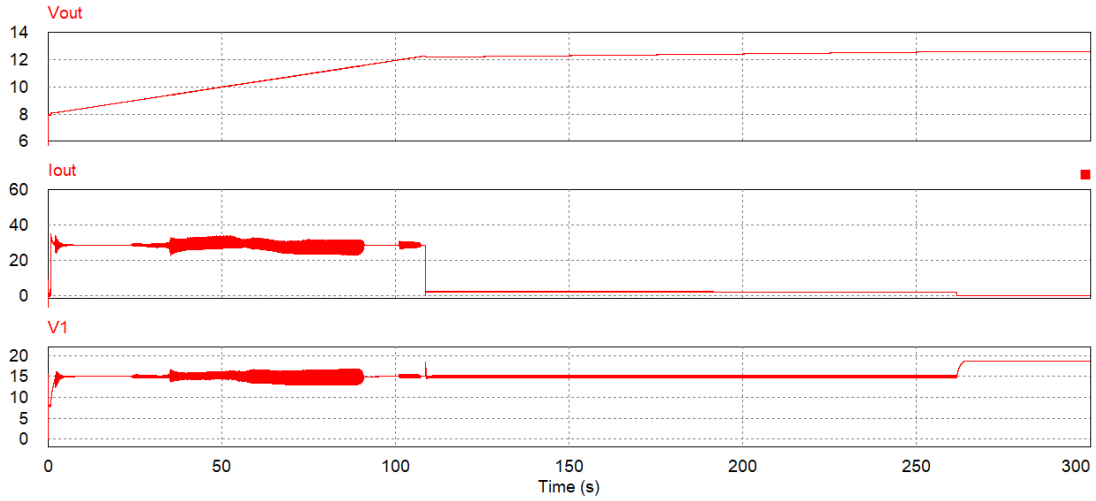


Figura 4.50: Simulação do carregamento por conversor abaixador 24V - 15V.

Como se verifica no gráfico 4.49, o conversor consegue fornecer os 15V necessários para o carregador, carregando, assim, a bateria.

4.2.5 Conversor CC/CC (Elevador)

Por último, se o utilizador pretender carregar a UPS por uma saída de isqueiro de 12V de um automóvel, também o poderá fazer. Contudo, sendo esta saída limitada por um fusível, que varia entre 15A a 20A consoante o automóvel, a potência máxima que a UPS poderá extrair do veículo para carregar a bateria será de 180W a 240W. Para tornar a UPS acessível a todos os automóveis, foi dimensionada para um carregamento de 180W. Deste modo, a bateria apenas poderá carregar com uma corrente máxima de 14,60A, pelo que cada célula da bateria irá carregar a uma corrente de 0,52A. Embora esta corrente seja mais baixa da que o fabricante recomenda para carregar, não haverá qualquer problema, resultando apenas num carregamento mais lento. À semelhança do conversor anterior, este também é controlado por um sistema de controlo em tensão (15V). Contudo, é necessário baixar a corrente de carregamento das células, pelo que o sistema de controlo em corrente constante do carregador necessita de diminuir o seu valor de referência de 28,56A para 14,6A.

Assim, foi dimensionado o conversor CC/CC elevador como mostra a figura 4.51. Como se pretende uma saída de 15V, o *Duty-Cycle* é de 0,2. Assim, a bobina foi calculada para um ripple máximo de 1A, obtendo-se uma indutância de 600μH. Já o condensador foi dimensionado para um ripple máximo de tensão de 0,01V.

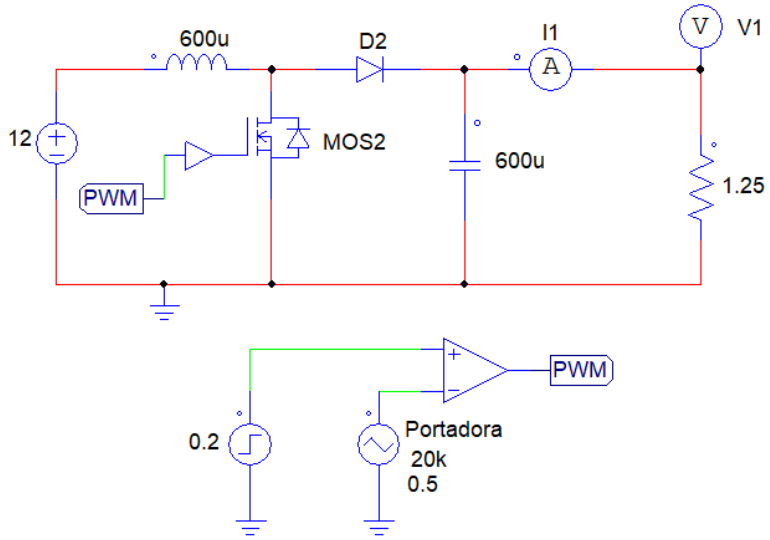


Figura 4.51: Conversor CC/CC Elevador 12V - 15V em malha aberta.

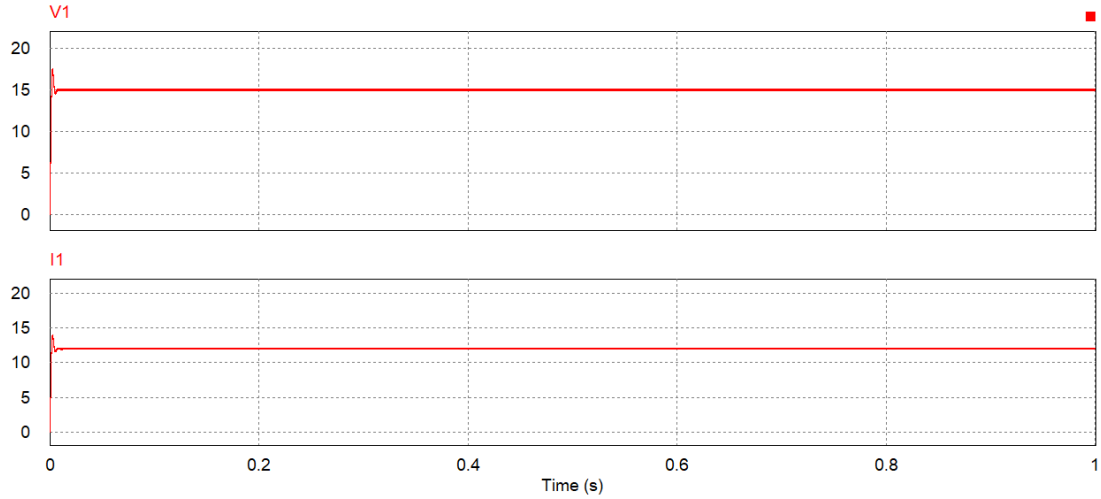


Figura 4.52: Simulação do conversor CC/CC Elevador 12V - 15V em malha aberta.

Este conversor foi simulado em malha aberta com uma carga de 1,25Ω (180W), tendo sido obtido o gráfico 4.52 da tensão e da corrente de saída. Através dos gráficos 4.52, calculou-se o ganho e a constante de tempo do controlador PI do sistema de controlo, através das equações 4.7 e 4.9, obtendo-se um ganho de 0,033 e uma constante de tempo de 0,00114 (figura .

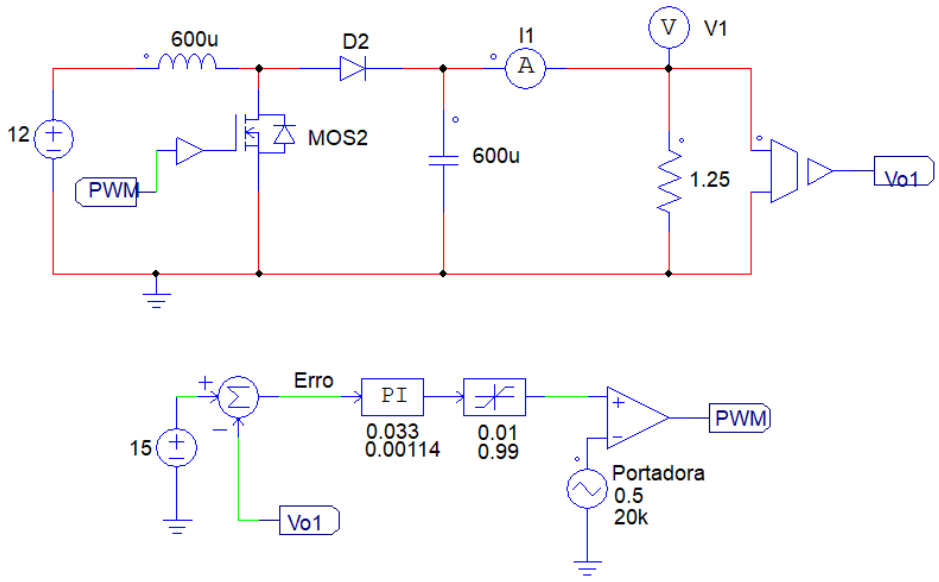


Figura 4.53: Conversor CC/CC Elevador 12V - 15V em malha fechada.

De seguida, procedeu-se à simulação deste conversor elevador juntamente com o carregamento das baterias, como mostra a figura 4.55 e 4.54. Tal como no conversor abaixador 24V-15V anterior, foi necessário adicionar um condensador de acoplamento entre os dois conversores. Deste modo, dimensionou-se um condensador de capacidade 30mF. Por outro lado, devido ao condensador, o ganho do controlador PI foi alterado para 0,0005. É de notar que o valor de referência do sistema de controlo em corrente constante do carregador foi alterado para 14,6A. Como este carregamento é mais lento, a capacidade da bateria foi reduzida aproximadamente mil vezes. A figura 4.54 mostra a tensão e a corrente da bateria durante o carregamento, assim como a tensão de saída do conversor elevador.

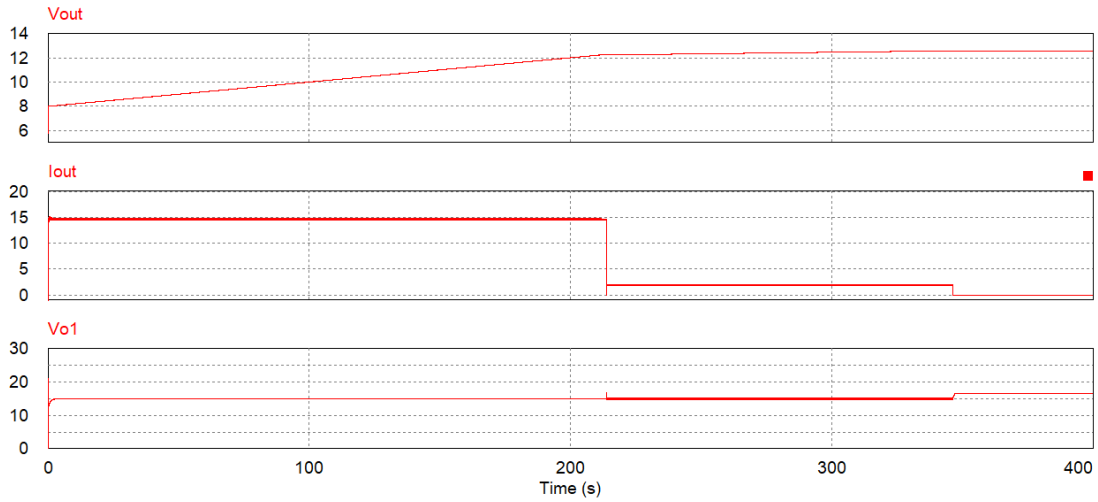


Figura 4.54: Simulação do carregamento por conversor elevador 12V - 15V.

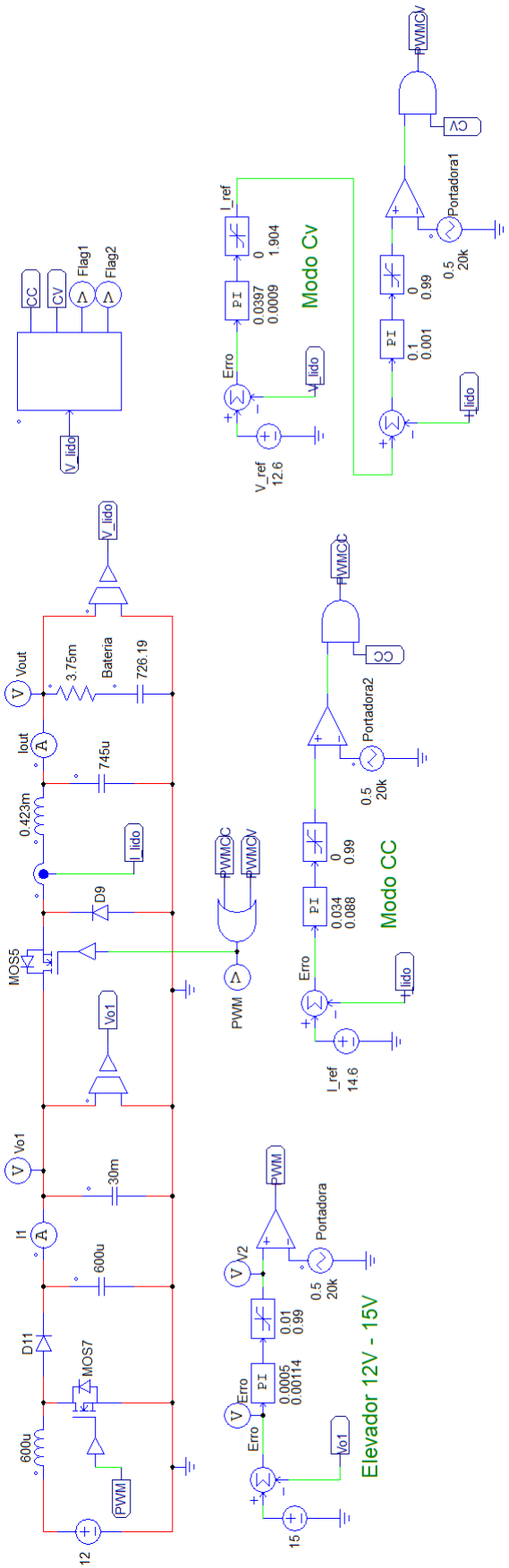


Figura 4.55: Carregamento por conversor elevador 12V - 15V.

4.3 Sistema de Descarregamento de Energia

Após a simulação do sistema de carregamento de energia, procedeu-se à simulação das saídas da UPS disponíveis para o utilizador. Neste sentido, simulou-se o inversor CC/CA 230V 2kW e a saída de 5V CC 10W. Já a saída de 12V é ligada diretamente à bateria, sendo limitada por um fusível de modo a proteger a bateria em caso de elevada potência de saída.

4.3.1 Conversor CC/CA (Inversor)

Como referido na secção 3.3.2, é necessário elevar a tensão da bateria para 230V de valor eficaz. Como um conversor CC/CC elevador apenas consegue elevar a tensão num máximo de três vezes (secção 2.3.3.1), recorreu-se a um transformador. Contudo, para reduzir o seu tamanho, utilizou-se um transformador de alta frequência, igual ao do retificador CA/CC. A imagem 4.56 mostra a implementação do transformador de alta-frequência responsável pelo aumento da tensão da bateria, (Vin), dando origem à tensão de pico, Vp.

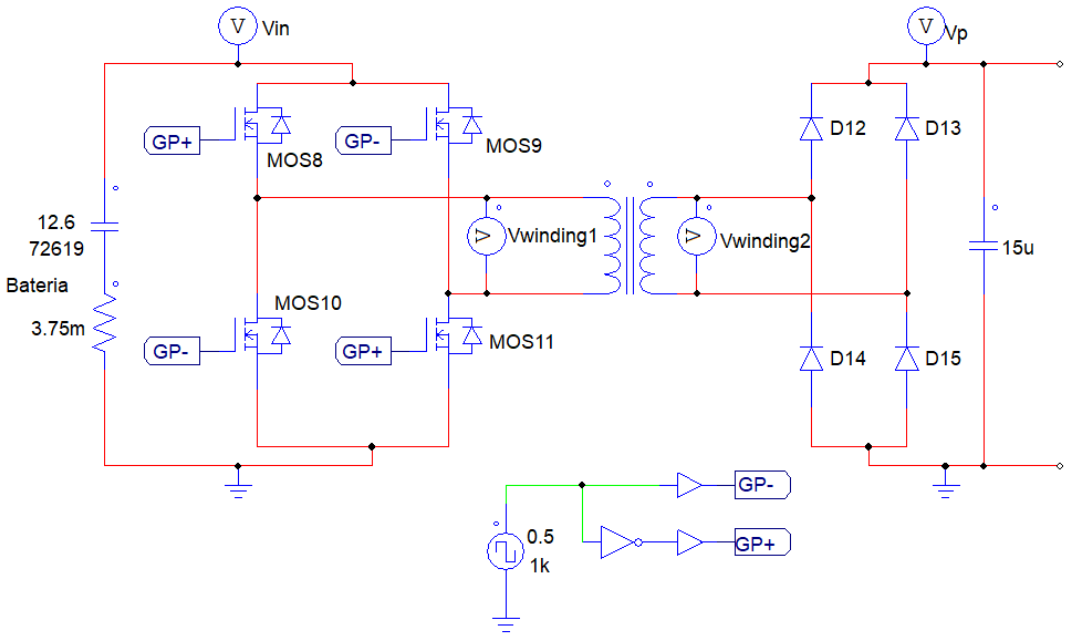


Figura 4.56: Transformador de alta-frequência do conversor CC/CA simulado.

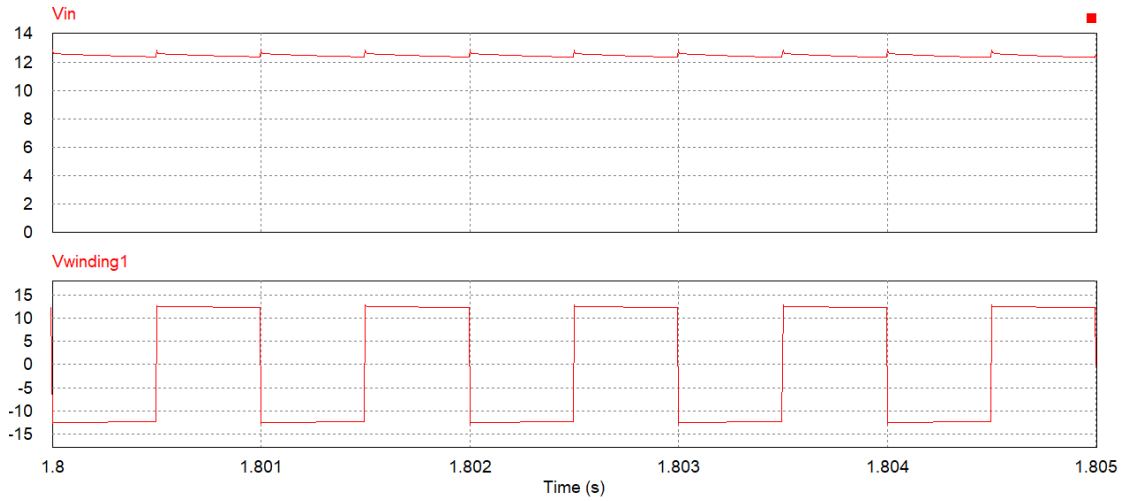


Figura 4.57: Conversão da corrente contínua para alternada antes do transformador de alta-frequência.

O gráfico 4.57 mostra a tensão contínua da bateria (*Vin*) que entra na ponte de MOSFETs. O controlo para esta ponte é o mesmo do conversor CA/CC do sistema de carregamento de energia, com uma frequência de 20kHz. Após a conversão da tensão da bateria em alternada ($Vwinding1$), também visível na figura 4.57, elevou-se esta com o transformador. O transformador é semelhante ao do retificador, contudo, o seu numero de espiras é diferente. Deste modo, o enrolamento primário possui 12 espiras, valor próximo à da tensão máxima da bateria, de 12,6V. Já o enrolamento secundário possui 800 espiras de modo a elevar a tensão para um valor superior ao valor de pico da rede elétrica (Vwinding2), pois pela equação 3.11 é vantajoso obter uma tensão de entrada alta de modo a baixar o índice de modulação. De seguida, é necessário converter novamente a corrente alternada para contínua, pois será a partir desta última que será feito o controlo para a saída do inversor. Assim, com uma nova ponte de díodos foi possível obter a tensão alternada proveniente do transformador em contínua (Vp) carregando o barramento CC. O condensador correspondente ao barramento CC foi calculado através de várias validações experimentais. A figura 4.58 mostra o resultado da tensão alternada à saída do transformador e no barramento CC.

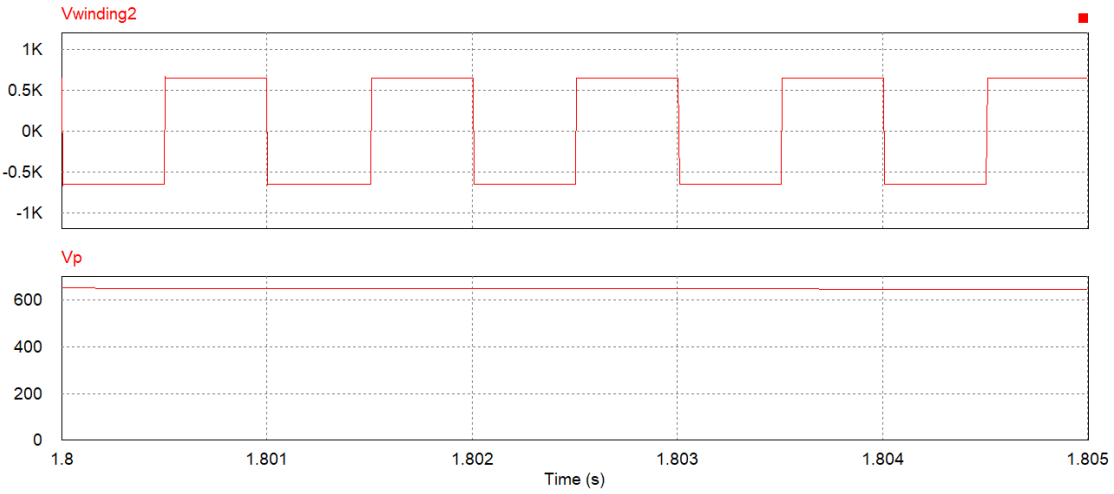


Figura 4.58: Conversão da corrente contínua para alternada antes do transformador de alta-frequência.

