



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Hugo Miguel Carvalho da Costa

## **Atuador e controlo em sistemas de irrigação agrícola**

**Atuador e controlo em sistemas de irrigação agrícola**

Hugo Miguel Carvalho da Costa

UMinho | 2014

Outubro de 2014



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Hugo Miguel Carvalho da Costa

**Atuador e controlo em sistemas de irrigação agrícola**

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e  
Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do  
**Professor Doutor Agostinho Gil Teixeira Lopes**

# DECLARAÇÃO

**Autor:** Hugo Miguel Carvalho da Costa

**Correio eletrónico:** [hugomiguel1504@hotmail.com](mailto:hugomiguel1504@hotmail.com)

**Telemóvel:** +351 914086363

**Número do cartão de cidadão:** 12600919 8ZY2

**Título da dissertação:** Atuador e controlo em sistemas de irrigação agrícola

**Ano de conclusão:** 2014

**Orientador:** Professor Doutor Agostinho Gil Teixeira Lopes

**Designação do Mestrado:** Ciclo de Estudo Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Departamento de Eletrónica Industrial

Escola de Engenharia

Universidade do Minho

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

# Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais e à minha irmã por estarem sempre a meu lado ao longo destes cinco anos de estudo e de esforço. Apoiaram, acreditaram e principalmente incentivaram-me a lutar pelos meus objetivos.

Quero agradecer à minha namorada por toda a dedicação e paciência. Por estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Doutor Gil Lopes, pela constante disponibilidade, apoio, colaboração e pela partilha de conhecimento. Pelas críticas e sugestões necessárias para a realização desta dissertação.

Agradeço aos meus colegas e amigos, pelos momentos vividos e partilhados ao longo destes anos. Um especial agradecimento ao meu colega e amigo Carlos Arantes, pelo companheirismo que demonstrou desde o primeiro dia em que ingressamos nesta Universidade.

Por último, agradeço a todas as pessoas que de algum modo contribuíram para a concretização desta etapa.

A todos, MUITO OBRIGADO!

## Agradecimentos

---

# Resumo

Atualmente existem vários sistemas de irrigação aplicados no setor agrícola que são totalmente ou parcialmente comandados pelo ser humano. Estes são colocados em funcionamento manualmente ou através de controladores que não possibilitam a avaliação do estado de funcionamento das válvulas que compõem o sistema. Estes sistemas mostram-se pouco eficientes na deteção de anomalias ocorridas com as válvulas. As anomalias podem provocar altas pressões hidráulicas na instalação de irrigação, podendo levar à destruição de parte da canalização e à conseqüente perda de um recurso. Alguns tipos de válvulas elétricas dependem diretamente da energia proveniente da rede elétrica. Este tipo de situação traz alguns inconvenientes, uma vez que implica a passagem de cablagem elétrica em vários pontos da plantação agrícola.

De modo a minimizar os problemas existentes em alguns sistemas de irrigação, pretende-se desenvolver uma válvula e um controlador que não dependam energeticamente da rede elétrica e um sistema *SCADA*. A válvula e o controlador devem ser alimentados através de um de dois elementos armazenadores de energia, uma bateria ou um módulo de ultracondensadores. Um painel fotovoltaico converterá a radiação solar em energia elétrica de modo a alimentar o controlador e a carregar os elementos armazenadores de energia. O sistema *SCADA* tem como objetivo permitir que um operador monitorize e comande remotamente todo o processo de uma instalação de irrigação.

O controlador desenvolvido mostrou-se capaz de controlar a válvula e o fluxo de energia proveniente do painel fotovoltaico por forma a permitir carregar os elementos armazenadores de energia. A válvula desenvolvida mostrou ter capacidade de resposta aos diferentes requisitos inerentes a uma válvula. O sistema *SCADA* permitiu criar uma *interface* intuitiva de controlo onde um operador pode criar um esquema representativo de uma instalação de irrigação física. Através do sistema desenvolvido o operador consegue controlar e monitorizar uma instalação de irrigação.

**Palavras-chave:** Controlo, Automação, *SCADA*, *MPPT*, energia, ultracondensadores, bateria, agricultura, irrigação.



# Abstract

Currently there are various irrigation systems used in agriculture which are completely or partially controlled by people. These systems are manually or mechanically controlled in such a way that assessing how well the valves work efficiently in these systems is difficult. Anomalies could occur which, in turn, might cause high hydraulic pressure in the irrigation installations leading to a partial destruction of the piping and, thus, to the loss of a resource. Some types of electric valves are directly dependent on the electric energy grid. This type of situation has its inconvenience due to the need of laying down electric cables at various points in the cultivated area.

The objective here is to develop a valve and a controller which are not energetically dependent on the electric grid, and a SCADA system. The valve and the controller need to be fed by one of two energy storage elements: a battery or an ultracapacitor module. A photovoltaic panel converts solar radiation into electric energy so that it can become the energy source for the controller and also it can charge the energy storage elements. The SCADA system aims to help an operator monitor and remotely control all of the irrigation installation process.

The developed controller has demonstrated its capability to control the valve and the flow of energy from the photovoltaic panel allowing the charge of the energy storage elements. The valve developed has also demonstrated being capable of responding to all of the different inherent requisites of a valve. The SCADA system allowed the creation of an intuitive control interface in which an operator could create a representative framework of the physical irrigation installation. Through the developed system, an operator can control and monitor an irrigation installation.

**Key Words:** control, automatism, SCADA, MPPT, energy, ultracapacitor, battery, agriculture, irrigation





---

# Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Índice de figuras.....	xiii
Lista de abreviaturas.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Proposta de trabalho a desenvolver.....	4
1.4.1. Válvula motorizada.....	4
1.4.2. Controlador energeticamente autónomo.....	4
1.4.3. Sistema de monitorização e controlo <i>SCADA</i> .....	5
1.5. Organização da dissertação.....	6
2. Estado da Arte.....	7
2.1. Sistemas de monitorização e controlo no setor agrícola.....	7
2.1.1. Modernização de canais de Rega.....	7
2.1.2. Sistema Neptuno da ABB.....	8
2.1.3. Sistemas de supervisão e controlo em estufas de vegetação.....	9
2.1.4. Sistema <i>ClimateMinder</i> .....	10
2.1.5. Projeto <i>GrapeLook</i> .....	11
2.1.6. Sistema de monitorização e controlo para o setor agrícola da <i>CTS</i> .....	12
2.2. Tecnologias que possibilitem a independência energética da rede elétrica.....	13
2.2.1. Painéis fotovoltaicos.....	13
2.2.2. Tecnologia <i>Windbelt</i> .....	15
2.2.3. Micro geradores eólicos de turbina.....	17
2.3. Válvulas usadas em sistemas de irrigação e atuadores elétricos.....	18
2.3.1. Atuadores de solenoide.....	19
2.3.2. Atuador de motor rotativo.....	19

## Índice

---

3.	Fundamentação Teórica .....	21
3.1.	Painéis fotovoltaicos .....	21
3.1.1.	Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício .....	21
3.1.2.	Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica .....	22
3.1.3.	Caraterísticas elétricas dos painéis fotovoltaicos .....	24
3.1.4.	Influência da radiação solar .....	27
3.1.5.	Influência da temperatura .....	28
3.2.	Conversores de potência CC-CC comutados.....	29
3.2.1.	Conversor <i>step-up-down</i> ou <i>buck-boost</i> .....	29
3.2.2.	Conversor <i>step-up</i> ou <i>boost</i> .....	32
3.2.3.	Conversor <i>step-down</i> ou <i>buck</i> .....	34
3.3.	Algoritmos <i>MPPT (Maximum Power Point Tracking)</i> .....	37
3.3.1.	Perturbação & Observação.....	37
3.3.2.	Condutância Incremental .....	39
3.3.3.	Tensão Constante .....	40
4.	Válvula motorizada e módulo de ultracondensadores .....	43
4.1.	Arquitetura e especificações .....	43
4.1.1.	Válvula motorizada.....	43
4.1.2.	Módulo de ultracondensadores .....	44
4.2.	Projeto .....	45
4.2.1.	Válvula motorizada.....	45
4.2.2.	Módulo de ultracondensadores .....	48
4.3.	Resultados .....	50
4.3.1.	Válvula motorizada.....	50
4.3.2.	Módulo de ultracondensadores .....	51
5.	Controlador energeticamente autónomo .....	53
5.1.	Arquitetura e especificações do controlador energeticamente autónomo.....	53
5.1.1.	Carregamento e balanceamento dos elementos armazenadores de energia ..	53
5.1.2.	Sistema de alimentação do controlador .....	54
5.1.3.	Controlo e alimentação da válvula motorizada .....	55
5.1.4.	Sistema de comunicação .....	55
5.2.	Projeto e modelos de simulação .....	56
5.2.1.	Carregamento e balanceamento dos elementos armazenadores de energia ..	56
5.2.1.1.	Carregamento dos elementos armazenadores .....	56