De seguida, procedeu-se ao dimensionamento de uma ponte de MOSFETs, a qual recebe como entrada a tensão (Vp) do barramento CC. Como é requisito desta dissertação a saída de 230V CA ter uma potência de 2kW, simulou-se a saída da ponte de MOSFETs de modo a obter uma corrente eficaz de 8,7A com uma carga de 26,43Ω. A imagem 4.59 representa a conversão da tensão do barramento CC (Vp) em alternada pela ponte de MOSFETs dimensionada com a respetiva carga. Para o seu controlo optou-se pelo PWM Unipolar pelas razões já revistas na secção 3.3.2.1.

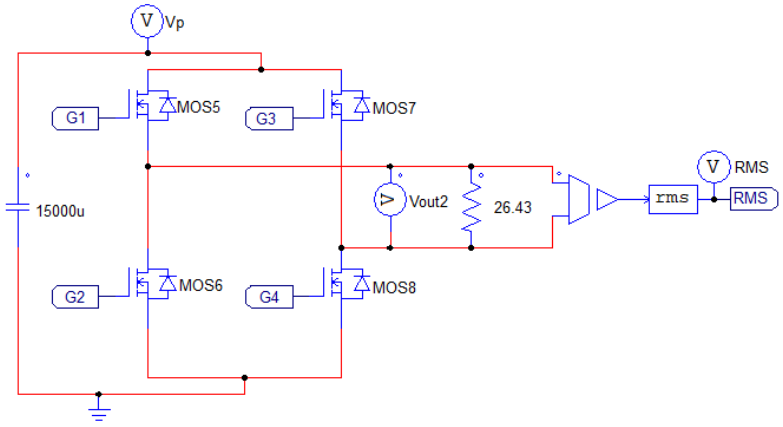


Figura 4.59: Ponte de MOSFETs com carga simulada.

A figura 4.60 representa o sistema de controlo PWM Unipolar sobre os MOSFETs.

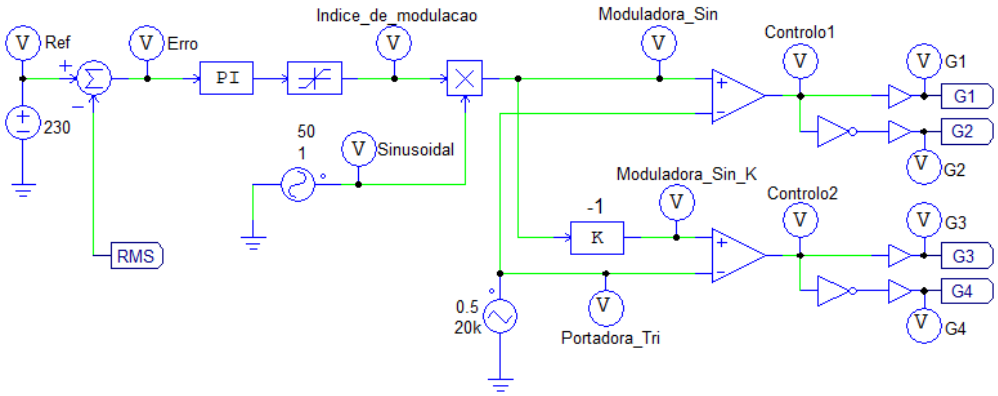


Figura 4.60: Sistema de controlo PWM Unipolar.

4.3.1.1 Controlo PWM

Inicialmente, o sistema de controlo recebe o valor da tensão eficaz através do bloco *RMS* lido na carga na figura 4.59. Esse valor é comparado com o valor de referência de 230V, obtendo assim o erro da diferença. Esse erro, por sua vez, entra no controlador PI responsável por gerar um índice de modulação (Indice_de_modulação) de modo a reduzir o erro o máximo possível. A figura mostra o valor da tensão *RMS* no inicio da simulação, na qual se verifica a sua diferença em relação ao valor referência (230V), gerando, assim, o erro.

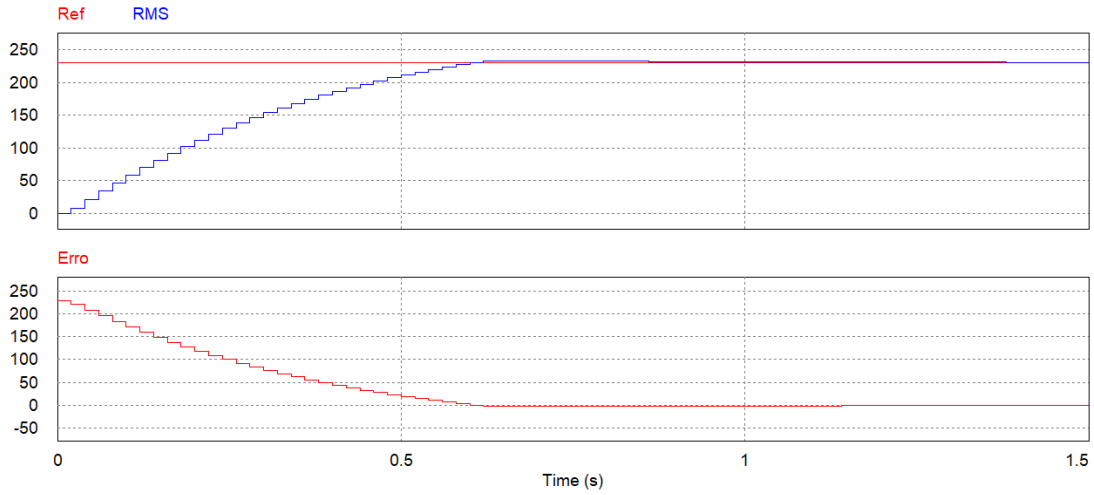


Figura 4.61: Controlo PWM Unipolar.

Por outro lado, conclui-se da figura 4.61 que o valor *RMS* demora cerca de 0,8s a atingir o seu valor referência, o que significa que o controlador PI demora cerca de 0,8s a corrigir o erro. É de salientar que a forma de "escada"visível na figura equivale aos 50Hz da frequência da onda moduladora sinusoidal. A figura 4.62 mostra o índice de modulação gerado pelo controlador PI

para manter a tensão no seu valor eficaz. O índice de modulação é limitado de 0 a 1, de modo a evitar variações bruscas.

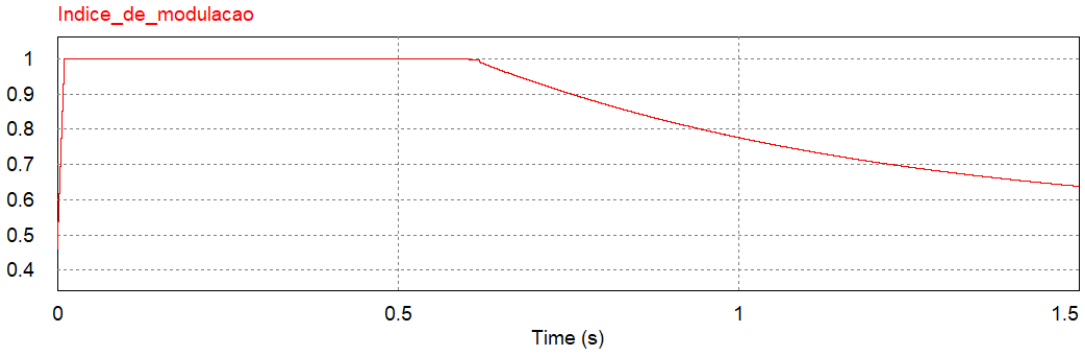


Figura 4.62: Índice de modulação do controlador PI.

Como seria esperado, o controlador PI começa a atenuar o índice de modulação aos 0,8s, o que significa que o valor da tensão eficaz aproxima-se do seu valor de referência aos 0,8s.

De seguida, para o controlo dos MOSFETs, é necessário gerar a onda moduladora sinusoidal, responsável por gerar a forma de onda, com amplitude e frequência certas, à saída do inversor para a carga. A figura 4.63 mostra o resultado da onda moduladora sinusoidal (*Moduladora_Sin*) proveniente da multiplicação entre uma onda sinusoidal com a frequência desejada (*Sinusoidal*) e o índice de modulação gerado pelo controlador PI (*Indice_de_modulao*) responsável pela amplitude. A onda resultante será posteriormente comparada com a onda portadora triangular responsável pelo controlo dos MOSFETs, como se refere na secção 3.3.2.1.

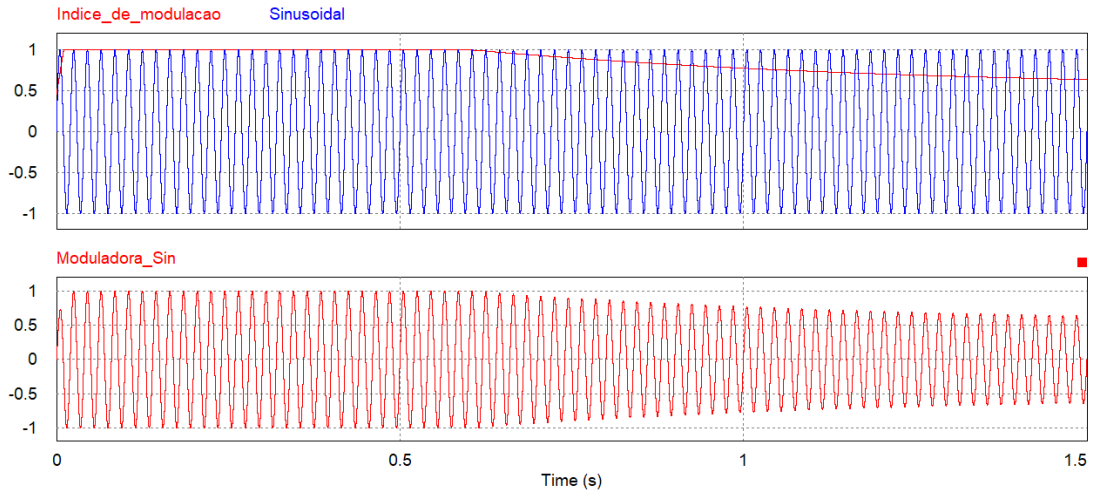


Figura 4.63: Onda sinusoidal portadora com índice de modulação.

De seguida, procedeu-se à comparação entre a onda moduladora sinusoidal e a portadora triangular, na figura 4.64, dando origem ao controlo de um par de MOSFETs (*Controlo*1). Como o controlo PWM Unipolar controla os quatro MOSFETs separadamente, é necessário criar uma

onda moduladora sinusoidal de amplitude inversa à anterior para controlar o outro par de MOSFETs. Deste modo, através de um controlador proporcional com ganho -1, é possível obter a nova onda moduladora com amplitude inversa (*Moduladora_Sin_K*), sendo de igual modo comparada com a mesma onda portadora triangular, dando origem a outro controlo (*Controlo*2). Esta comparação é também visível na figura 4.64.

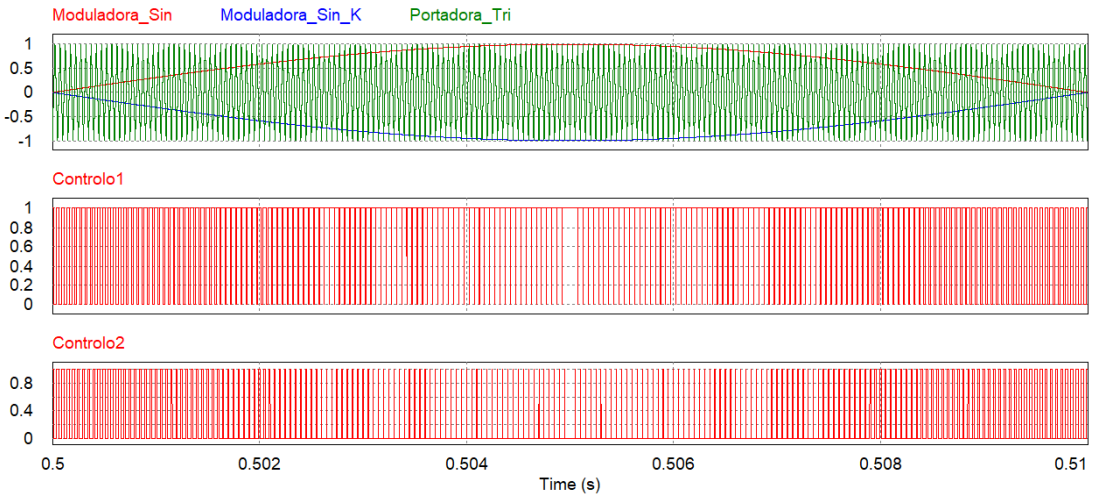


Figura 4.64: *Controlo*1 e *controlo*2.

Após a obtenção dos controlos sobre os pares de MOSFETs, são necessários os controlos individuais para cada MOSFET. Deste modo, colocou-se uma porta analógica negada (*NAND*) antes de um sinal de um MOSFET de cada um dos pares, de modo a que os dois MOSFETs do mesmo par não se ativem ao mesmo tempo. As figuras 4.65 e 4.66 mostram o controlo sobre os quatro MOSFETs individualmente durante o mesmo tempo.

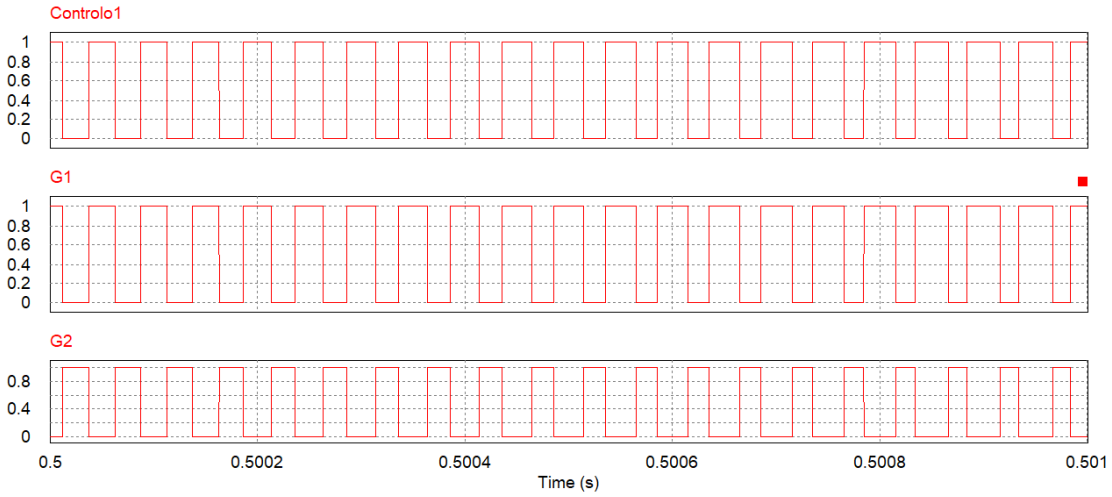


Figura 4.65: Controlo sobre os MOSFETs *G*1 e *G*2.

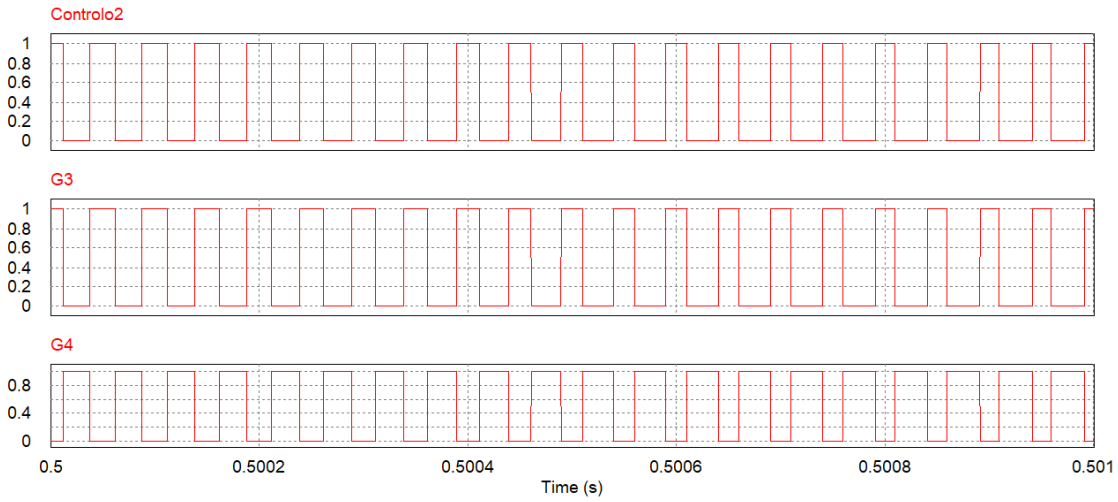


Figura 4.66: Controlo sobre os MOSFETs *G*3 e *G*4.

Com o controlo sobre os MOSFETs definido, procedeu-se à análise da forma de onda na carga, visível na figura 4.67. Foi acrescentado ao gráfico o valor da tensão *RMS*, no qual se verifica que a carga recebe 230V de valor eficaz ao fim de 0,8s.

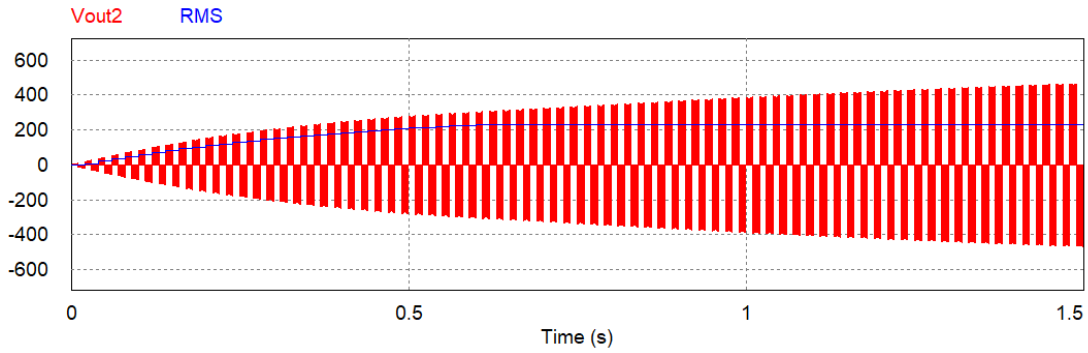


Figura 4.67: Forma de onda na carga.

4.3.1.2 Filtro LC

A componente sinusoidal na carga é obtida através da aplicação de um filtro LC, tal como é referido na secção 3.3.2.2. Como os MOSFETs comutam a uma frequência (fp) de 20kHz, proveniente da onda portadora triangular, e como a onda moduladora sinusoidal apresenta uma frequência (fm) de 50Hz, igual à da rede elétrica, foi necessário aplicar um filtro passa-baixo de modo a obter apenas baixas frequências. Para isso, foi necessário calcular a frequência de corte, que se encontra na gama $10fm < \omega c < 0.1fp$. A figura 4.68 mostra o filtro passa-baixo implementado em software **Matlab** e o valor obtido para a frequência de corte, ωc = 1000Hz.

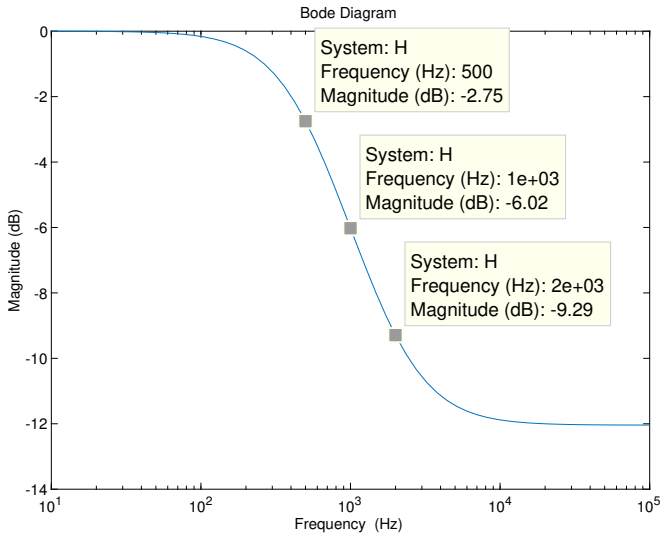


Figura 4.68: Diagrama de bode do filtro Passa-Baixo

Deste modo, através da equação 3.12 fixou-se a bobina com uma indutância de 1mH, obtendo-se um condensador de capacidade 1000μF. Por fim, implementou-se o filtro LC à saída do conversor CC/CA antes da carga como mostra a figura 4.69, obtendo-se, assim, a componente sinusoidal da forma de onda na carga como mostra a figura 4.70. Por fim, foram testadas três cargas diferentes, 26,43Ω (2kW), 200Ω (264W) e 1000Ω (52,9W), apresentadas nas figuras 4.71, 4.72 e 4.73, respetivamente, obtendo-se sempre uma onda sinusoidal pura na frequência desejada. Os valores eficazes da tensão e corrente apresentam-se descritos nas mesmas imagens.

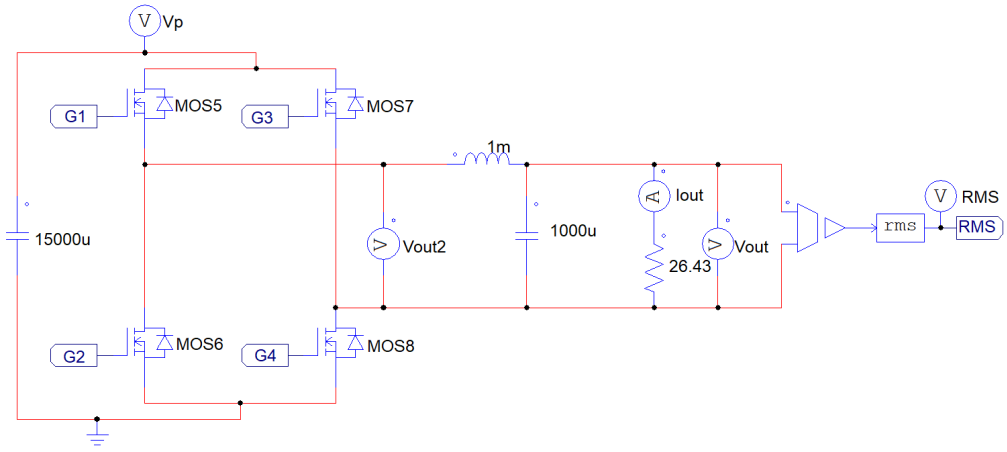


Figura 4.69: Filtro LC Passa-Baixo.