## Índice

---

5.2.1.2.	Balanceamento dos elementos armazenadores .....	63
5.2.1.3.	Controlador PI digital.....	64
5.2.1.4.	Controlador <i>MPPT</i> .....	66
5.2.2.	Sistema de alimentação do controlador .....	68
5.2.2.1.	Energia proveniente do painel .....	69
5.2.2.2.	Energia proveniente da bateria .....	69
5.2.2.3.	Energia proveniente do módulo de ultracondensadores.....	70
5.2.3.	Controlo e alimentação da válvula motorizada .....	70
5.2.3.1.	Alimentação da válvula.....	71
5.2.3.2.	Controlo da válvula .....	71
5.2.4.	Sistema de comunicação .....	71
5.2.4.1.	Configuração da rede.....	72
5.2.4.2.	Estrutura das tramas .....	73
5.3.	Resultados computacionais e experimentais .....	76
5.3.1.	Módulo de ultracondensadores como elemento armazenador de energia .....	76
5.3.2.	Bateria como elemento armazenador de energia .....	84
5.3.3.	Desempenho da válvula motorizada .....	89
5.3.4.	Sistema de comunicação .....	90
6.	Sistema <i>SCADA</i> .....	93
6.1.	Descrição e especificações do sistema <i>SCADA</i> .....	93
6.2.	Arquitetura e implementação do sistema <i>SCADA</i> .....	95
6.3.	Estrutura da base de dados .....	98
6.3.1.	Utilizadores.....	99
6.3.2.	Topologia da instalação.....	99
6.3.3.	Programação .....	101
6.3.4.	Registo de erros.....	102
6.4.	Algoritmo de definições de conexões.....	103
6.5.	Resultados de implementação .....	104
6.5.1.	Login e <i>interface</i> inicial .....	104
6.5.2.	Caraterização das instalações de irrigação .....	106
6.5.3.	Programação das instalações de irrigação.....	110
6.5.4.	Monitorização do estado da instalação .....	112
6.5.5.	Execução de programas ativos .....	115
7.	Conclusões e trabalho futuro .....	117

## Índice

---

Referências .....	121
Apêndices .....	127
Apêndice A.....	127
Apêndice B.....	128
Apêndice C .....	129
Apêndice D .....	130
Apêndice E.....	133
Apêndice F.....	135
Apêndice G .....	137

# Índice de figuras

Figura 1 - <i>Interface SCADA</i> - ABB [2].....	8
Figura 2 - Unidade de sensores e de processamento de dados [3].....	10
Figura 3 - <i>Interface</i> da aplicação SCADA [3].....	10
Figura 4 - Sistema de monitorização baseado num <i>web service</i> [4].....	11
Figura 5 - Imagem do serviço em funcionamento [5]. ....	12
Figura 6 - Sistema de irrigação pressurizada [6].....	13
Figura 7 - Imagem ilustrativa de uma célula fotovoltaica em um painel [7]. ....	14
Figura 8 - Produção de células fotovoltaicas por tecnologia [9]. ....	14
Figura 9 - Algumas tecnologias de células fotovoltaicas e os seus rendimentos [10].....	15
Figura 10 - Gerador eólico equipado com turbina [13]. ....	16
Figura 11 - Tecnologia Windbelt [11].....	16
Figura 12 - Micro geradores eólicos, o primeiro com turbina de eixo vertical e o segundo com turbina de eixo horizontal [16]. ....	17
Figura 13 - Válvula com atuador de solenoide [17].....	19
Figura 14 - Válvula com atuador de motor rotativo [17].....	20
Figura 15 - Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica [20]. ....	22
Figura 16 - Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica [21]. ....	22
Figura 17 - Especificações elétricas de um painel fotovoltaico [26]. ....	26
Figura 18 - Curva característica I-V (adaptada de [27]). ....	27
Figura 19 - Curvas características de um painel fotovoltaico para diferentes radiações solares (adaptada de [29]). ....	28
Figura 20 - Curvas características de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas (adaptada de [29]). 28	28
Figura 21 – Esquema elétrico do conversor <i>step-up-down</i> (adaptado de [30]).....	29
Figura 22 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor quando o <i>MOSFET S</i> se encontra em condução ou ao corte (adaptado de [30]). ....	30
Figura 23 - Formas de onda da tensão e da corrente na bobina, no diódo e no interruptor (adaptado de [30]). ....	31
Figura 24 - Esquema elétrico do conversor <i>step-up</i> (adaptado de [30]). ....	32
Figura 25 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor quando o <i>MOSFET S</i> se encontra em condução ou ao corte (adaptado de [30]). ....	32
Figura 26 - Formas de onda da tensão e da corrente na bobina, no diódo e no interruptor (adaptado de [30]). ....	34
Figura 27 - Esquema elétrico do conversor <i>step-down</i> (adaptado de [30]). ....	35
Figura 28 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor quando o <i>MOSFET S</i> se encontra em condução ou ao corte (adaptado de [30]). ....	35
Figura 29 - Formas de onda da tensão e da corrente na bobina, no diódo e no interruptor (adaptado de [30]). ....	37
Figura 30 – Fluxograma do algoritmo Perturbação e Observação. ....	38
Figura 31 – Fluxograma do algoritmo Condutância Incremental. ....	40
Figura 32 – Fluxograma do algoritmo Tensão Constante.....	41
Figura 33 - Arquitetura da válvula motorizada. ....	44

## Índice de figuras

Figura 34 - Arquitetura do módulo de ultracondensadores. ....	45
Figura 35 - Compensado naval [34]. ....	46
Figura 36 - Passador de esfera [35]. ....	46
Figura 37 - Motor usado na válvula motorizada. ....	47
Figura 38 - Desenho técnico da válvula motorizada. ....	47
Figura 39 - Imagem tridimensional da válvula motorizada. ....	48
Figura 40 - Placas usadas durante o fabrico de circuitos impressos [38]. ....	49
Figura 41 - Desenho técnico do módulo de ultracondensadores. ....	49
Figura 42 - Imagem tridimensional do módulo de ultracondensadores. ....	50
Figura 43 - Placa de circuito impressa desenvolvida para suportar os sensores óticos. ....	50
Figura 44 - Válvula motorizada desenvolvido. ....	51
Figura 45 - Módulo de ultracondensadores desenvolvido. ....	51
Figura 46 - Arquitetura do sistema de carregamento e balanceamento. ....	54
Figura 47 - Sistema de alimentação do controlador. ....	55
Figura 48 - Controlo e alimentação da válvula motorizada. ....	55
Figura 49 - Topologia de rede <i>Mesh</i> . ....	56
Figura 50 - Modelo de simulação do painel fotovoltaico. ....	57
Figura 51 - Parametrização do modelo do painel fotovoltaico. ....	58
Figura 52 - Modelo do painel fotovoltaico parametrizado. ....	58
Figura 53 - Filtro LC à entrada do circuito. ....	59
Figura 54 - Placa desenvolvida pela <i>Sparkfun</i> [47]. ....	60
Figura 55 - Esquemático da placa da <i>Sparkfun</i> (adaptada de <i>Schematic</i> [47]). ....	60
Figura 56 - Conversor de potência <i>step-down</i> . ....	61
Figura 57 - Ultracondensador de 3000 F, 2.7 V e bateria de 7.4 V, 1000 mAh. ....	62
Figura 58 - Sistema de balanceamento (em <i>PSIM</i> ). ....	63
Figura 59 - Bloco de controlo usado em <i>PSIM</i> . ....	64
Figura 60 - Fluxograma do algoritmo responsável por controlar a corrente de carga da bateria. ....	66
Figura 61 - Diagrama da arquitetura do sistema de carregamento do módulo de ultracondensadores. ....	67
Figura 62 - Fluxograma do algoritmo <i>MPPT</i> responsável por extrair a máxima potência do painel fotovoltaico e carregar o módulo de ultracondensadores. ....	68
Figura 63 - Conversor <i>step-down</i> <i>Traco Power</i> TSR 1-2450 [57]. ....	69
Figura 64 - Conversor <i>step-up</i> U1V10F5 da <i>Pololu</i> [58]. ....	70
Figura 65 - Curvas do rendimento do conversor <i>step-up</i> U1V10F5 da <i>Pololu</i> [58]. ....	70
Figura 66 - Imagem ilustrativa do sensor TCST 1000 [59]. ....	71
Figura 67 - Configuração da rede e do endereçamento do <i>coordinator</i> . ....	72
Figura 68 - Configuração do <i>Power Level</i> e do <i>Power Mode</i> . ....	73
Figura 69 - Configuração da porta série. ....	73
Figura 70 - Diferentes tipos de tramas existentes no modo <i>API</i> [41]. ....	74
Figura 71 - Trama <i>ZigBee Transmit Request</i> [41]. ....	75
Figura 72 - Trama <i>ZigBee Receive Packet</i> [41]. ....	76
Figura 73 - Formas de onda (obtidas em simulação) da corrente, da tensão e da potência extraída do painel na fase inicial do carregamento do módulo de ultracondensadores. ....	77
Figura 74 - Formas de onda (obtidas em simulação) da corrente, da tensão e da potência à entrada do módulo de ultracondensadores na sua fase inicial de carregamento. ....	78