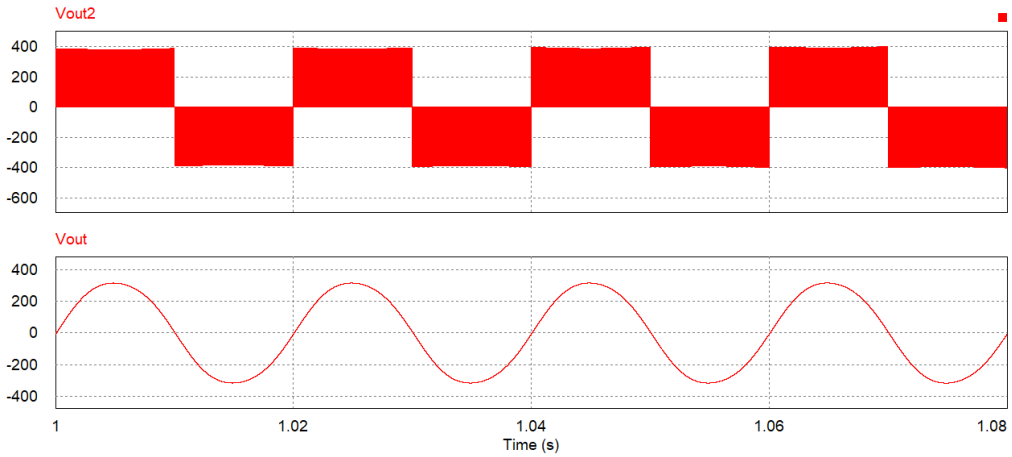


Figura 4.70: Componente sinusoidal da forma de onda na carga.

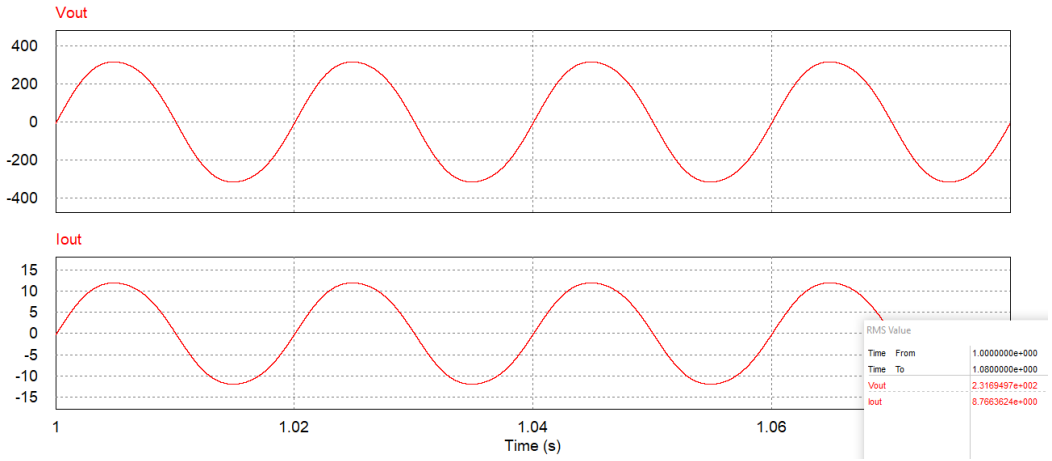


Figura 4.71: Forma de onda da tensão e corrente na carga: 26,43Ω.

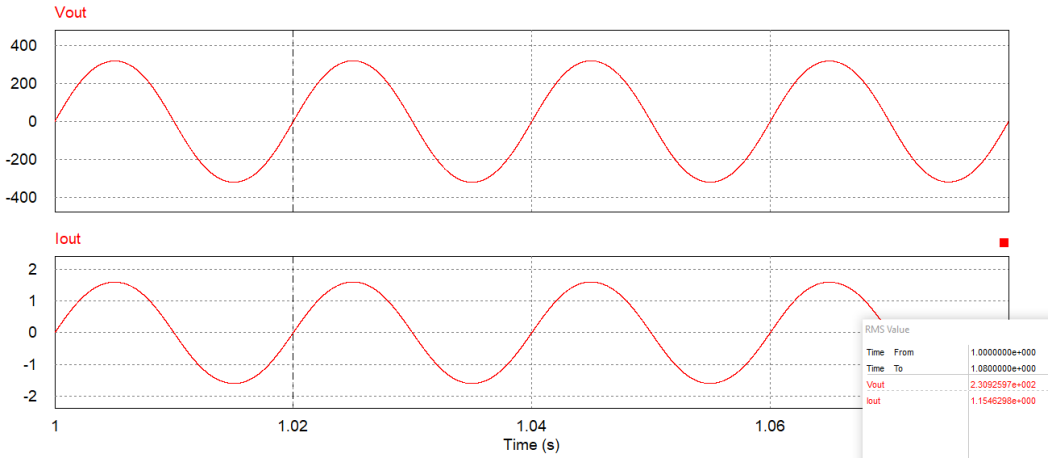


Figura 4.72: Forma de onda da tensão e corrente na carga: 200Ω.

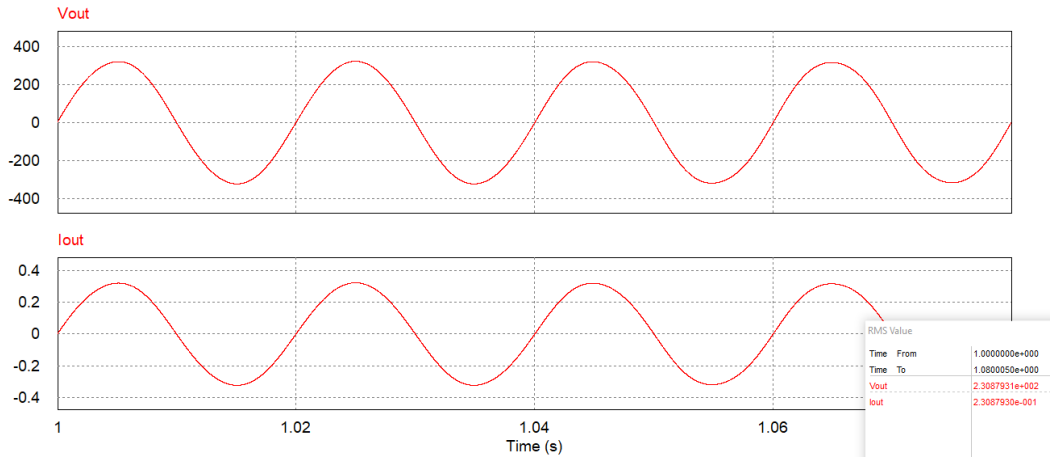


Figura 4.73: Forma de onda da tensão e corrente na carga: 1000Ω.

O requisito obrigatório da saída 230V CA 2kW é ter uma duração de 30min, neste sentido, foi simulado o sistema com 1800s, de modo a obter a duração máxima do inversor com a bateria aproximada, obtendo-se uma duração de 850s, cerca de 14min, como mostra a figura 4.74.

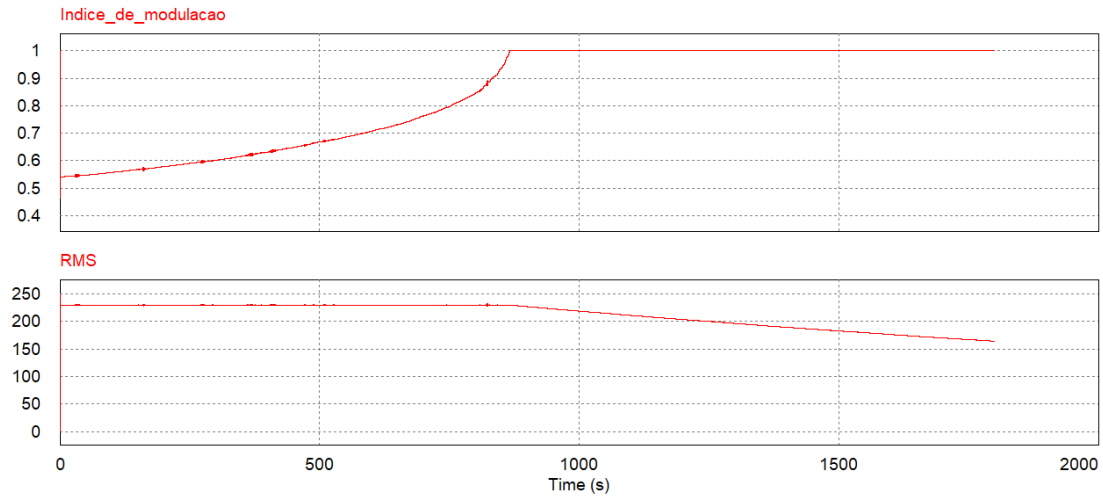


Figura 4.74: Duração máxima do inversor com a saída a 2kW.

O circuito final do inversor é apresentado na imagem 4.75.

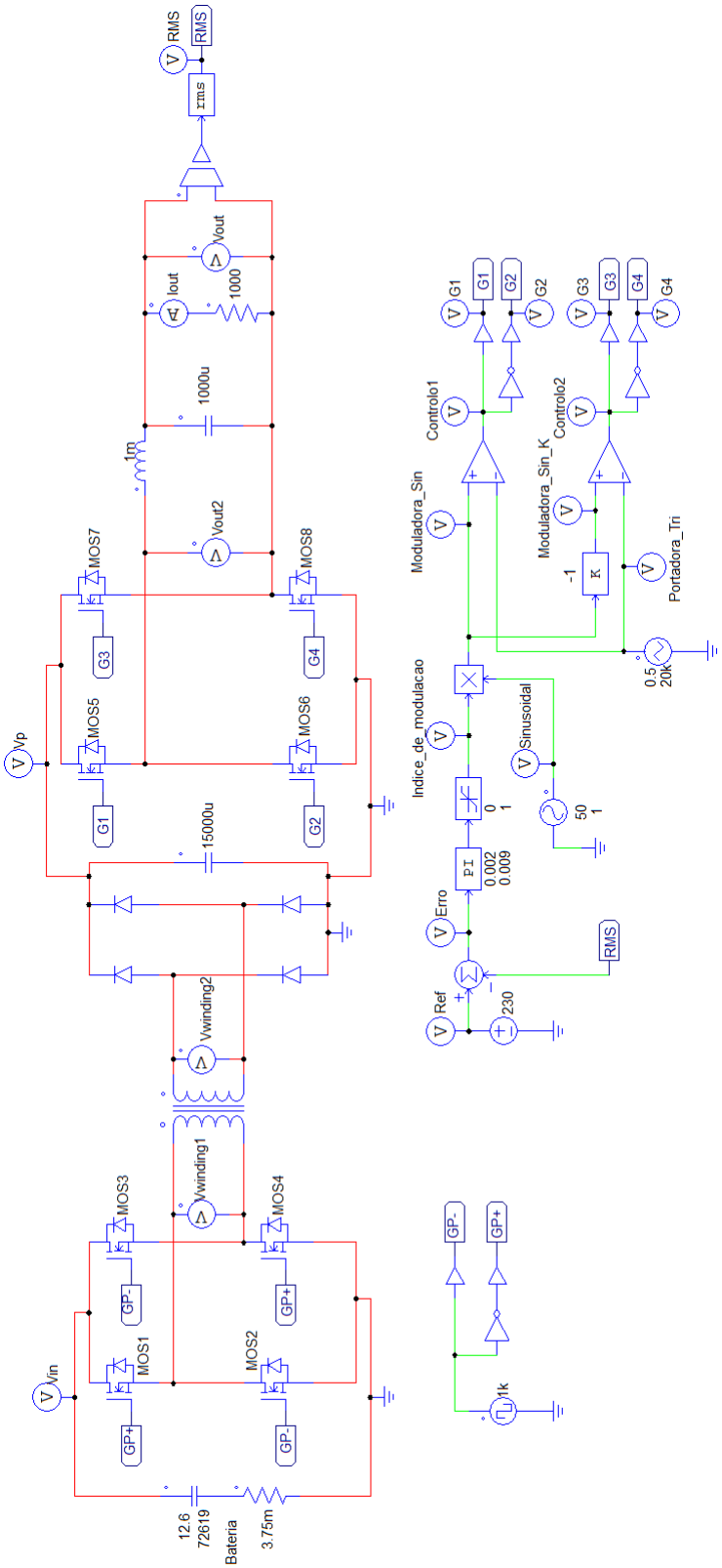


Figura 4.75: Conversor CC/CA (Inversor).

4.3.2 Conversor CC/CC (Abaixador)

Por último, se o utilizador pretender carregar um smartphone na UPS também o poderá fazer, através de um conversor CC/CC abaixador, de modo a reduzir a tensão da bateria para 5V. Este conversor foi limitado a 10W pois 2A é suficiente para as cargas a que a saída está destinada.

Para calcular o *Duty-Cycle* do conversor, foi usado para a tensão de entrada o valor da tensão nominal da bateria, 11,1V. Assim, como o conversor tem uma saída de 5V, através da equação 3.3, obteve-se um D de 0,45. Para o *ripple* da bobina foi escolhido uma variação máxima de 0,08A, tendo dado, a partir da equação3.4, uma bobina com indutância de 686mH, sendo a frequência Ts de 20kHz. Para o condensador, decidiu usar-se um ripple máximo de 0,2V. Deste modo, através da equação 3.6, obteve-se um condensador de capacidade 6,26μF.

Com o intuito de calcular o ganho e a constante de tempo do controlador PI do sistema de controlo em tensão constante com corrente limitada, é necessário simular o sistema em malha aberta, tal como foi feito na secção do sistema de carregamento de energia. Como se pretende uma saída de 5V a uma potência de 10W, foi usada uma carga de 2,5 Ω e um Duty-Cycle de 0,45. As figuras 4.76 e 4.77 mostram o conversor implementado em malha aberta assim como a sua simulação.

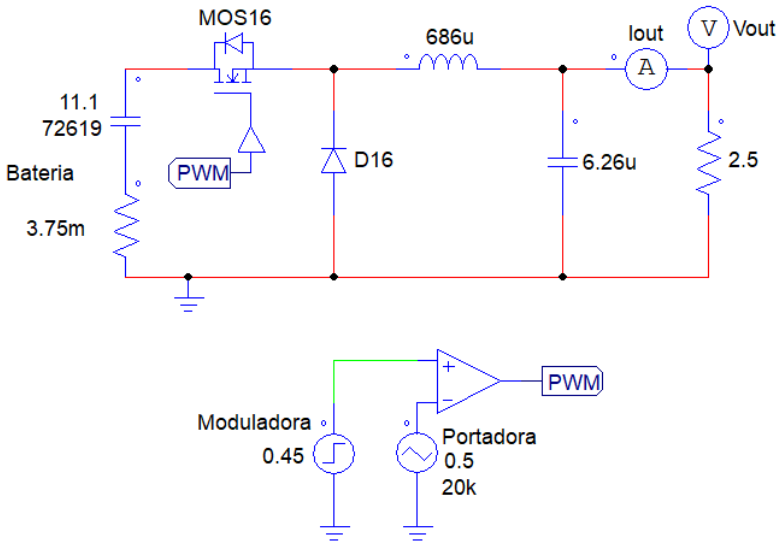


Figura 4.76: Conversor CC/CC Abaixador 5V 10W em malha aberta.

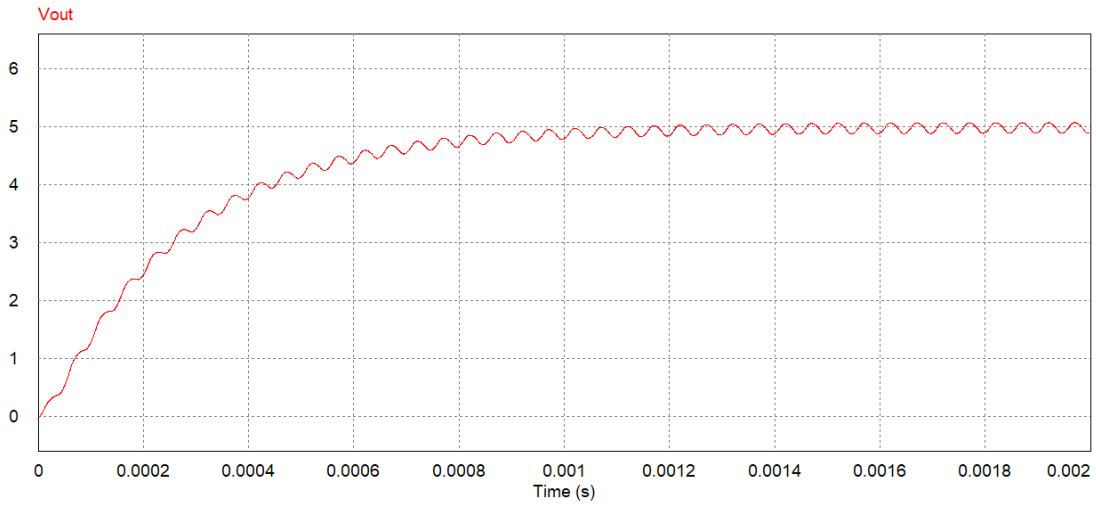


Figura 4.77: Simulação do conversor CC/CC Abaixador 5V 10W em malha aberta.

Pela análise do gráfico, verifica-se o correto funcionamento do controlo PWM, o qual mantém a tensão de saída do conversor nos 5V. Deste modo, 63% da tensão de saída (K_o) equivale a 3,15V, tendo um tempo de alcance T de 266μs, como mostra a figura 4.78.

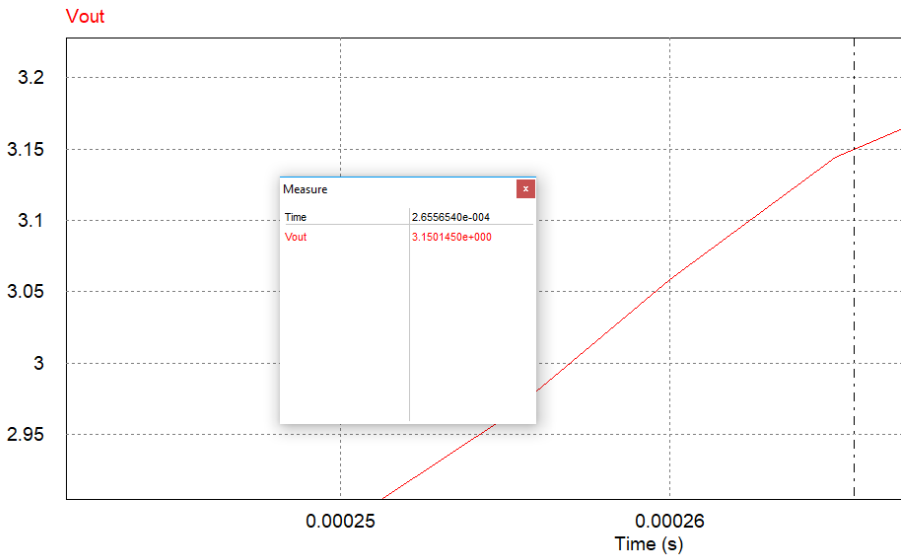


Figura 4.78: Tempo de alcance T do conversor CC/CC Abaixador 5V 10W

Por fim, implementou-se o conversor em malha fechada, isto é, com o sistema de controlo em tensão constante com corrente limitada com os valores do controlador PI já introduzidos, como mostra a figura 4.79.

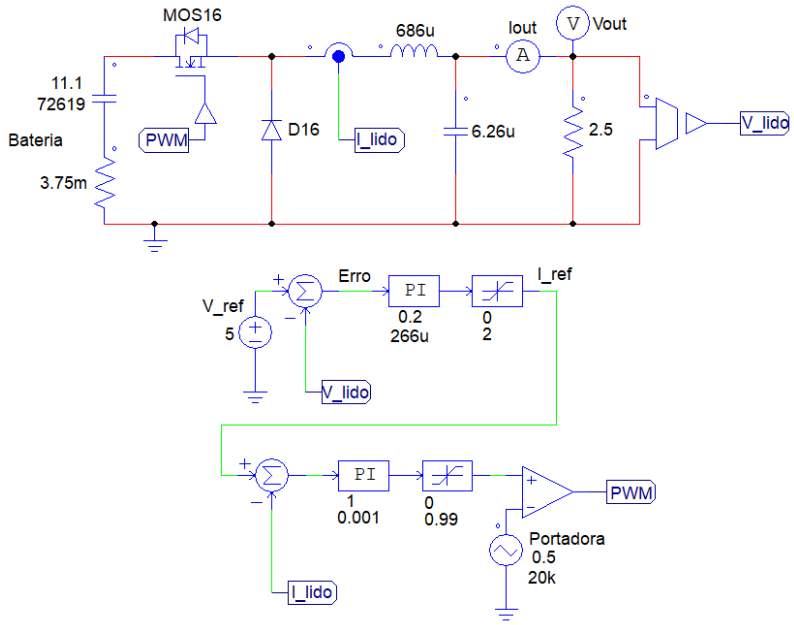


Figura 4.79: Conversor CC/CC Abaixador 5V 10W em malha fechada.

É de salientar que o limitador foi limitado para uma corrente máxima de 2A. Assim, se uma carga consumir mais de 10W, o conversor baixa a tensão de modo a não ultrapassar a corrente máxima, para preservar os componentes. A figura 4.80 mostra a simulação do conversor com uma carga de 2,5Ω, da qual se conclui o seu correto funcionamento, demorando a tensão do conversor a atingir o seu valor referência 0,005s.

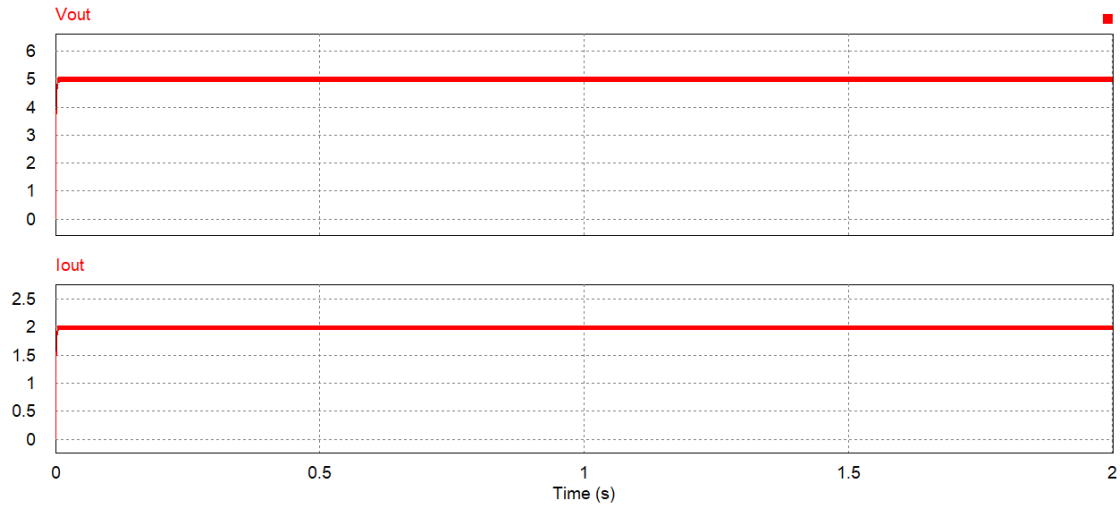


Figura 4.80: Simulação do conversor CC/CC Abaixador 5V 10W em malha fechada.

O *ripple* da tensão (0,2V) e da corrente (0,08A) correspondem ao anterior dimensionamento da bobina e do condensador, visível na figura 4.81.

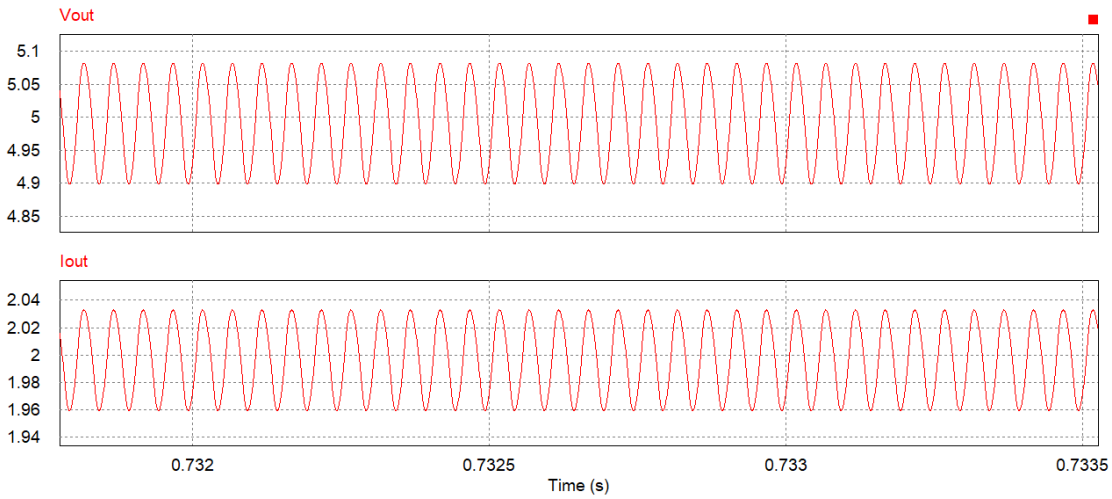


Figura 4.81: *Ripple* da corrente e da tensão no conversor CC/CC Abaixador 5V 10W.

Por último, foram testadas várias cargas, 1Ω, 5Ω e 10Ω, apresentando-se os resultados nas figuras 4.82, 4.83 e 4.84, concluindo-se que acima de 2A o conversor baixa a sua tensão não ultrapassando a corrente máxima.

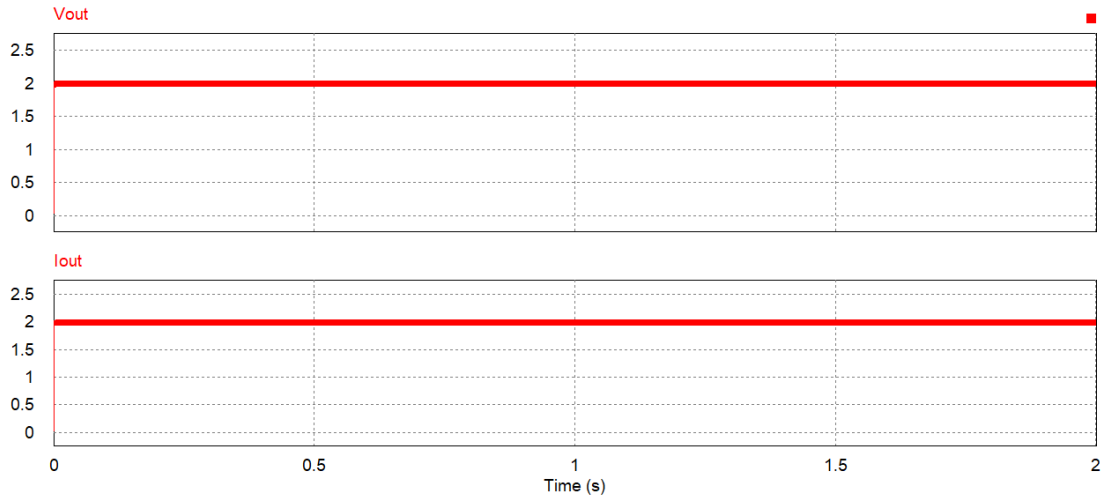


Figura 4.82: Tensão e corrente na carga 1Ω.

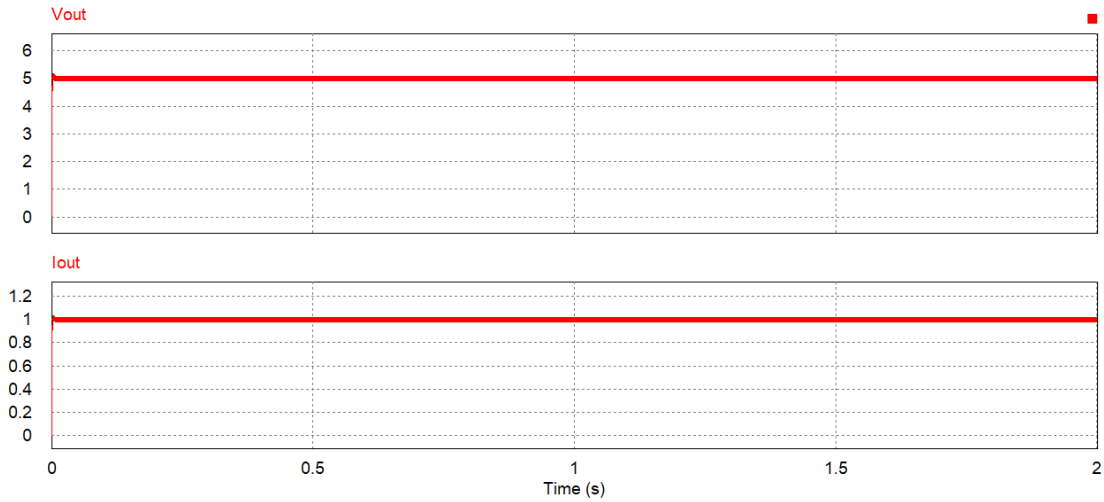


Figura 4.83: Tensão e corrente na carga 5Ω.

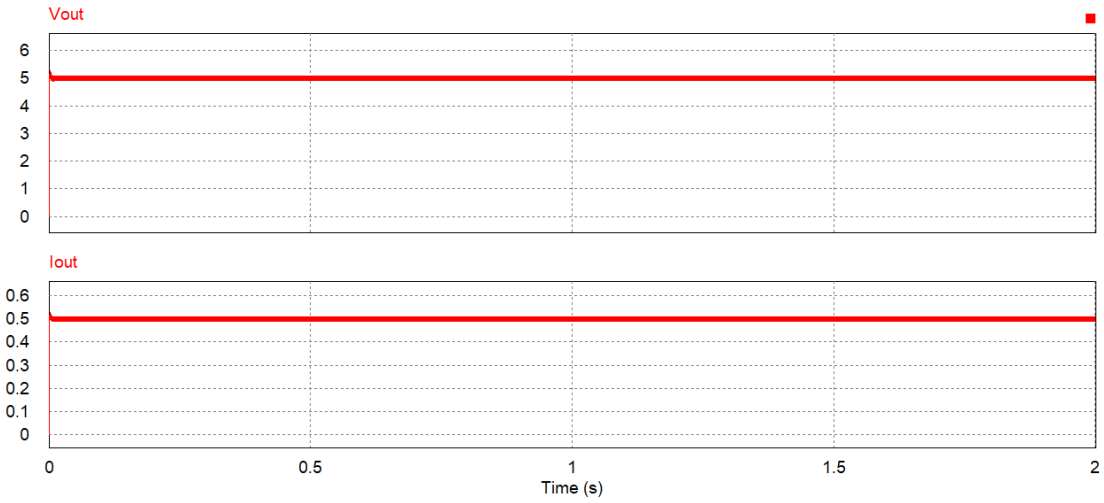


Figura 4.84: Tensão e corrente na carga 10Ω.

4.4 Conclusão

Neste capítulo, apresentaram-se as simulações inerentes à construção do protótipo, dimensionando-se todos os componentes do circuito. São, ainda, apresentados os principais resultados que indicam o correto funcionamento da UPS para o cumprimento dos requisitos da presente dissertação.

O sistema total de carregamento de energia implementado é apresentado na figura 4.85, enquanto que o sistema total de descarregamento de energia implementado é apresentado na figura 4.86.

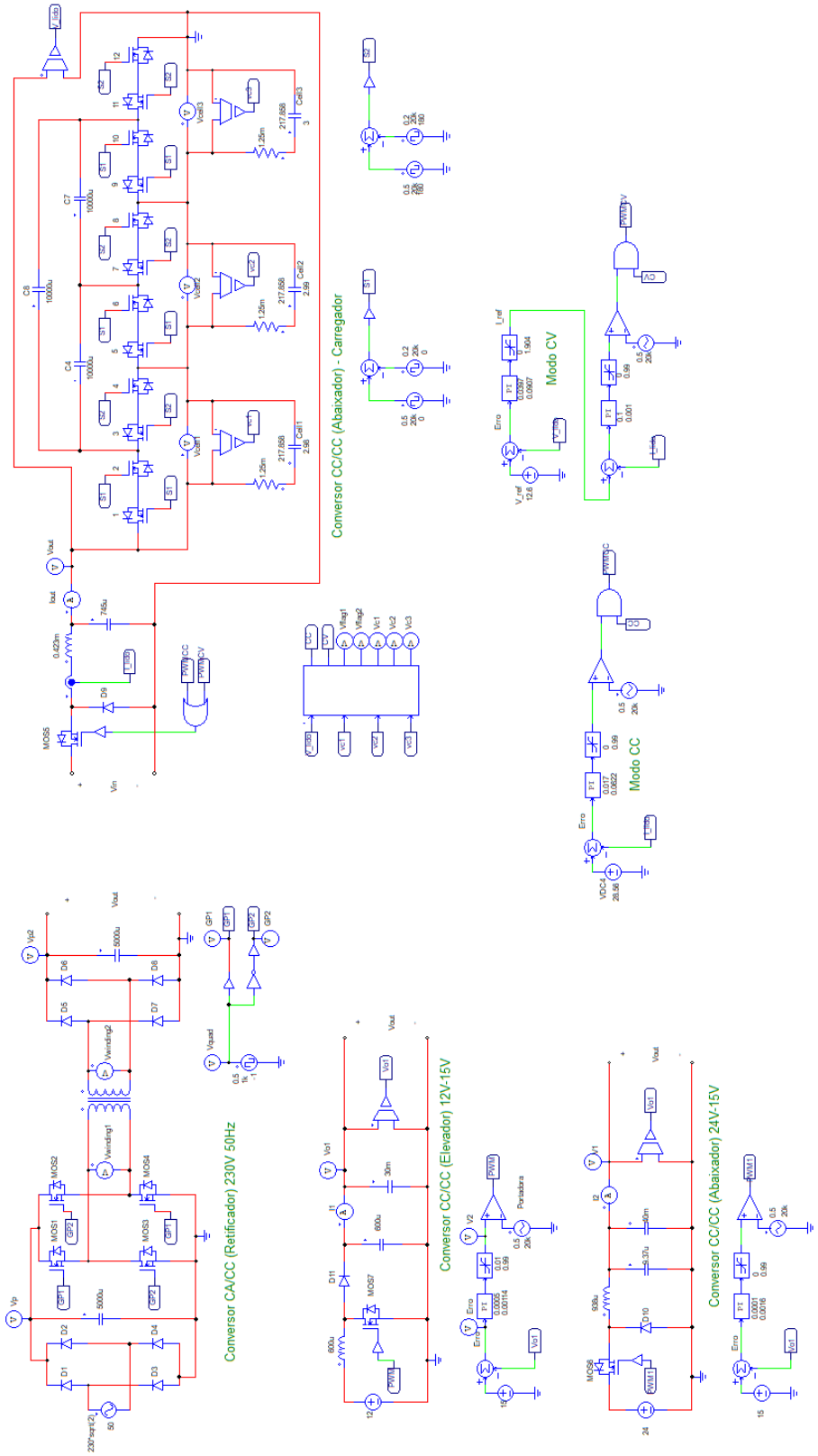


Figura 4.85: Sistema de Carregamento de Energia

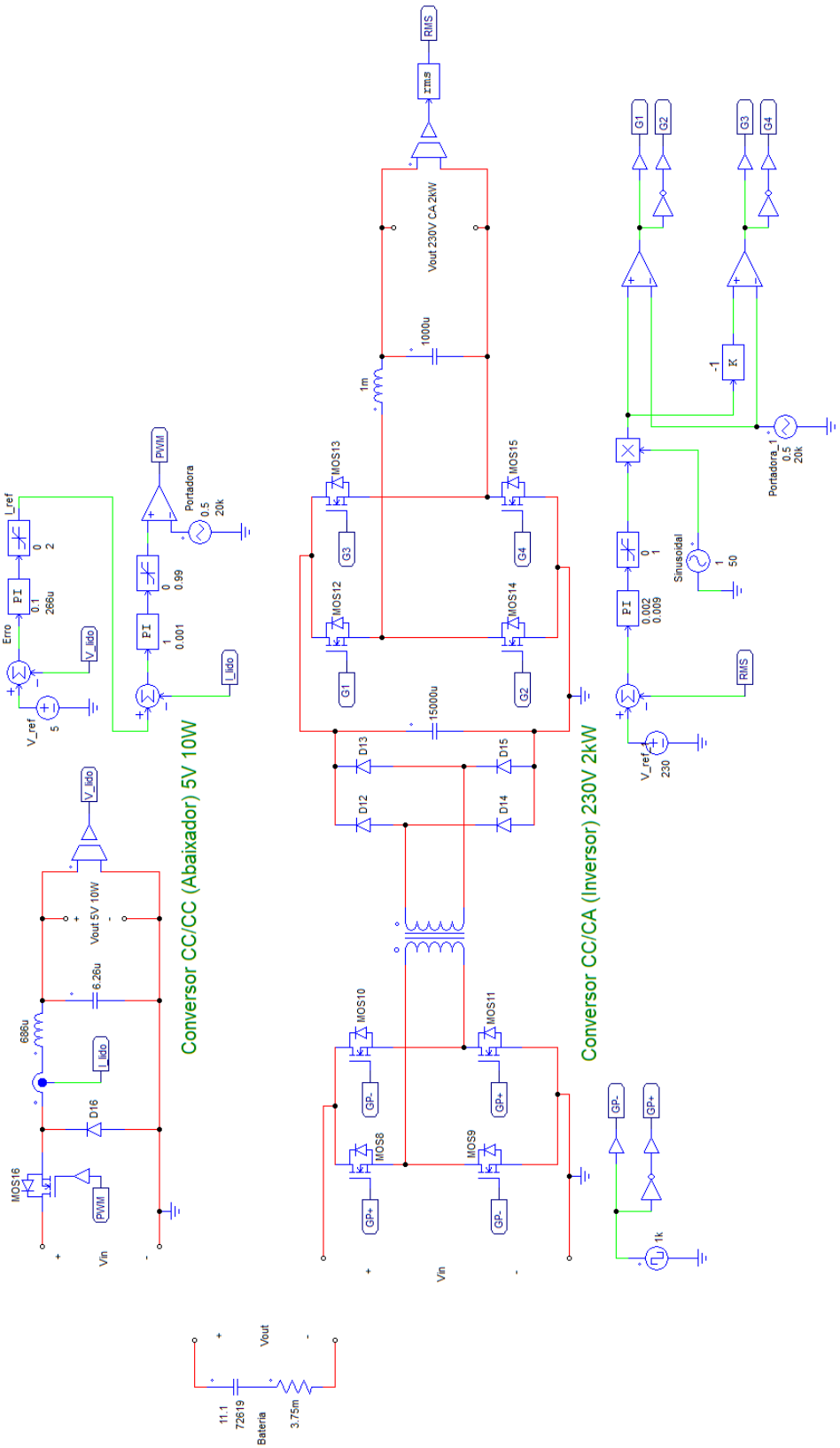


Figura 4.86: Sistema de Descarregamento de Energia

Capítulo 5

Protótipo

A presente dissertação consiste na construção de uma UPS Portátil, procedendo-se, assim, à criação de um protótipo. Contudo, devido à limitação de tempo para a realização da dissertação, não foi possível reproduzir os sistemas simulados no capítulo anterior. Deste modo, foi dimensionado o tipo de UPS a construir para, posteriormente, se adquirir equipamento para a sua construção.

5.1 Tipo de UPS

Pela análise bibliográfica, a UPS mais económica para o utilizador é a UPS *Offline*, pelo que as simulações se basearam neste tipo de UPS. No entanto, para o protótipo optou-se pela UPS *Online* pois, embora seja semelhante à *Offline*, sendo o carregador independente do inversor, o seu controlo aquando da ausência de energia por parte da rede elétrica é mais fácil de implementar. Deste modo, foi necessário adquirir a bateria, o carregador, a fonte de alimentação e o inversor.

5.2 Restrições

Antes de se dimensionar a UPS, foi imposta uma corrente contínua máxima de 30A por motivos de segurança. Por outro lado, para reduzir custos, foi decidido reduzir a energia da bateria para cerca de um quarto da energia especificada na proposta (1kWh).

5.3 Componentes do requisito obrigatório

5.3.1 Bateria

De modo a reduzir a corrente contínua interna na UPS, a solução passou por aumentar o número de células em série em relação à bateria simulada, reduzindo o número de células em paralelo. Assim, adquiriu-se 24 células INR18650-35E [38], obtendo-se uma bateria com uma configuração 6S4P e uma energia total de 289,44Wh. Como cada célula apresenta uma gama de tensão entre 2,65V a 4,2V, a bateria terá uma gama de tensão de 15,9V a 25,2V. Adicionalmente,

foi necessário adquirir um sistema de equilíbrio. Como os sistemas de equilíbrio capacitivos são volumosos e têm elevado custo, a escolha para este sistema recaiu num sistema de equilíbrio passivo com capacidade de descarga até 15A. Por outro lado, este sistema oferece proteção contra curto-circuito.



Figura 5.1: Célula Samsung INR18650-35E.



Figura 5.2: Sistema de equilíbrio passivo PCB 6S.

5.3.2 Carregador

Sendo a corrente de carregamento de cada célula 1,02A, foi necessário adquirir um carregador com uma potência de cerca de 107W. Assim, adquiriu-se o carregador OSKJ 300W (conversor CC/CC abaixador) [45] para baterias de lítio cujo carregamento contém o modo CC e CV. Este carregador possui dois potenciómetros dos quais um regula a corrente máxima de carregamento (CC) e o outro regula a tensão máxima de carregamento (CV). De acordo com a configuração da bateria, configurou-se o carregador para uma corrente máxima de 4A e uma tensão máxima de 25,2V. Por último, o carregador exige uma tensão de entrada com uma diferença superior à da

tensão de saída de cerca de 1V, pelo que necessita de pelo menos 26V de tensão de entrada para carregar a bateria.

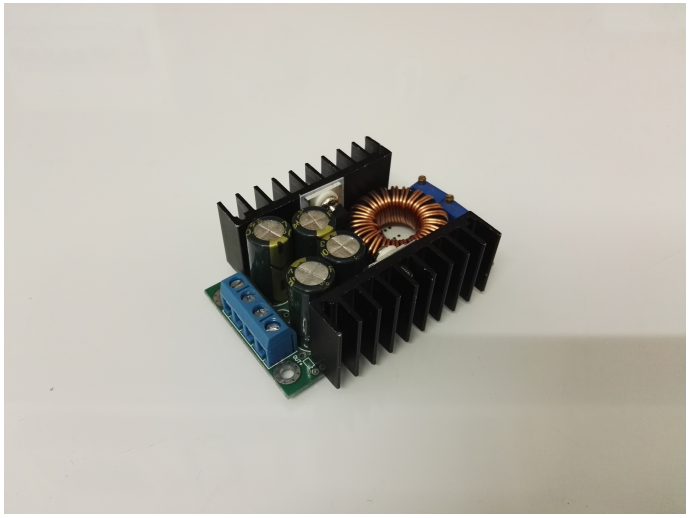


Figura 5.3: Carregador OSKJ 300W (conversor CC/CC Abaixador).