## Índice de figuras

---

Figura 75 - Formas de onda (obtidas em simulação) da corrente e da tensão à entrada do módulo de ultracondensadores na fase final do seu carregamento.....	78
Figura 76 - Formas de onda (obtidas em simulação) da potência extraída do painel fotovoltaico quando o módulo de ultracondensadores se encontra na fase final de carregamento.....	79
Figura 77 - <i>Hardware</i> responsável pela gestão de todo o controlador energeticamente autónomo. ....	80
Figura 78 - Placa responsável por manter a alimentação do controlador estável em 5 V quando se usa o módulo de ultracondensadores como elemento armazenador de energia. ....	80
Figura 79 - Forma de onda da tensão (obtidas através do osciloscópio) aos terminais do módulo de ultracondensadores durante o seu carregamento. ....	81
Figura 80 - Potência à entrada do módulo de ultracondensadores durante o seu carregamento. ....	81
Figura 81 - Evolução do rendimento durante o carregamento do módulo de ultracondensadores. ....	82
Figura 82 - Sistema testado durante o uso do módulo de ultracondensadores como elemento armazenador de energia.....	84
Figura 83 - Formas de onda (obtidas em simulação) da corrente, da tensão e da potência extraída do painel durante o carregamento da bateria. ....	85
Figura 84 - Formas de onda (obtidas em simulação) da corrente e da tensão à entrada da bateria durante o seu carregamento. ....	85
Figura 85 - Forma de onda da tensão (obtidas através do osciloscópio) aos terminais da bateria durante o seu carregamento. ....	86
Figura 86 - Potência aos terminais da bateria durante o seu carregamento. ....	87
Figura 87 - Evolução do rendimento do sistema durante o carregamento da bateria.....	88
Figura 88 - Sistema testado durante o uso da bateria como sistema armazenador de energia.....	89
Figura 89 - Ligações entre módulos <i>XBee</i> .....	90
Figura 90 - Imagem retirada do <i>Google Earth</i> onde é possível verificar a distância máxima alcançada entre dois módulos.....	91
Figura 91 - Arquitetura adotada para o sistema <i>SCADA</i> . ....	96
Figura 92 - Estrutura da base de dados.....	98
Figura 93 - Tabela de utilizadores considerada na base de dados. ....	99
Figura 94 – Tabelas usadas na base de dados para descrever a topologia de uma instalação.....	100
Figura 95 -Tabelas consideradas em base de dados durante a definição de programas de irrigação.....	101
Figura 96 - Tabelas da base de dados usadas durante o registo de erros. ....	103
Figura 97 - Menu de <i>login</i> e menu de registo de operadores. ....	105
Figura 98 - <i>Interface</i> inicial da aplicação <i>SCADA</i> . ....	105
Figura 99 – Menu de caracterização de instalações.....	106
Figura 100 – componentes de ligação gerados automaticamente pela aplicação <i>SCADA</i> .....	108
Figura 101 – Botões que permitem eliminar ou parametrizar um componente. ....	109
Figura 102 – Menus de parametrização. ....	109
Figura 103 – Fases da geração automática de canalização entre dois módulos. ....	110
Figura 104 – Exemplos de representações gráficas de possíveis instalações de irrigação. ....	110
Figura 105 – Possibilidades existentes no menu de programação de instalações.....	111
Figura 106 – Calendário gerado quando o operador pretende determinar datas para um programa. ....	112
Figura 107 – Exemplo de um programa definido como ativo.....	112
Figura 108 – Informação relativa, à carga nos elementos armazenadores de energia e à energia extraída por unidade de tempo a partir do painel fotovoltaico. ....	113
Figura 109 – Janela de notificação de anomalia. ....	114