5.3.3 Inversor

Quanto ao inversor, foi essencial adquirir um que funcionasse na mesma gama que a bateria, pelo que se optou por um inversor MeanWell A302-300-F3 300W [46] com entrada variável entre 19,5V a 30V. Deste modo, a corrente máxima que o inversor consumirá será quando as baterias estiverem a 19,5V, sendo a corrente de 15A, não ultrapassando a corrente máxima restringida inicialmente. Como a bateria apresenta 4 células em paralelo, cada célula terá uma descarga máxima de 3,75A. Pela *datasheet* da célula, esta consegue fornecer até 8A continuamente, pelo que o inversor é adequado. Por outro lado, o inversor desliga-se quando a tensão de entrada for menor que 19,5V, evitando que a bateria atinja o seu valor mínimo de tensão, prolongando a sua vida útil.



Figura 5.4: Inversor MeanWell A302-300-F3 300W.

5.3.4 Fonte de energia

Como a UPS *Online* tem o inversor em constante funcionamento, foi imprescindível obter uma fonte que conseguisse alimentar o inversor e o carregador das baterias simultaneamente, para quando a UPS recebe energia por parte da rede elétrica. Assim, como o carregador consome uma corrente de cerca de 4A (4 células em paralelo em cada série) a uma tensão superior a 26V, e como o inversor tem uma gama de tensão de 19,5V a 30V, dimensionou-se uma fonte capaz de fornecer 28V. Com esta tensão, o inversor consome uma corrente máxima de 10,7A. Assim, optou-se por uma fonte MeanWell LRS-350-24 [47] capaz de fornecer um máximo de 28V e uma corrente de 14,7A cumprindo, assim, a potência necessária.



Figura 5.5: Fonte MeanWell LRS-350-24.

5.4 Sistema de controlo do requisito obrigatório

5.4.1 Esquema

Após a escolha do material principal, dimensionou-se, de seguida, o esquema de controlo que irá comutar entre a fonte de tensão e as baterias para quando a rede elétrica falha ou para quando o utilizador se encontra numa zona remota sem uma fonte próxima de energia. O esquema apresentado na figura 5.6 foi desenhado com o software **Visio** da *Microsoft*.

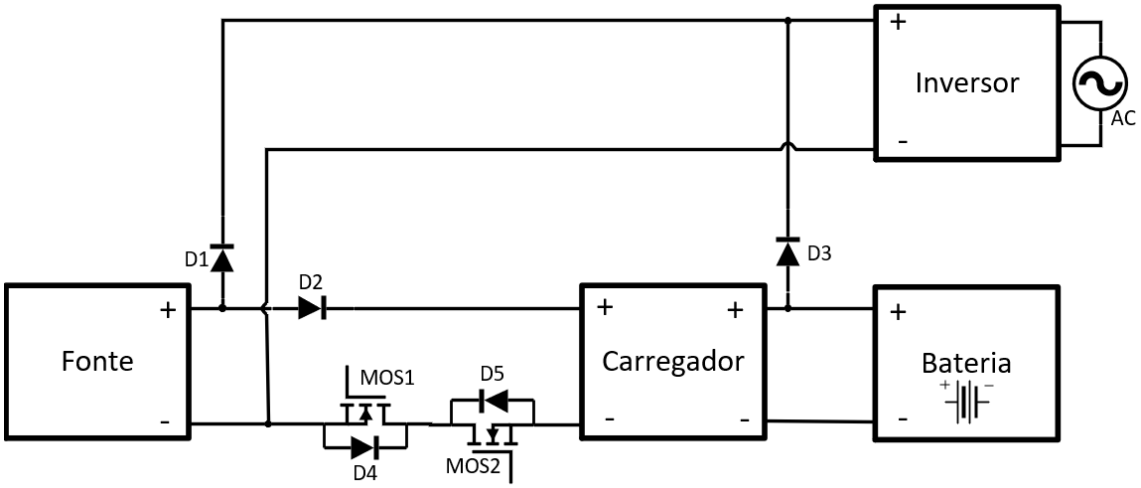


Figura 5.6: Esquema de controlo proposto.

A figura 5.7 mostra a receção de energia por parte da rede elétrica na UPS. A energia flui pelo díodo $D1$ entrando no inversor. Por outro lado, também flui pelo díodo $D2$ entrando no carregador, carregando a bateria. Por sua vez, a massa que provém do carregador passa pelo interruptor bidirecional feito por MOSFETs, encontrando-se com a massa do inversor, entrando de seguida na fonte. O díodo $D3$ impede que a energia que passa pelo díodo $D1$ entre diretamente na bateria, carregando-a descontroladamente. Assim, quando a UPS deixa de receber energia da rede elétrica (figura 5.8), a bateria descarrega-se pelo díodo $D3$ entrando imediatamente no inversor. O díodo $D1$ passa a impedir com que a bateria se carregue a si mesma, evitando que a energia entre no carregador. Já a massa proveniente do inversor entra no interruptor bidirecional com sentido contrário à da figura 5.7, visto que a massa do carregador está ligada diretamente à bateria, como se referiu no capítulo anterior na simulação do carregador.

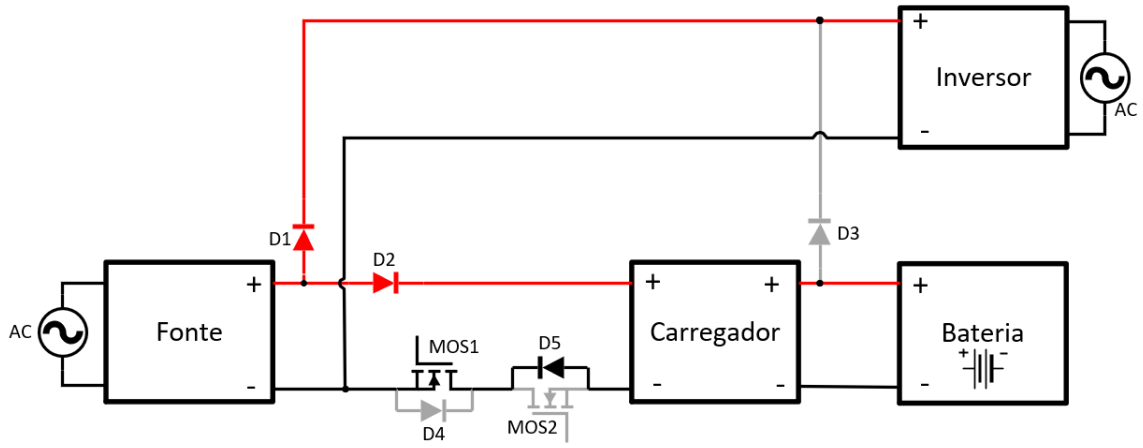


Figura 5.7: Energia proveniente da rede elétrica.

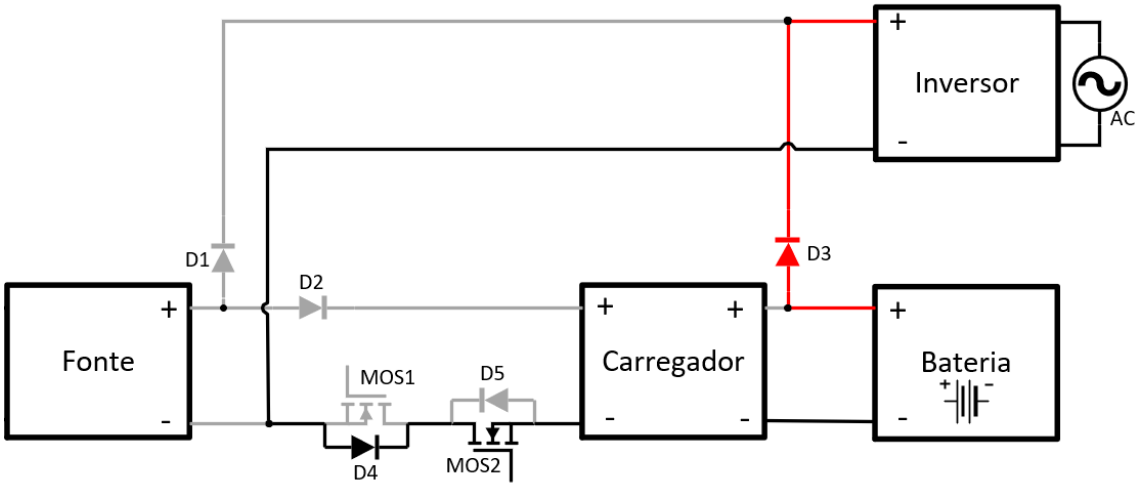


Figura 5.8: Energia proveniente da bateria.

Quanto aos díodos, pelo díodo *D*1 flui uma tensão de 28V e uma corrente máxima de 10A proveniente da fonte para o inversor, como já foi dito anteriormente. Já pelo díodo *D*3 passa uma tensão máxima de 25,2V da bateria. Quando esta se encontra com uma tensão de 19,5V, passa por ele uma corrente máxima de 15A. Pelo díodo *D*2 apenas flui uma tensão de 28V a uma corrente de 4A. Assim, foi necessário dimensionar um díodo que suportasse uma tensão de 28V e uma corrente de 15A. O díodo escolhido foi o E40ED1 [48] (figura 5.9) por corresponder aos requisitos e por estar também disponível no Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.



Figura 5.9: Díodo E40ED1.

Foi necessário colocar dois MOSFETs em sentidos opostos entre o carregador e o ponto comum de massa de modo a criar um interruptor bidirecional pois em caso de anomalia, este interruptor tem como função desligar o carregador e/ou a bateria. Assim, no caso da figura 5.7, se a bateria exceder o seu nível de tensão máximo durante o carregamento, por exemplo, o MOSFET $MOS1$ desliga-se impedindo passagem de energia, fazendo com que o carregador não consiga carregar a bateria. Por sua vez, quando a UPS se encontra a ser alimentada pela bateria, figura 5.8, o $MOS2$ desliga-se caso uma das células da bateria atinja um valor menor que a sua tensão mínima, por exemplo, evitando, assim, a degradação da bateria. A tensão máxima que passará pelo carregador é aproximadamente 28V (proveniente da fonte). Por outro lado, a corrente máxima que passará pela massa do carregador é de 15A quando a bateria estiver a alimentar o inversor. Assim, foi necessário dimensionar dois MOSFETs que suportassem uma tensão de 28V e uma corrente de 15A. O MOSFET escolhido foi o PSMN9R5 tipo N [49] (figura 5.10) por corresponder às necessidades. Por outro lado, este MOSFET estava igualmente disponível no Departamento. Uma outra vantagem deste MOSFET é possuir uma resistência muito baixa (9,6mΩ), resultando numa baixa dissipação de energia, de acordo com a equação 5.1.

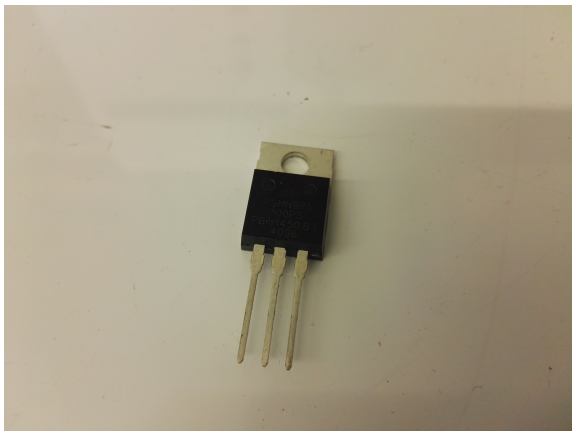


Figura 5.10: MOSFET PSMN9R5-100PS.

$$P = RI^2 \tag{5.1}$$

5.4.2 Controlador

Para efetuar o controlo nos MOSFETs optou-se pela utilização de um Arduino. A escolha recaiu sobre esta placa programável pois pretendia-se uma interface com o utilizador. Isto é, através de um ecrã, o utilizador poderia ver a capacidade da bateria, assim como a causa da anomalia quando esta ocorresse. Para isso, o Arduino detetaria os sinais externos, atuando de seguida nos MOSFETs.

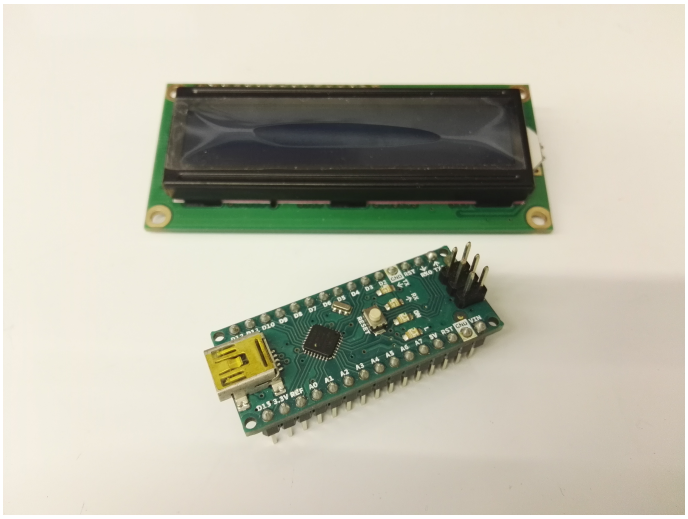


Figura 5.11: Arduino Nano e ecrã

Para a atuação nos MOSFETs, devido à elevada potência que transita neles, foi necessário usar dois drivers isolados de modo a proteger o Arduino. Assim, foram usados dois opto-isoladores 4N25 [50], como mostra a figura 5.12 e 5.13. Estes opto-isoladores recebem um sinal contínuo do Arduino que ativa um LED interno. Por sua vez, o LED ativa o fototransistor, que permite a passagem de corrente. Deste modo, não há contacto direto entre o sistema que emite o sinal e o recetor.

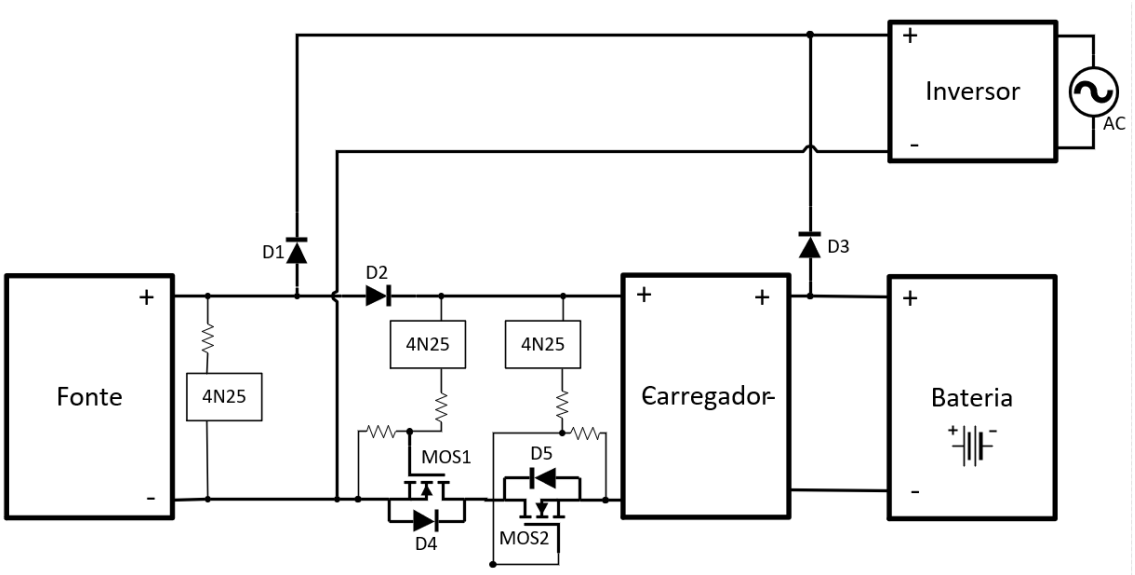


Figura 5.12: Esquema de controlo com opto-isoladores.

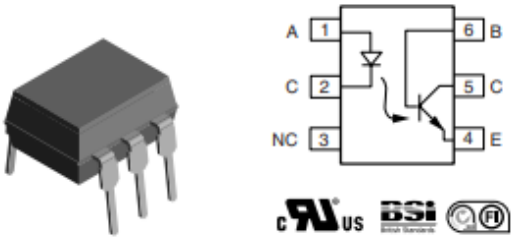


Figura 5.13: Opto-isolador 4N25.

O terceiro opto-isolador 4N25 à saída da fonte de tensão, representado na figura 5.12, tem como função indicar ao Arduino se a UPS está a receber energia de uma fonte de energia 230V AC. Deste modo, o Arduino irá comunicar ao utilizador o estado em que a UPS se encontra.

5.4.3 Anomalias

Em relação às anomalias, foi importante obter a leitura das tensões das células individualmente da bateria, assim como medir a sua temperatura. Para a medição da tensão das células, foi usado um divisor de tensão como mostra a figura 5.14. Assim, através das portas analógicas, o Arduino consegue obter os valores de tensão das células individualmente, como se mostrará no código mais à frente.

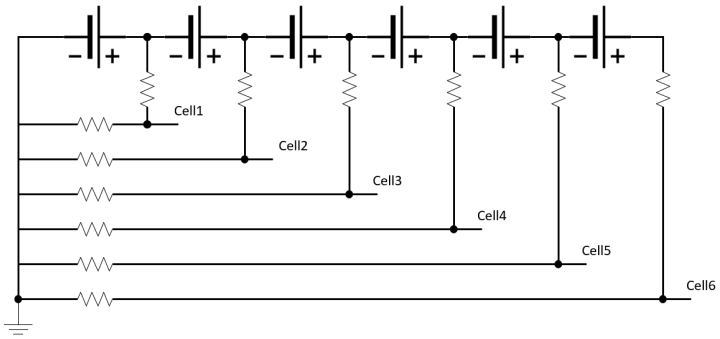


Figura 5.14: Divisor de tensão da bateria.

Quanto à temperatura, foram utilizadas duas resistências variáveis com a temperatura (termístor) NTC 10K [51] (figura 5.15). Estes termístores são alimentados pela saída de 5V do Arduino, sendo o seu circuito de ligação semelhante ao divisor de tensão da bateria.



Figura 5.15: Termístor NTC 10K.

5.5 Componentes do requisito desejável

5.5.1 Entrada de energia

Para além do carregamento obrigatório proveniente da fonte 230V AC, também se adicionou um carregamento para a bateria através da saída de isqueiro 12V de um automóvel, tal como foi proposto na dissertação. Assim, foi usado um conversor elevador CC de 12V com saída regulável de modo a poder ligar-se ao carregador. Adquiriu-se também um adaptador macho de isqueiro para o automóvel, conectores para a entrada na UPS e um interruptor responsável pela comutação de carregamento (automóvel ou rede elétrica).



Figura 5.16: Conector macho de isqueiro 12V para automóvel.



Figura 5.17: Conectores para entrada 12V na UPS proveniente do isqueiro.

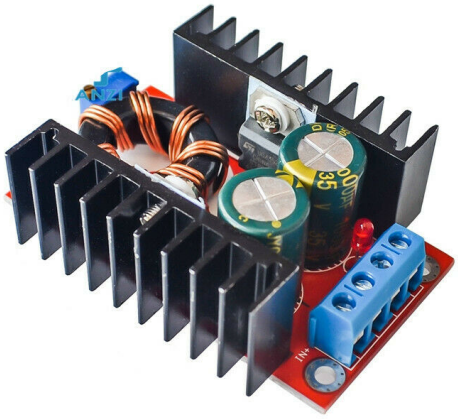


Figura 5.18: Conversor elevador CC 12V.

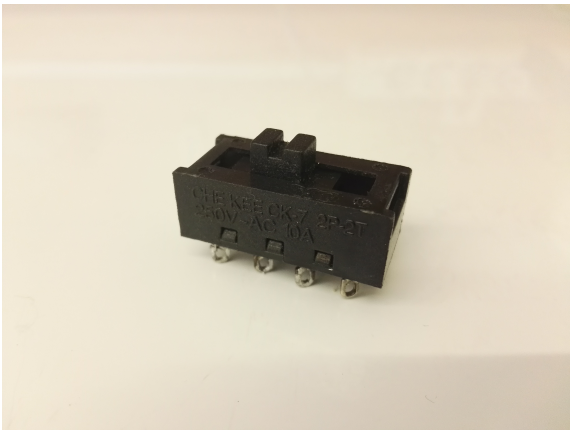


Figura 5.19: Interruptor ON-OFF-ON para comutação de carregamento.

5.5.2 Saída de energia

Por outro lado, adicionaram-se mais aplicações à UPS, como duas saídas 5V CC 2A e 1A e uma saída de isqueiro 12V. Como foi visto no capítulo anterior nas simulações, foi necessário adquirir dois conversores abaixadores CC com saída 5V 2A e 1A [52] [53] e um conversor abaixador CC com saída 12V, assim como o conector fêmea de isqueiro.

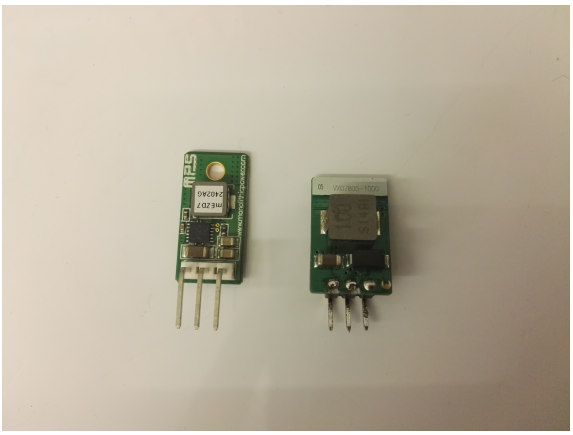


Figura 5.20: Conversores abaixadores CC 5V 2A e 1A.

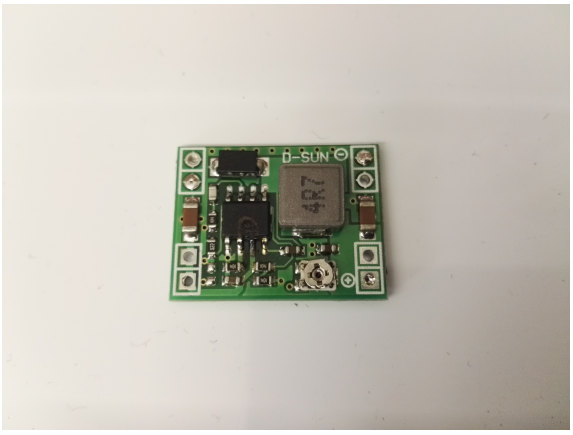


Figura 5.21: Conversor abaixador CC 12V.