## Índice de figuras

---

Figura 110 – Exemplo de lista de erros.....	115
---	-----

# Lista de abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Designação completa</b>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
CSIS	<i>Centralized Smart Irrigation System</i>
APN	<i>Access Point Network</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
CTS	<i>Centra Tech Systems</i>
ICC	<i>IRRInet Control Center</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
NTE	<i>Nominal Terrestrial Environment</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PSIM	<i>Power Simulator</i>
PI	Proporcional-Integral
PAN	<i>Personal Area Network</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
CSS	<i>Cascading Style Sheets</i>
PHP	<i>Hypertext Preprocessor</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Desde que deu os primeiros passos até há alguns anos atrás, a industrialização da agricultura baseou-se essencialmente na mecanização do trabalho agrícola e no uso de fertilizantes e pesticidas para aumentar significativamente a produção agrícola. Neste momento existe uma grande preocupação com a diminuição dos recursos despendidos neste setor, devido ao declínio da fertilidade dos solos e à diminuição dos níveis de água nas albufeiras de rega.

Atualmente existem vários sistemas de irrigação que são totalmente ou parcialmente comandados pelo ser humano. Esses sistemas são colocados em funcionamento manualmente ou através de sistemas semiautomáticos de controlo. Em ambos os casos, os sistemas de irrigação são colocados em funcionamento e assim permanecem, sem que os técnicos responsáveis pelos mesmos recebam qualquer *feedback* do seu estado de funcionamento. Estes sistemas mostram-se pouco eficientes na deteção de anomalias ocorridas com as válvulas elétricas. Anomalias com válvulas podem provocar altas pressões hidráulicas na instalação, levando à destruição de parte da canalização e ao conseqüente desperdício de um recurso.

Em diversos casos, a energia necessária para alimentar as válvulas elétricas usadas em sistemas de irrigação depende da rede elétrica. Este tipo de situação traz alguns inconvenientes pois implica a passagem de cablagem elétrica em vários pontos da plantação agrícola, o que origina cuidados adicionais no manuseamento de equipamentos agrícolas.

### **1.2. Motivação**

Quando um determinado recurso chave de um processo se encontra limitado provoca consequentemente um aumento do seu preço. Caso a limitação seja provocada por uma utilização não eficiente dos recursos, esta tendência pode ser contrariada fazendo um aproveitamento superior dos recursos existentes, através de um controlo e de uma monitorização eficiente que evite o desperdício. Hoje em dia, algumas áreas do setor agrícola carecem de sistemas de monitorização e controlo que minimizem estes problemas.

Se um produtor monitorizar e controlar remotamente de forma eficaz a sua plantação, consegue diretamente diminuir o desperdício e os consumos. A implementação de sistemas de monitorização e controlo neste setor traria os mesmos benefícios que a indústria em geral já beneficia, como um maior desempenho da produção, uma redução dos custos operacionais e um melhor aproveitamento dos recursos.

A gestão eficiente de um sistema de irrigação pode trazer mais-valias ao setor agrícola. Limitar o ato de irrigação a uma área específica permite aumentar o desempenho da produção e diminuir o desperdício de um recurso. Um controlo eficaz sobre as válvulas pertencentes a um sistema de irrigação permite diminuir a ocorrência de anomalias na canalização, reduzindo desta forma os custos operacionais.

### 1.3. Objetivos

Pretende-se com este trabalho de dissertação desenvolver uma válvula, um controlador e um sistema de alimentação energeticamente autónomo, para um sistema de irrigação. Para que seja possível monitorizar e controlar todo o sistema, pretende-se desenvolver um sistema de monitorização e controlo do tipo *SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)*.

A válvula a desenvolver será do tipo motorizada, sendo por isso necessário desenvolver uma infraestrutura que permita acoplar um motor a um passador de água, idêntico aos normalmente usados em sistemas de irrigação.

Pretende-se evitar a passagem de cabos, quer de alimentação quer de comunicação, pelas zonas de cultivo. Para que tal se possa concretizar, recorrer-se-á a um sistema de comunicação sem fios. O sistema de alimentação da válvula motorizada e do controlador terá de ser energeticamente autónomo da rede elétrica. A referida autonomia será implementada recorrendo a painéis fotovoltaicos.