Figura 5.22: Conector fêmea para saída de isqueiro 12V.

5.6 Restantes componentes

5.6.1 Interruptor

Com o intuito de ligar e desligar a UPS, foi essencial o uso de um interruptor. Assim, foi adquirido um interruptor de três polos capaz de suportar uma corrente contínua de 15A [54], visto que a bateria irá passar diretamente por este. A figura 5.23 mostra o interruptor usado. Foi necessário a escolha de um interruptor de três polos de modo a ser possível ligar a bateria, o divisor de tensão e o interruptor do inversor.



Figura 5.23: Interruptor 3 pólos 15A

5.6.2 Fusíveis

De modo a evitar danificações nos materiais, nomeadamente no inversor, na bateria e nos componentes como os MOSFETs, por exemplo, foi essencial adquirir um fusível. Assim, quando a carga entrar em curto-circuito, ou a sua potência for superior à suportada pelo inversor, o fusível



Figura 5.24: Fusível 15A



Figura 5.25: Porta-fusível 15A

quebra-se, evitando assim correntes superiores às suportadas pelos componentes. A datasheet do inversor refere que este suporta um pico de 600W, pelo que é necessário um fusível de ação rápida. Como a corrente máxima que passará pelo circuito é de 15A, optou-se pela utilização de um fusível rápido de 15A [55]. A *datasheet* deste refere que demora cerca de 4s a quebrar-se caso a corrente seja de 30A. De igual forma, foi essencial selecionar um porta-fusível que suportasse uma corrente de 15A [56]. As figuras 5.24 e 5.25 mostram os componentes adquiridos.

5.6.3 Tomadas

Por último, foi necessário adquirir duas tomadas CA, uma para a entrada na UPS, que ligará à fonte de alimentação, e outra para a saída, que ligará ao inversor.

Para a entrada foi escolhido o *plug* de alimentação CA [57] como mostra a figura 5.26. Já para a sua saída, optou-se pelo o *socket* AC representado na figura 5.27.



Figura 5.26: *Plug* de alimentação AC



Figura 5.27: *Socket* AC de saída

5.6.3.1 Caixa

Para a estrutura externa foi escolhida uma caixa de metal, a qual irá conter todo o material. A sua escolha recaiu numa caixa de metal para equipamentos eletrónicos (figura 5.28) pois estava disponível no laboratório do Departamento da Faculdade.

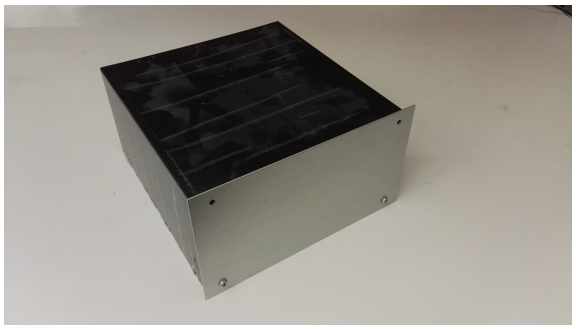


Figura 5.28: Caixa de metal para equipamentos eletrónicos.

5.7 Esquema final

Após a escolha de todos os componentes que integrarão a UPS, dimensionou-se, de seguida, o esquema de controlo final com todos os materiais escolhidos do requisito obrigatório e desejável. Assim, a figura 5.29 mostra o esquema final.

A presença do interruptor *INT* permite ao utilizador selecionar que tipo de carregamento pretende, se pela rede elétrica ou pelo isqueiro do automóvel, sendo necessário, neste último, um conversor elevador de 12V para 26V, já referido na secção 5.5.1. Foram também adicionadas as três saídas do requisito desejável, nomeadamente a saída de isqueiro 12V que necessita de um conversor CC abaixador (figura 5.21) e as saídas 5V CC 1A e 2A. As datasheets destes dois últimos conversores referem que é necessário um condensador na entrada de cada conversor, assim como um condensador nas suas saídas. Os valores dos condensadores presentes na figura 5.29 correspondem aos das *datasheets*. Foi ainda adicionado à entrada do inversor um condensador de modo a absorver picos de tensão assim que o sistema é ligado. Por outro lado, este condensador também ajuda a alimentar o inversor durante a comutação da rede elétrica para a bateria. Por fim, o Arduino será alimentado por um conversor abaixador (figura 5.30) [58] que por sua vez estará ligado diretamente à bateria, visto que esta terá sempre tensão. Por último, foi adicionado mais um fusível, $F2$, à entrada da fonte. A *datasheet* desta refere que tem um consumo máximo de 3,4A, pelo que foi dimensionado um fusível de 3,4A [59]. É de salientar a presença do interruptor de três polos $S1$ assim como o fusível de 15A $F1$.

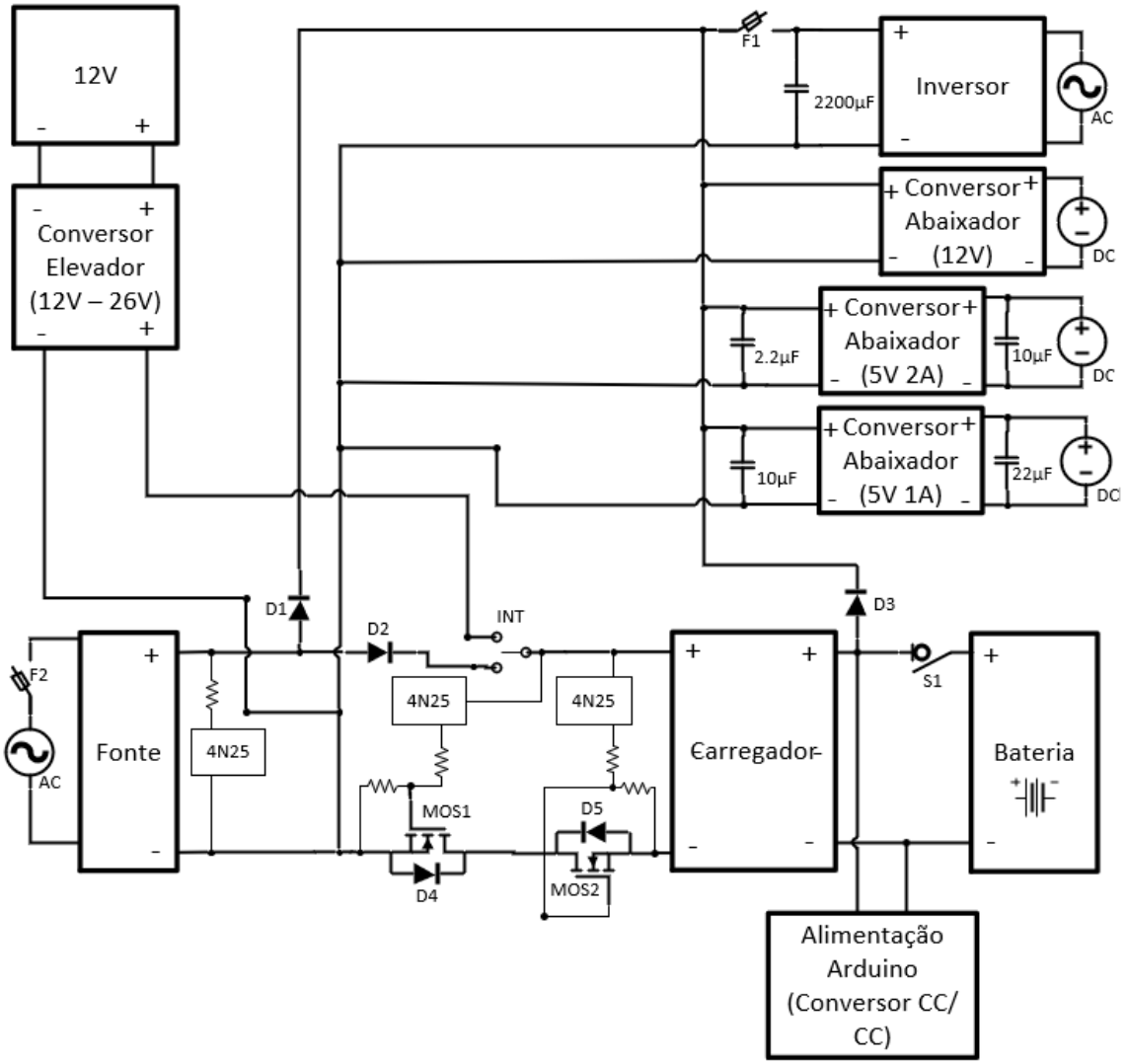


Figura 5.29: Caixa de metal para equipamentos eletrónicos

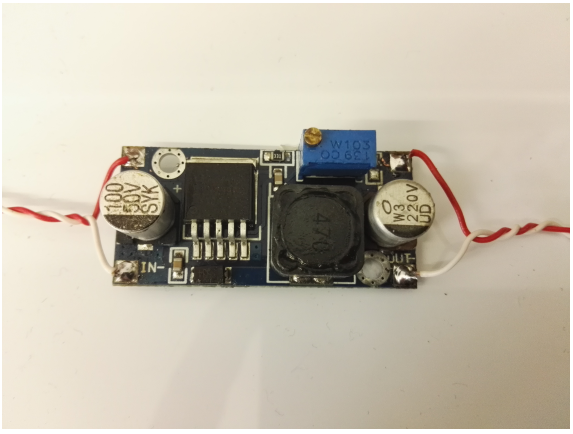


Figura 5.30: Conversor CC abaixador LM2596 para alimentação do Arduino.

5.8 Montagem e teste

De seguida, procedeu-se à montagem da UPS, assim como ao ensaio de várias etapas. Primeiramente, foi necessário perceber como os materiais iriam ficar expostos. A figura 5.31 mostra a caixa semi-desmontada com alguns dos materiais dispostos. Como o carregador e o conversor elevador possuem duas bobinas, foi necessário separá-los de modo a que as correntes eletromagnéticas provenientes das bobinas não se interfiram entre si. Assim, a bateria teria de ficar no espaço restante, no seu meio.

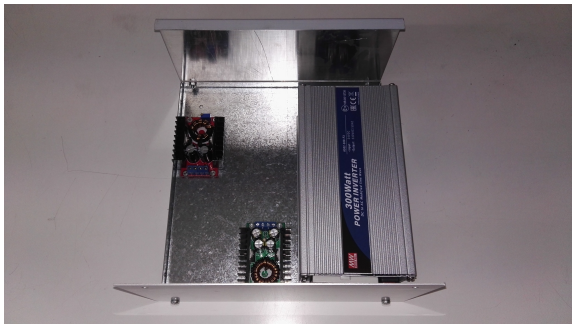


Figura 5.31: Disposição inicial de alguns materiais.

5.8.1 Bateria

Iniciou-se a montagem da bateria com configuração 6S4P. A células constituintes da bateria foram soldadas por pontos com uma liga de níquel, obtendo-se um paralelepípedo com dimensões ideais para preencher o seu espaço dentro da caixa (figura 5.32). De seguida, foi adicionado o sistema de equilíbrio passivo. A ligação das células ao sistema seguiu o código de cores das resistências, visível na figura 5.33. Isto é, a primeira célula foi ligada com fio castanho. A segunda célula foi ligada com fio vermelho, seguindo-se o fio laranja, amarelo, verde e azul. Este último, à semelhança da massa, foi ligado com cabo de secção $1.5mm^2$ de modo a suportar uma corrente de 15A.

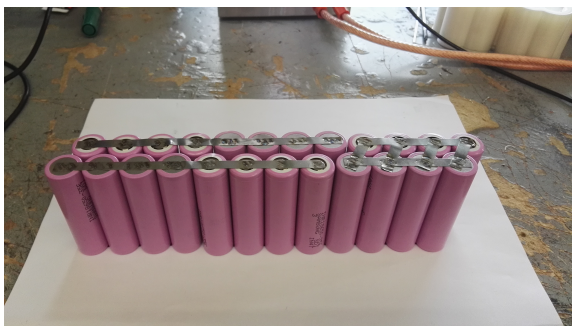


Figura 5.32: Construção da bateria.

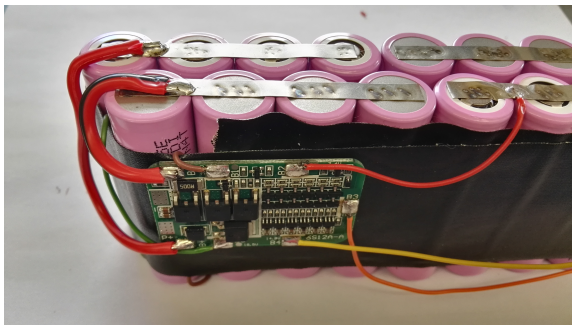


Figura 5.33: Sistema de equilíbrio passivo montado na bateria.

5.8.2 Teste

De seguida, procedeu-se à simulação do sistema com o requisito obrigatório, visível na figura 5.34.

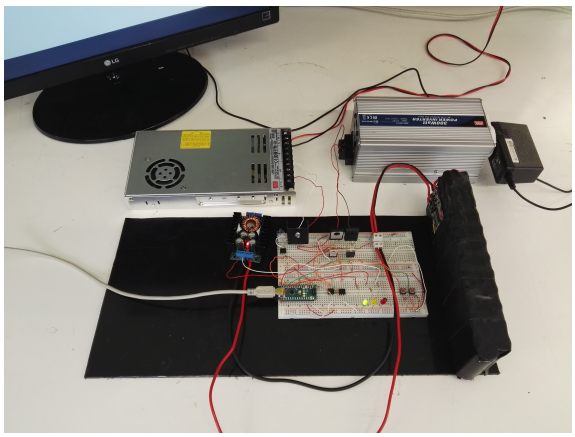


Figura 5.34: Teste do circuito proposto

Para a simulação do sistema em estudo, foram adquiridas duas *breadboards* para montar o circuito proposto inicialmente (figura 5.6). Os opto-isoladores foram ligados ao Arduino através das portas digitais, pois pretende-se apenas sinais binários para os ativar ou desativar. Já para o opto-isolador da fonte foi usada uma resistência *Pull-Down*. Assim, quando a fonte está a receber energia, o opto-isolador ativa a entrada digital do Arduino. Para simular as anomalias,

foram usados dois botões na *breadboard*. Quando se ativa um botão, o sistema reage nos opto-isoladores, que por sua vez desativam os MOSFETs, desativando o carregador ou as baterias, conforme o código usado. Por outro lado, foram utilizados três LEDs para simular o estado da UPS. Isto é, o LED verde indica que a UPS está a receber energia da fonte elétrica. Quando se desliga da tomada, a UPS comuta o seu controlo imediatamente para as baterias, acendendo o LED amarelo e desativando o LED verde. Caso haja uma anomalia (pressionando um dos botões), o sistema ativa o LED vermelho.

As figuras 5.35 e 5.36 mostram a simulação usando como carga o monitor do computador. Devido à baixa corrente suportada pelas *breadboards*, foi necessário uma carga com baixa corrente, pelo que o monitor foi a carga escolhida (1,1A). Na primeira figura, é possível ver o sistema ligado à tomada com o LED verde ativo, assim como o LED vermelho do carregador indicando que está a carregar a bateria. Quando se desliga da tomada, o Arduino ativa o LED amarelo e o carregador deixa de carregar, acendendo o LED azul, como mostra a figura 5.36.

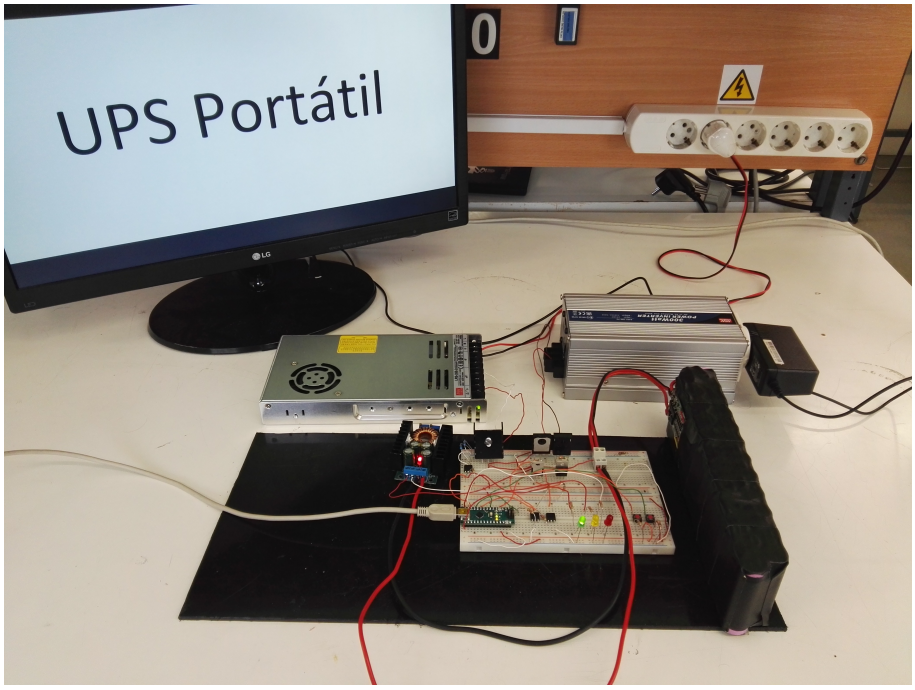


Figura 5.35: Teste do circuito proposto.

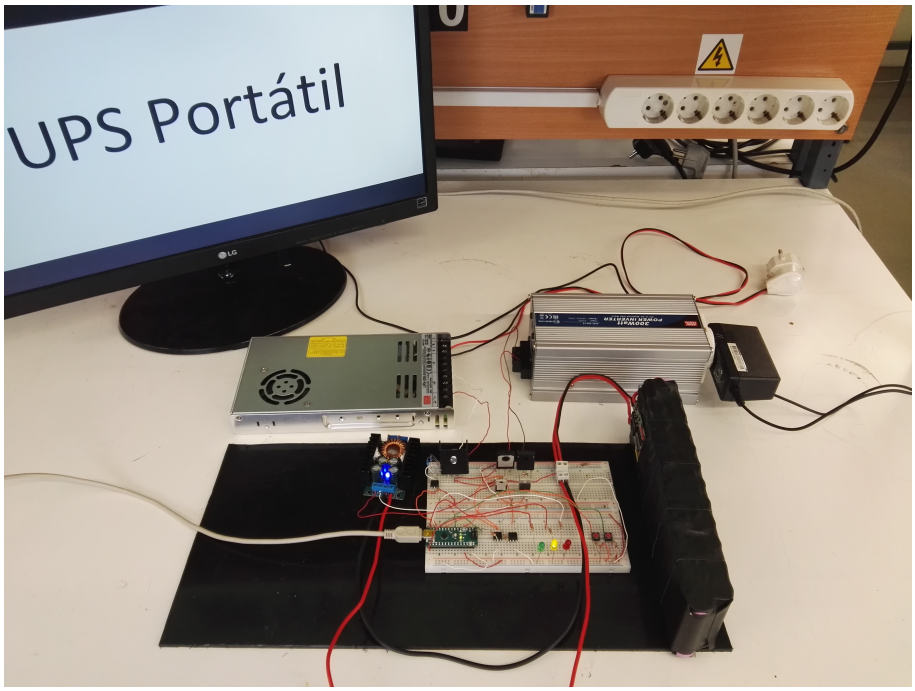


Figura 5.36: Teste do circuito proposto.

Por último, foi adicionado um ecrã ao Arduino, o qual tem como objetivo avisar o utilizador do estado da UPS, da bateria e das anomalias.

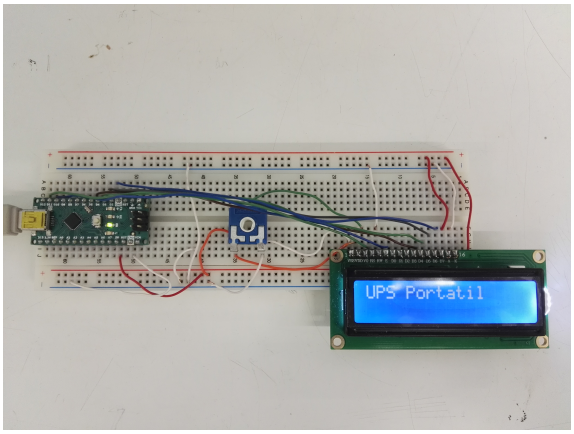


Figura 5.37: Arduino com ecrã.

5.8.3 Placa

Após a validação do sistema, foi desenhado o circuito para *PCB*. Para dimensionar o tamanho da placa (*PCB*), devido à limitação da caixa, os componentes foram posicionados já com a bateria montada, como mostra a figura 5.38. Deste modo, a placa apenas pode ter de dimensões um máximo de 21,5cm por 9,5cm ficando na parte superior da bateria, lateralmente à fonte.



Figura 5.38: Posição de alguns materiais na estrutura externa.

Para o desenho em *PCB* foi usado o software **Eagle**. Assim, procedeu-se ao desenho do esquema, como mostra a figura 5.39.

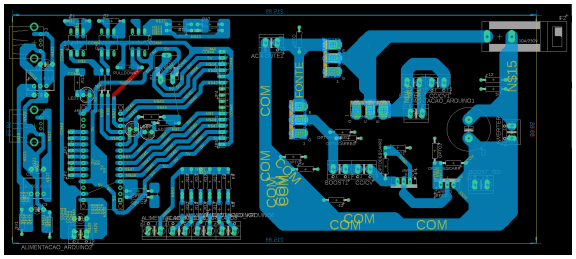


Figura 5.39: Desenho da placa no software **Eagle**.

Foi essencial separar a parte de controlo da parte de potência para que as correntes de potência não influenciem o sistema de controlo. Como a corrente máxima da parte de potência será de 15A foi necessário desenhar as pistas com uma secção de $5mm^2$. É de notar que o fusível dimensionado anteriormente foi colocado antes das saídas. Já os conversores 5V CC encontram-se do lado esquerdo da placa, que terão como saídas portas USB na parte frontal da UPS, facilitando a sua acessibilidade ao utilizador.

A figura 5.40 mostra o desenho já impresso em PCB.

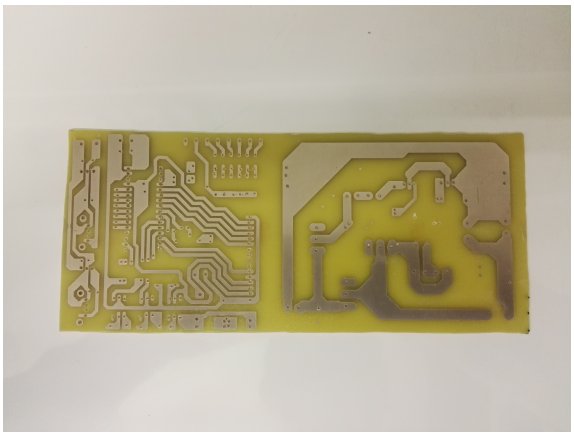


Figura 5.40: Circuito impresso em *PCB*.

5.8.4 Montagem

De seguida, procedeu-se à soldagem dos componentes (figura 5.41). Para os ligadores foram usados conetores de 16A disponíveis no Departamento da Faculdade. Foram também usados dissipadores nos díodos assim como nos MOSFETs, para permitir uma melhor dissipação de calor.

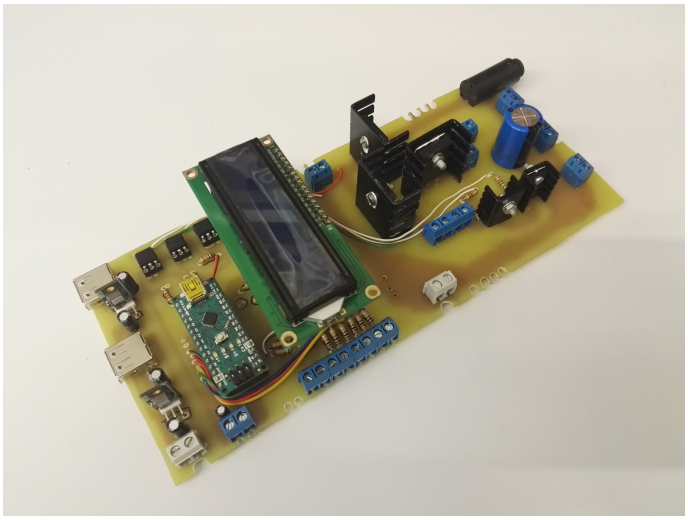


Figura 5.41: *PCB* com os componentes dimensionados.

Quanto à bateria, foram inseridos os termístores para a leitura da temperatura assim como os fios para o divisor de tensão que irá ligar ao Arduino, respeitando, mais uma vez, o código de cores (figura 5.42).

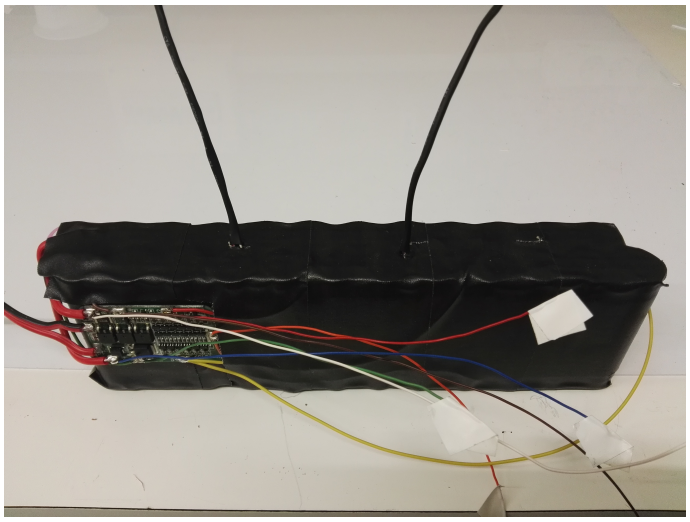


Figura 5.42: Bateria com sensores de temperatura e fios para divisor de tensão.

De seguida, iniciou-se a construção final da UPS. Por motivos de segurança, era necessário ligar a estrutura metálica da caixa à terra, pelo que o inversor, assim como a fonte, foram fixados com chapas metálicas à caixa. Por conseguinte, o carregador, o conversor elevador 12V para o carregamento da bateria assim como o seu conector de entrada foram isolados da caixa. Para isso, foi fixado nas bases dos conversores duas chapas em PVC de modo a isolá-los da caixa. Já o conector foi isolado com uma base de acrilíco.

Na figura 5.43 é possível ver a construção final da UPS. De seguida, foi inserido o código final no Arduino.



Figura 5.43: Protótipo da UPS Portátil.

5.8.5 Código

Para facilitar a sua compreensão, foi modelado, segundo a norma UML, uma máquina de estados que correspondesse ao comportamento pretendido, como mostra a figura 5.44.

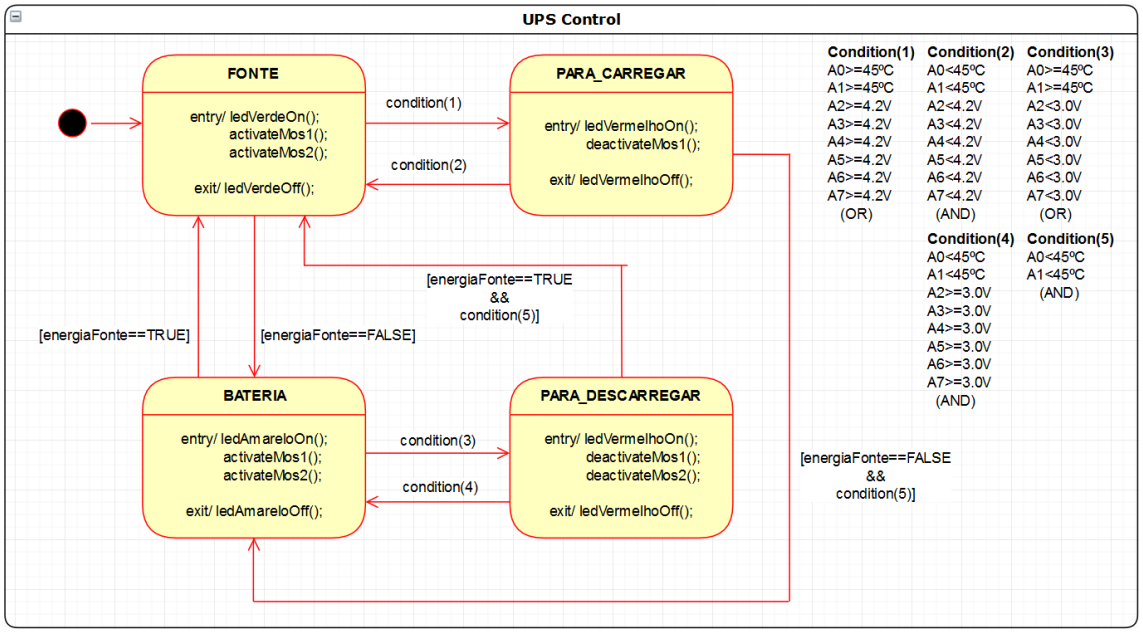


Figura 5.44: Máquina de estados do sistema a implementar.

O sistema de controlo inicia no estado $FONTE$, o qual representa a UPS ligada à fonte de energia. Neste estado, a UPS acende o LED verde, indicando ao utilizador que está a receber energia da rede elétrica. Por outro lado, o MOSFET $MOS1$ e $MOS2$ encontram-se ambos ativos, permitindo o carregamento da bateria assim como o seu descarregamento instantâneo quando a UPS deixa de receber energia da fonte, como já referido na secção 5.4.1.

Se a UPS for desligada da fonte, ou se for ligada num local remoto, o opto-isolador da fonte não conduz energia, pelo que o Arduino vai detetar que a UPS não está a receber energia. Assim, o sistema de controlo transita para o estado *BATERIA* que indica que a UPS está a ser alimentada pela sua bateria, desativando o LED verde. Neste estado o LED amarelo é ligado indicando ao utilizador que a UPS está a funcionar apenas com a sua bateria. Por sua vez, o MOSFET *MOS1* e *MOS2* encontram-se igualmente ativos caso seja necessária a rápida transição para o estado anterior quando a UPS for ligada à rede elétrica.

Caso o sistema se encontre no estado $FONTE$ e o Arduino detete pelo divisor de tensão que algumas das células excedeu a sua tensão máxima durante o carregamento, ou a temperatura da bateria excedeu os 45^{o}C (temperatura máxima das células referida na datasheet), o sistema de controlo transita para o estado *PARA_CARREGAR* (condição(1)). Neste estado, o Arduino ativa o LED vermelho e desativa o MOSFET1, impedindo o sobrecarregamento da bateria, assim como o seu sobreaquecimento. Para sair deste estado, a temperatura das células, assim como a sua tensão, têm de diminuir. Por outro lado, o sistema de controlo também pode sair deste estado se a UPS

for desligada da fonte. Deste modo, o uso da bateria irá descarregar as células. É de salientar que a temperatura da bateria tem de estar, de igual modo, a baixo do seu limite máximo (condição(5)).

Se o sistema de controlo se encontrar no estado *BATERIA*, e se uma das células atingir os 3V, ou se a temperatura ultrapassar os 45^{o}C (condição(3)), o estado transita para *PARA_DESCARREGAR*, desativando o MOSFET2, impedindo o descarregamento da bateria ou o seu sobreaquecimento. O LED vermelho é ativado. Por outro lado, o MOSFET1 também é desativado, impedindo que a bateria se carregue quando a UPS for ligada à rede elétrica, pois a sua temperatura pode ter excedido o seu valor máximo. Para sair deste estado, o valor das células tem de ser superior a 3V, assim como a temperatura necessita de diminuir para um valor inferior a 45^{o}C. Caso a UPS seja ligada à fonte, a temperatura tem de estar em níveis recomendados, como já referido, dando início ao seu carregamento através do MOSFET *MOS1* que é ativado no estado $FONTE$.

O código foi gerado pela aplicação da dissertação [60], que tem como objetivo a geração de código de forma automática para ser implementado em sistemas embebidos de modelos de máquinas de estados. Assim, o código desta dissertação serviu também para a validação da aplicação.

Para a compilação do programa no Arduino foi usado o software **Arduino**. O código está presente no Anexo A.

Inicialmente, o código é iniciado com as variáveis necessárias para o voltímetro, para os sensores de temperatura e para o ecrã do Arduino.

De seguida, é implementada a medição da temperatura, com as variáveis já iniciadas anteriormente. Como o termístor é uma resistência variável, que varia a sua resistência conforme a temperatura, este é colocado em série com uma resistência. De seguida, o Arduino lê a tensão no ponto médio do divisor de tensão, obtendo, assim, o valor da tensão. Este princípio foi igualmente usado para o voltímetro, como mostra a figura 5.14. Deste modo, no código, é obtido o valor da tensão pela porta analógica $A0$. Por fim, é obtido o valor da temperatura $T1$ com duas casas decimais, declarado nas variáveis iniciais, através das equações anteriores. De seguida, este valor é guardado numa variável inteira $T11$. Este passo é essencial pois será necessário usar o valor da temperatura até às unidades. Como existem dois sensores, este código foi multiplicado.

Para o voltímetro, através do divisor de tensão para as seis células, são obtidas dez amostras de cada porta analógica, correspondendo a cada célula, de modo a obter uma maior precisão. De seguida, é obtida a média das amostras de cada porta analógica. O valor 4,583 representa o valor de tensão da porta *Vin* do Arduino. De seguida, o valor obtido é multiplicado pelo valor da tensão no divisor de tensão de cada porta analógica, obtendo-se, assim, a leitura dos valor de tensão de cada célula. Por fim, as variáveis do número de amostras são reiniciadas para o código realizar uma nova leitura num próximo ciclo.

Foi também necessário guardar os valores independentes da tensão nas variáveis $cell1$, $cell2$, etc, como se verá mais à frente. Foi ainda fundamental obter a percentagem da bateria, tendo sido esta variável guardada como $total$.

De seguida, são apresentadas as condições correspondentes à maquina de estados da figura 5.44. Caso uma das células ultrapasse o seu valor de tensão máximo, ou se a temperatura exceder os 45^{o}C, a *condicao*1 retorna um valor *true*, indicando que foi ativada. Se todas as células obtiverem um valor de tensão inferior a 4,24V, assim como a sua temperatura se mantiver abaixo dos 45^{o}C, a *condicao*2 é ativada.

De seguida, são definidas as ações dos estados, assim como as suas portas de entrada e saída.

Se a UPS se encontrar ligada à fonte e nenhuma das condições for ativada, o código estará no estado $FONTE$. O ecrã dirá "UPS Portátil"e mostrará a percentagem da bateria calculada anteriormente através da variável $total$. Também indicará as temperaturas da bateria. Devido à limitação de espaço do ecrã, foi necessário mostrar as temperaturas até às unidades, através das variáveis $T11$ e $T22$, também referido anteriormente. Por outro lado, é ativado neste estado o $MOS1$ e $MOS2$ responsáveis pelo carregamento ou descarregamento da bateria. Por fim, o LED verde também é ativado. Neste estado, apenas podem ser ativadas duas condições, transitando para outros estados, como mostra a figura 5.44. Deste modo, as condições são também definidas. Assim que ocorre a transição, o LED verde desliga-se.

De seguida, é mostrado o estado *PARA_CARREGAR*. Neste estado, o $MOS1$ é desativado, impedindo o sobrecarregamento da bateria. O LED vermelho fica ativo. O ecrã indicará "Anomalia", assim como a sua causa, se foi a bateria que sobrecarregou ou a temperatura. Mais uma vez, são definidas as condições para o qual o estado poderá transitar.

Por último, mostram-se os restantes dois estados, sendo similares aos apresentados anteriormente.

5.8.6 Teste final

Após o código gerado, este foi introduzido no Arduino, procedendo-se, de seguida, ao teste final da UPS. Este teste foi realizado com a UPS ligada à rede (estado $FONTE$), desligada da rede (estado *BATERIA*) e com a bateria desligada (estado *PARA_DESCARREGAMENTO*). No estado *PARA_DESCARREGAMENTO*, o divisor de tensão do voltímetro indicará 0V para todas as células.



Figura 5.45: UPS ligada à rede - estado *FONTE*.



Figura 5.46: UPS desligada da rede - estado *BATERIA*.



Figura 5.47: UPS desligada da rede e com a bateria desligada - estado *PARA_DESCARREGAR*.

Por último, a UPS foi ligada ao computador o qual conseguiu alimentar, como mostra a figura 5.48.



Figura 5.48: Teste final usando um computador como carga.

5.9 Análise de mercado

Nesta secção, foi efetuada uma análise ao custo total do protótipo e às suas propriedades (tabelas 5.1 e 5.2), assim como uma análise de mercado às UPS (tabela 5.3). Da análise de mercado às UPS conclui-se que as UPS Portáteis são mais caras que as fixas. Isso deve-se ao custo das baterias, pois são de lítio. Por outro lado, as UPS fixas conseguem fornecer maior potência. Já o seu peso é extremamente pesado para a sua capacidade, pois as baterias de ácido-chumbo são maiores e mais pesadas (tabela 2.2).

Material	Valor (€)	Quantidade	Valor total (€)
Fonte MeanWell LRS-250-24	33,85	1	33,85
Inversor MeanWell A-302-300-F3	50,43	1	50,43
Célula Samsung INR18650-35E	3,95	24	94,8
Liga de níquel para células de Li-Ion	2	1	2
Sistema de equilíbrio passivo	6	1	6
Conversor elevador 12V	4,25	1	4,25
Carregador Conversor abaixador 300W	9	1	9
Conversor abaixador 5V CC 1A	2,37	1	2,37
Conversor abaixador 5V CC 2A	7,06	1	7,06
Conversor abaixador CC LM2596	1,19	1	1,19
Conversor abaixador 12V CC	3,75	1	3,75
Termistor NTC 10K	0,69	2	1,38
Interruptor 15A 3pólos	16,50	1	16,50
Plug AC	2,10	1	2,10
Socket AC	7,24	1	7,24
Fusíveis	0,39	2	0,78
Porta-fusíveis	4,59	2	9,18
Conector isqueiro macho	4,99	1	4,99
Conector isqueiro femea	2,10	1	2,10
Caixa metal	(*)	1	(*)
Condensador	(*)	5	(*)
Conector 16A	(*)	16	(*)
Arduino	(*)	1	(*)
Ecrã Arduino	(*)	1	(*)
Díodo E40ED1	(*)	3	(*)
MOSFET PSMN9R5	(*)	2	(*)
Dissipador	(*)	3	(*)
USB Fêmea	(*)	2	(*)
Resistência	(*)	28	(*)
Opto-Isolador 4N25	(*)	3	(*)
Cabo secção $1,5mm^2$	(*)	2m	(*)
Conectores para entrada 12V	(*)	2	(*)
LED	(*)	3	(*)
Custo Total			258,97€

Tabela 5.1: Custo total do protótipo

(*) - disponível no Departamento da Faculdade

Propriedades	**Valor**
Autonomia	289 Wh
Potência	300 W
Massa	3,3 kg
Dimensões	22cm x 21cm x 12cm
Custo	258,97€

Tabela 5.2: Propriedades do protótipo construído.

Portátil	**Modelo**	**Autonomia (Wh)**	**Potência (W)**	**Saída (CA)**	**Saída (CC)**	**Saída (12V)**	**Entrada (12V)**	**Peso (kg)**	**Custo (€)**
Sim	Protótipo UPS Portátil	289 (Li-Ion)	300	Sim	Sim	Sim	Sim	3,95	258,97
Sim	Chafon UPS008	288 (Li-Ion)	500	Sim	Sim	Sim	Sim	3,3	400
Sim	Chafon UPS018	346 (Li-Ion)	500	Sim	Sim	Sim	Sim	3,5	800
Sim	Goal Zero Yeti 400	396 (Pb)	300	Sim	Sim	Sim	Não	7,4	600
Não	WOXTER 1200	84 (Pb)	720 (1200VA)	Não	Sim	Não	Não	10,5	120
Não	CYBERPOWER Value1200	168 (Pb)	720 (1200VA)	Não	Sim	Não	Não	11	220
Não	CYBERPOWER VALUE800	84 (Pb)	480 (800VA)	Não	Sim	Não	Não	5,2	100
Não	APC BACK BX1400UI	84 (Pb)	700 (1400VA)	Não	Sim	Não	Não	12	140
Não	NGS 240W	54 (Pb)	240 (400VA)	Não	Sim	Não	Não	4,37	50

Tabela 5.3: Análise de mercado para UPS

O protótipo da UPS Portátil desenvolvido nesta dissertação apresenta, assim, um preço de custo mais baixo relativo às UPS Portáteis existentes, sendo acessível ao consumidor, cumprindo, assim, o objetivo desta dissertação.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

No presente capítulo, apresentam-se as principais conclusões retiradas da realização desta dissertação intitulada "UPS Portátil", bem como, algumas sugestões para trabalhos futuros no desenvolvimento deste tema.

6.1 Satisfação dos Objetivos

A proposta da presente dissertação prende-se com o desenvolvimento e construção de uma Fonte de Energia Ininterruptível Portátil, respeitando alguns requisitos.

Este tema inicia-se com um obstáculo comum a todos os equipamentos eletrónicos portáteis. Esse obstáculo corresponde ao sistema de armazenamento de energia, pois este apresenta um elevado custo assim como a sua autonomia que muitas das vezes não vai de encontro à necessitada. Assim, foi feito um estudo das baterias existentes, assim como uma análise de mercado, a fim de se encontrar a solução mais viável para o consumidor.

De seguida, iniciou-se o estudo das topologias a usar, nomeadamente os conversores, pois estes elementos são fulcrais para o desenvolvimento da UPS. Depois de selecionadas as topologias a usar, simulou-se os sistemas de carregamento de energia e de descarregamento de energia cumprindo os requisitos iniciais para esta proposta.

Após a validação das simulações, procedeu-se à construção do protótipo da UPS com o sistema de armazenamento de energia proposto: bateria de Li-Ion. Contudo, foram impostas algumas restrições a nível de segurança e custo. De seguida, dimensionou-se todos os componentes a usar. Após a aquisição de todos os materiais, executou-se a construção do prototipo, passando por vários testes ao longo da sua implementação.

Por último, o protótipo foi testado confirmando o seu correto funcionamento, cumprindo todos os requisitos propostos com as limitações impostas.

6.2 Trabalho Futuro

Como a proposta inicial da dissertação era a construção de uma UPS com autonomia de 1kWh e uma potência de 2kW 230 CA, sugere-se os seguintes tópicos para trabalho futuro:

- **Bateria** – Construção de uma bateria com a autonomia desejada;
- **Simulações** – Implementar todas as simulações em materiais de modo a reduzir custos;
- **Conversores** – Construção de conversores com a potência desejada.

Anexo A

Anexos

A.1 Código

```
/*
  Code generated using StateMachine2C by jmarrafa
  For support contact josemarrafa3@gmail.com
  FEUP 2019
*/

// number of analog samples to take per reading for voltimeter
#define NUM_SAMPLES1 10
#define NUM_SAMPLES2 10
#define NUM_SAMPLES3 10
#define NUM_SAMPLES4 10
#define NUM_SAMPLES5 10
#define NUM_SAMPLES6 10

//lcd
#include <LiquidCrystal.h>

//voltimeter variables
int sum1 = 0, sum2 = 0, sum3 = 0, sum4 = 0, sum5 = 0, sum6 = 0, total;
unsigned char sample_count1 = 0, sample_count2 = 0, sample_count3 = 0,
    sample_count4 = 0, sample_count5 = 0, sample_count6 = 0;
float a=0.00, b=0.00, c=0.00, d=0.00, e=0.00, f=0.00;
float voltage1 = 0.0, voltage2 = 0.0, voltage3 = 0.0, voltage4 = 0.0, voltage5
    = 0.0, voltage6 = 0.0;
float cell1=0.00, cell2=0.00, cell3=0.00, cell4=0.00, cell5=0.00, cell6=0.00;

// temperature variables
int Vo1, Vo2, T11, T22;
float  R1 = 10000, R3 = 10000, logR2, R2, T1, R4, logR4, T2, c1 = 1.009249522e
    -03, c2 = 2.378405444e-04, c3 = 2.019202697e-07;


```

```
30
31 bool temperatureAnomaly=false;
32 bool voltageAnomaly=false;
33
34 //LCD variables
35 const int rs = 12, en = 11, d4 = 5, d5 = 4, d6 = 3, d7 = 2;
36 LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);
37
38
39 bool condicao(int cond_number)
40 {
41   //Temperature reading
42   Vo1 = analogRead(A0);
43   R2 = R1 * (1023.0 / (float)Vo1 - 1.0);
44   logR2 = log(R2);
45   T1 = (1.0 / (c1 + c2*logR2 + c3*logR2*logR2*logR2));
46   T1 = T1 - 273.15;
47   T11 = T1;
48
49   Vo2 = analogRead(A1);
50   R4 = R3 * (1023.0 / (float)Vo2 - 1.0);
51   logR4 = log(R4);
52   T2 = (1.0 / (c1 + c2*logR2 + c3*logR2*logR2*logR2));
53   T2 = T2 - 273.15;
54   T22 = T2;
55
56    //Voltimeter reading
57    // take a number of analog samples and add them up
58     while (sample_count1 < NUM_SAMPLES1) {
59         sum1 += analogRead(A2);
60         sample_count1++;
61         delay(50);
62     }
63     while (sample_count2 < NUM_SAMPLES2) {
64         sum2 += analogRead(A3);
65         sample_count2++;
66         delay(50);
67     }
68     while (sample_count3 < NUM_SAMPLES3) {
69         sum3 += analogRead(A4);
70         sample_count3++;
71         delay(50);
72     }
73     while (sample_count4 < NUM_SAMPLES4) {
74         sum4 += analogRead(A5);
75         sample_count4++;
76         delay(50);
77     }
78     while (sample_count5 < NUM_SAMPLES5) {
```

```
79          sum5 += analogRead(A6);
80          sample_count5++;
81          delay(50);
82      }
83      while (sample_count6 < NUM_SAMPLES6) {
84          sum6 += analogRead(A7);
85          sample_count6++;
86          delay(50);
87      }
88
89
90
91      voltage1 = ((float)sum1 / (float)NUM_SAMPLES1 * 4.568) / 1024.0;
92      voltage2 = ((float)sum2 / (float)NUM_SAMPLES2 * 4.568) / 1024.0;
93      voltage3 = ((float)sum3 / (float)NUM_SAMPLES3 * 4.568) / 1024.0;
94      voltage4 = ((float)sum4 / (float)NUM_SAMPLES4 * 4.568) / 1024.0;
95      voltage5 = ((float)sum5 / (float)NUM_SAMPLES5 * 4.568) / 1024.0;
96      voltage6 = ((float)sum6 / (float)NUM_SAMPLES6 * 4.568) / 1024.0;
97
98      a=voltage1 * 11.158;
99      b=voltage2 * 10.963;
100     c=voltage3 * 11.002;
101     d=voltage4 * 11.044;
102     e=voltage5 * 10.904;
103     f=voltage6 * 10.992;
104
105     sample_count1 = 0;
106     sample_count2 = 0;
107     sample_count3 = 0;
108     sample_count4 = 0;
109     sample_count5 = 0;
110     sample_count6 = 0;
111
112     sum1 = 0;
113     sum2 = 0;
114     sum3 = 0;
115     sum4 = 0;
116     sum5 = 0;
117     sum6 = 0;
118
119     cell1=a;
120     cell2=b-a;
121     cell3=c-b;
122     cell4=d-c;
123     cell5=e-d;
124     cell6=f-e;
125
126
127
```

```
128
129     //battery percentage
130     total = ((f-19.5)*100)/5.7;
131     Serial.println(f);
132     Serial.print(total);
133     Serial.println(" %");
134
135     /*TESTES*/
136     /*Serial.println("CELULA1:");
137     Serial.println(cell1);
138     Serial.println("CELULA2:");
139     Serial.println(cell2);
140     Serial.println("CELULA3:");
141     Serial.println(cell3);
142     Serial.println("CELULA4:");
143     Serial.println(cell4);
144     Serial.println("CELULA5:");
145     Serial.println(cell5);
146     Serial.println("CELULA6:");
147     Serial.println(cell6);*/
148 /*-------------------------*/
149
150
151     //conditions
152     if(cond_number==1)
153     {
154       if (cell1>=4.2 || cell2>=4.2 || cell3>=4.2 || cell4>=4.2 || cell5>=4.2 ||
      cell6>=4.2 || T1>=45 || T2>=45)
155       {
156         if(cell1>=4.2 || cell2>=4.2 || cell3>=4.2 || cell4>=4.2 || cell5>=4.2
    || cell6>=4.2)
157         {
158           voltageAnomaly = true;
159           temperatureAnomaly = false;
160         }
161         else
162         {
163           voltageAnomaly = false;
164           temperatureAnomaly = true;
165         }
166         return true;
167       }
168       else
169         return false;
170     }
171
172
173
174
```

```
175      if(cond_number==2)
176     {
177        if (cell1 <4.2 && cell2 <4.2 && cell3 <4.2 && cell4 <4.2 && cell5 <4.2 &&
    cell6 <4.2 && T1<45 && T2<45)
178          return true;
179       else
180          return false;
181     }
182
183      if(cond_number==3)
184     {
185        if (cell1 <3 || cell2 <3 || cell3 <3 || cell4 <3 || cell5 <3 || cell6 <3 || T1
    >=45 || T2>=45)
186        {
187         if (cell1 <3 || cell2 <3 || cell3 <3 || cell4 <3 || cell5 <3 || cell6 <3)
188         {
189           voltageAnomaly = true;
190           temperatureAnomaly = false;
191         }
192         else
193         {
194           voltageAnomaly = false;
195           temperatureAnomaly = true;
196         }
197         return true;
198        }
199       else
200          return false;
201     }
202
203      if(cond_number==4)
204     {
205        if (cell1 >=3 && cell2 >=3 && cell3 >=3 && cell4 >=3 && cell5 >=3 && cell6 >=3
     && T1<45 && T2<45)
206          return true;
207       else
208          return false;
209     }
210
211      if(cond_number==5)
212     {
213        if (T1<45 && T2<45)
214          return true;
215       else
216          return false;
217     }
218 }
219
220
```

```
221 /* ------------------------------------------------*/
222
223 //Define all the different inputs addresses
224 #define energiaFonte 10 //Insert here the address of port
225 //Define all the different outputs addresses
226 #define ledAmarelo 6 //Insert here the address of port
227 #define ledVerde 7 //Insert here the address of port
228 #define ledVermelho 13 //Insert here the address of port
229 #define Desc 8 //Insert here the address of port
230 #define Carr 9 //Insert here the address of port
231
232 //Declare possible states
233 typedef enum
234 {
235   FONTE,
236   PARA_CARREGAR,
237   BATERIA,
238   PARA_DESCARREGAR,
239   NUM_STATES
240 } stateNames;
241
242
243 int INIT=0;
244
245 void setup()
246 {
247   pinMode(energiaFonte, INPUT);
248   pinMode(ledAmarelo, OUTPUT);
249   pinMode(ledVerde, OUTPUT);
250   pinMode(ledVermelho, OUTPUT);
251   pinMode(Desc, OUTPUT);
252   pinMode(Carr, OUTPUT);
253   Serial.begin(9600);
254 }
255
256 //Declare initial state
257 stateNames currentState = FONTE;
258 unsigned long timerState = 0;
259 unsigned long previousMillis = 0;
260
261 void loop()
262 {
263   runSM();
264 }
265
266
267
268
269
```

```
270
271 void runSM()
272 {
273   unsigned long currentMillis = millis();
274   switch(currentState)
275   {
276     case FONTE:
277       if(INIT==0)
278       {
279         lcd.begin(16, 2);
280         lcd.print("UPS Portatil");
281         lcd.setCursor(0, 1);
282         lcd.print(total);
283         lcd.setCursor(3, 1);
284         lcd.print("%");
285         lcd.setCursor(5, 1);
286         lcd.print(T11);
287         lcd.setCursor(7, 1);
288         lcd.print("C");
289         lcd.setCursor(9, 1);
290         lcd.print(T22);
291         lcd.setCursor(11, 1);
292         lcd.print("C");
293         Serial.println("FONTE");
294         previousMillis = currentMillis;
295         digitalWrite(Desc, HIGH);
296         digitalWrite(Carr, HIGH);
297         digitalWrite(ledVerde, HIGH); //on entry action
298         INIT=1;
299       }
300       timerState = currentMillis -  previousMillis;
301       if(condicao(1))
302       {
303         currentState = PARA_CARREGAR;
304         digitalWrite(ledVerde, LOW); //exit action
305         INIT = 0; //resets the init indicator
306       }
307       if(digitalRead(energiaFonte) == LOW) //transition condition
308       {
309         currentState = BATERIA;
310         digitalWrite(ledVerde, LOW); //exit action
311         INIT = 0; //resets the init indicator
312       }
313       break;
314
315
316
317
318
```

```
319     case PARA_CARREGAR:
320       if(INIT==0)
321       {
322         lcd.begin(16, 2);
323         lcd.print("ANOMALIA");
324         if(voltageAnomaly == true)
325         {
326           lcd.setCursor(0, 1);
327           lcd.print("Tensao Bateria");
328         }
329         if(temperatureAnomaly == true)
330         {
331           lcd.setCursor(0, 1);
332           lcd.print("Temp");
333           lcd.setCursor(5, 1);
334           lcd.print(T11);
335           lcd.setCursor(7, 1);
336           lcd.print("C");
337           lcd.setCursor(9, 1);
338           lcd.print(T22);
339           lcd.setCursor(11, 1);
340           lcd.print("C");
341         }
342         Serial.println("PARA_CARREGAR");
343         previousMillis = currentMillis;
344         digitalWrite(Carr, LOW);
345         digitalWrite(Desc, HIGH);
346         digitalWrite(ledVermelho, HIGH); //on entry action
347         INIT=1;
348       }
349       timerState = currentMillis -  previousMillis;
350       if(condicao(2))
351       {
352         currentState = FONTE;
353         digitalWrite(ledVermelho, LOW); //exit action
354         INIT = 0; //resets the init indicator
355       }
356       if((digitalRead(energiaFonte)==LOW)&&condicao(5))
357       {
358         currentState = BATERIA;
359         digitalWrite(ledVermelho, LOW); //exit action
360         INIT = 0; //resets the init indicator
361       }
362       break;
363
364
365
366
367
```

```
368     case BATERIA:
369       if(INIT==0)
370       {
371         lcd.begin(16, 2);
372         lcd.print("BATERIA");
373         lcd.setCursor(0, 1);
374         lcd.print(total);
375         lcd.setCursor(3, 1);
376         lcd.print("%");
377         lcd.setCursor(5, 1);
378         lcd.print(T11);
379         lcd.setCursor(7, 1);
380         lcd.print("C");
381         lcd.setCursor(9, 1);
382         lcd.print(T22);
383         lcd.setCursor(11, 1);
384         lcd.print("C");
385         Serial.println("BATERIA");
386         previousMillis = currentMillis;
387         digitalWrite(Carr, HIGH);
388         digitalWrite(Desc, HIGH);
389         digitalWrite(ledAmarelo, HIGH); //on entry action
390         INIT=1;
391       }
392       timerState = currentMillis -  previousMillis;
393       if(digitalRead(energiaFonte) == HIGH) //transition condition
394       {
395         currentState = FONTE;
396         digitalWrite(ledAmarelo, LOW); //exit action
397         INIT = 0; //resets the init indicator
398       }
399       if(condicao(3))
400       {
401         currentState = PARA_DESCARREGAR;
402         digitalWrite(ledAmarelo, LOW); //exit action
403         INIT = 0; //resets the init indicator
404       }
405       break;
406
407
408
409
410
411     case PARA_DESCARREGAR:
412       if(INIT==0)
413       {
414         lcd.begin(16, 2);
415         lcd.print("ANOMALIA");
416         if(voltageAnomaly == true)
```

```
417         {
418           lcd.setCursor(0, 1);
419           lcd.print("Tensao Bateria");
420         }
421         if(temperatureAnomaly == true)
422         {
423           lcd.setCursor(0, 1);
424           lcd.print("Temp");
425           lcd.setCursor(5, 1);
426           lcd.print(T11);
427           lcd.setCursor(7, 1);
428           lcd.print("C");
429           lcd.setCursor(9, 1);
430           lcd.print(T22);
431           lcd.setCursor(11, 1);
432           lcd.print("C");
433         }
434         Serial.println("PARA DESCARREGAR");
435         previousMillis = currentMillis;
436         digitalWrite(Carr, LOW);
437         digitalWrite(Desc, LOW);
438         digitalWrite(ledVermelho, HIGH); //on entry action
439         INIT=1;
440       }
441       timerState = currentMillis - previousMillis;
442       if(digitalRead(energiaFonte)&&condicao(5))
443       {
444         currentState = FONTE;
445         digitalWrite(ledVermelho, LOW); //exit action
446         INIT = 0; //resets the init indicator
447       }
448       if(condicao(4))
449       {
450         currentState = BATERIA;
451         digitalWrite(ledVermelho, LOW); //exit action
452         INIT = 0; //resets the init indicator
453       }
454       break;
455
456     default: break;
457   }
458 }
```

Referências

[1] Adel Nasiri e Seyed Ahmad Hamidi. 19 - uninterruptible power supplies. Em Muhammad H. Rashid, editor, *Power Electronics Handbook (Fourth Edition)*, páginas 641 – 657. Butterworth-Heinemann, fourth edition edição, 2018.

[2] A.S. Kislovski. On uninterruptible dc power supply systems. Em R. ZWICKY, editor, *Control in Power Electronics and Electrical Drives 1983*, IFAC Symposia Series, páginas 691 – 696. Pergamon, Oxford, 1984.

[3] Muhammad Aamir, Kafeel Ahmed Kalwar, e Saad Mekhilef. Uninterruptible power supply (ups) system. *Renewable and sustainable energy reviews*, 58:1395–1410, 2016.

[4] Ned Mohan e Tore M Undeland. *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons, 2007.

[5] Thomas B Reddy. Linden's handbook of batteries. *New York, NY: McGraw-Hill*, página 1200, 2011.

[6] Zhengcheng Zhang e Sheng Shui Zhang. *Rechargeable Batteries*. Springer, 2015.

[7] Tristan Juergens, Michael A Ruderman, e Ralph J Brodd. A new high rate lead acid battery. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 9(5):7–9, 1994.

[8] Christian Julien, Alain Mauger, Ashok Vijh, e Karim Zaghib. Lithium batteries. Em *Lithium Batteries*, páginas 29–68. Springer, 2016.

[9] Muhammad H Rashid. *Power electronics handbook*. Butterworth-Heinemann, 2017.

[10] Malte Mohr e Friedrich W Fuchs. Comparison of three phase current source inverters and voltage source inverters linked with dc to dc boost converters for fuel cell generation systems. Em *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, páginas 10–pp. IEEE, 2005.

[11] Joachim Holtz. Pulsewidth modulation for electronic power conversion. *Proceedings of the IEEE*, 82(8):1194–1214, 1994.

[12] Anupam Mishra, Sunil Panda, et al. *Control of voltage source inverters using PWM/SVPWM for adjustable speed drive applications*. Tese de doutoramento, 2009.

[13] Ahmed G Radwan, Ahmed A Emira, Amr M AbdelAty, e Ahmad Taher Azar. Modeling and analysis of fractional order dc-dc converter. *ISA transactions*, 82:184–199, 2018.

[14] F Alonge, M Pucci, R Rabbeni, e G Vitale. Dynamic modelling of a quadratic dc/dc single-switch boost converter. *Electric Power Systems Research*, 152:130–139, 2017.

[15] Vratislav Michal. Dynamic duty-cycle limitation of the boost dc/dc converter allowing maximal output power operations. Em *Applied Electronics (AE), 2016 International Conference on*, páginas 177–182. IEEE, 2016.

[16] Wei He, Carlos Abraham Soriano-Rangel, Romeo Ortega, Alessandro Astolfi, Fernando Mancilla-David, e Shihua Li. Energy shaping control for buck–boost converters with unknown constant power load. *Control Engineering Practice*, 74:33–43, 2018.

[17] Jesus E Valdez-Resendiz, Victor M Sanchez, Julio C Rosas-Caro, Jonathan C Mayo-Maldonado, JM Sierra, e Romeli Barbosa. Continuous input-current buck-boost dc-dc converter for pem fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(51):30389–30399, 2017.

[18] Charles J Mills. Booster with switch actuated cable decoupler, Maio 2 2000. US Patent 6,057,667.

[19] I Peter Kellett, John R Erickson, e Edward T Cline III. Battery booster, Junho 10 1997. US Patent 5,637,978.

[20] J David Vonderhaar. Booster pack with storage capacitor, Março 21 2006. US Patent 7,015,674.

[21] Kraig Bottemiller, Darin Edward Gerhart, Cory Lappi, e William Jared Walker. Residual capacitance performance booster, Novembro 29 2016. US Patent 9,508,399.

[22] H Robert Bosch Gmb. Automotive electrics: Automotive electronics, 2004.

[23] VARTA. Datasheet, varta blue dynamic 552 400 047.

[24] Robert Huggins. *Advanced batteries: materials science aspects*. Springer Science & Business Media, 2008.

[25] Ultracell. Datasheet, ul 5-12, 12v 5ah, 2006.

[26] LLC Energizer Brands. Nickel metal hydride (nimh), handbook and application manual, 2018.

[27] Nicholas Picciano. *Battery Aging and Characterization of Nickel Metal Hydride and Lead-Acid Batteries*. Tese de doutoramento, The Ohio State University, 2007.

[28] Gramlich. Datasheet, ansmann aa 2850mah, 5035021, 2009.

[29] Valer Pop, Henk Jan Bergveld, Dmitry Danilov, Paul PL Regtien, e Peter HL Notten. *Battery management systems: Accurate state-of-charge indication for battery-powered applications*, volume 9. Springer Science & Business Media, 2008.

[30] W. F. Bentley. Cell balancing considerations for lithium-ion battery systems. Em *The Twelfth Annual Battery Conference on Applications and Advances*, páginas 223–226, Jan 1997.

[31] Guoning Xu, Xiaowei Du, Zhaojie Li, Xiaojun Zhang, Minxin Zheng, Ying Miao, Yang Gao, e Qianshi Liu. Reliability design of battery management system for power battery. *Microelectronics Reliability*, 88:1286–1292, 2018.

[32] Min Chen e Gabriel A Rincón-Mora. Accurate, compact, and power-efficient li-ion battery charger circuit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 53(11):1180–1184, 2006.

[33] Fong-Cheng Yang, Chih-Chiang Chen, Jiann-Jong Chen, Yuh-Shyan Hwang, e Wen-Ta Lee. Hysteresis-current-controlled buck converter suitable for li-ion battery charger. Em *2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, volume 4, páginas 2723–2726. IEEE, 2006.

[34] Daowd Mohamed, Omar Noshin, VDB Peter, e VM Joeri. A review of passive and active battery balancing based on matlab/simulink. *Int. Rev. Electr. Eng.*, 2011.

[35] Valentin Muenzel, Julian de Hoog, Marcus Brazil, Doreen A Thomas, e Iven Mareels. Battery management using secondary loads: A novel integrated approach. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3):3924–3929, 2014.

[36] FIAT. *Manual, Fiat Barchetta 1997*.

[37] FORD. *Manual, Ford Galaxy 1998*.

[38] Battery Business Division Samsung SDI. *Datasheet, Samsung INR18650-35e*, 2015.

[39] Diogo Carneiro. Sistema de equilíbrio de células de bateria de iões de lítio do feup vec. Tese de mestrado, FEUP, "A Publicar", 2019.

[40] Andrew C Baughman e Mehdi Ferdowsi. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6):2277–2285, 2008.

[41] Andrew Baughman e Mehdi Ferdowsi. Double-tiered capacitive shuttling method for balancing series-connected batteries. Em *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, páginas 109–113. IEEE, 2005.

[42] Juergen K Steinke. Use of an lc filter to achieve a motor-friendly performance of the pwm voltage source inverter. *IEEE transactions on Energy Conversion*, 14(3):649–654, 1999.

[43] Hongwen He, Rui Xiong, Hongqiang Guo, e Shuchun Li. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 64:113–121, 2012.

[44] Marian P Kazmierkowski, Ramu Krishnan, Frede Blaabjerg, e JD Irwin. *Control in power electronics: selected problems*. Academic press, 2002.

[45] FEC. *Datasheet, OSKJ 300W*.

[46] MeanWell. *Datasheet, A-301/302-300*, 2007.

[47] MeanWell. *Datasheet, LRS-350 series, 350W Single Output Switching Power Supply*, 2018.

[48] Infineon. *Datasheet, IDW40E65D1*, 2013.

[49] nexperia. *Datasheet, PSMN955-100PS*, 2013.

[50] VISHAY. *Datasheet, Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection 4N25*, 2007.

[51] EPCOS. *Datasheet, NTC thermistors for temperature measurement*, 2006.

[52] MPS. *Datasheet, mEZD72402A Series, 4.5V - 36V Input, 2A, DC/DC Power Supply*, 2018.

[53] CUIINC. *Datasheet, VXO78-1000, NON-ISOLATED DC SWITCHING REGULATOR*, 2017.

[54] Carling Tech. *Datasheet, Tippette Tippette FULL SIZED ROCKER SWITCHES*, 2016.

[55] EATON. *Datasheet, GMA5 mm x 20 mm Fast-acting glass tube fuses*, 2017.

[56] LittlelFuse. *Datasheet, 345 HV Series Panel Mount Enclosed Fuse Holders*, 2017.

[57] TE Connectivity. *Datasheet, Corcom EMI/RFI Filter Product Overview*, 2011.

[58] ONsemi. *Datasheet,LM2596*, 2008.

[59] belGroup. *Datasheet,Type 5MF / 5MFP Fast Blow Fuse Series*, 2018.

[60] José Marrafa. Geração de código para máquina de estados em sistemas embebidos. Tese de mestrado, FEUP, "A Publicar", 2019.