O sistema *SCADA* tem como finalidade permitir que um utilizador monitorize e controle todo o processo de irrigação remotamente, sendo necessário desenvolver um *software* que sirva de ponte entre o sistema de comunicação do controlador da válvula motorizada e o utilizador do sistema.

Para uma melhor organização deste trabalho de dissertação, optou-se por delinear as seguintes tarefas:

Estado da arte:

- Estudo dos principais sistemas de monitorização e controlo já implementados no setor agrícola;
- Estudo das principais tecnologias que permitam a dispositivos elétricos a sua autonomia energética da rede elétrica;
- Estudo dos principais atuadores elétricos empregados em válvulas utilizadas em sistemas de irrigação.

Fundamentação teórica:

- Estudo do princípio de funcionamento dos painéis fotovoltaicos;
- Estudo dos principais conversores de potência usados para extrair energia de painéis fotovoltaicos;
- Estudo dos principais algoritmos de *MPPT (Maximum Power Point Tracking)*.

Trabalho prático a desenvolver:

- Reprodução de um modelo virtual, do sistema composto pelo painel fotovoltaico, pelo conversor de potência e pelo algoritmo *MPPT*;
- Desenvolvimento e testes do protótipo que permite extrair a energia do painel fotovoltaico;
- Desenvolvimento e testes do protótipo da válvula motorizada;
- Desenvolvimento e testes do protótipo do controlador da válvula motorizada;
- Desenvolvimento e testes do sistema *SCADA*.

### 1.4. Proposta de trabalho a desenvolver

Levando em consideração os objetivos traçados, neste subcapítulo apresenta-se a proposta de trabalho a desenvolver nesta dissertação.

#### 1.4.1. Válvula motorizada

A válvula motorizada será composta por um motor de corrente contínua com binário suficiente para permitir abrir e fechar, com a devida fiabilidade, um passador de água de uma polegada e meia. Para suportar o motor e o passador e manter os dois devidamente acoplados será desenvolvido uma estrutura de suporte.

#### 1.4.2. Controlador energeticamente autónomo

O controlador energeticamente autónomo será composto por uma integração de *hardware* e *software*. Este é assim denominado devido ao facto de a energia necessária ao seu bom funcionamento não depender da rede elétrica. Este agregará as seguintes funcionalidades:

- **Carregamento e balanceamento dos elementos armazenadores de energia:**

Durante este projeto serão abordados dois elementos armazenadores de energia, um módulo de ultracondensadores e uma bateria LiPo (Lítio-Polímero). Apesar de serem considerados dois elementos armazenadores, o desenvolvimento em termos de *hardware* recairá principalmente sobre o carregamento do módulo de ultracondensadores.

Um painel fotovoltaico providenciará a energia necessária para o carregamento dos elementos armazenadores de energia. A extração desta energia será feita recorrendo a um conversor de potência e a algoritmos de controlo. Caso se pretenda carregar o

módulo de ultracondensadores usar-se-á um algoritmo *MPPT*, caso se pretenda carregar a bateria, recorrer-se-á a um algoritmo de controlo do tipo PI (proporcional integral). Os elementos armazenadores serão ambos compostos por duas células que necessitarão de ser balanceadas durante o seu carregamento.

- **Sistema de alimentação do controlador:** O controlador energeticamente autónomo poderá ser alimentado através do painel fotovoltaico ou através de um dos elementos armazenadores de energia. Para tal recorrer-se-á a conversores de potência do tipo *step-up* e do tipo *step-down*. A entrada em funcionamento destes conversores dependerá do estado de carga dos elementos armazenadores e da potência instantânea extraída do painel fotovoltaico.
- **Controlo e alimentação da válvula motorizada:** O controlador terá de ter a capacidade de interpretar as ordens provenientes do sistema *SCADA* e fazê-las refletir junto da válvula motorizada. Este deverá ser capaz de reconhecer o estado da válvula (fechada ou aberta) e comunicar esse estado ao sistema *SCADA*. O conhecimento do estado da válvula derivará de sensores usados para o efeito. O controlo sobre o estado da válvula será obtido através do controlo da sua alimentação, esta será exclusivamente alimentada pelos elementos armazenadores de energia.
- **Sistema de comunicação:** A comunicação entre o sistema *SCADA* e o controlador será mantida através de módulos de radio frequência. A comunicação funcionará em *Full-duplex*.

### 1.4.3. Sistema de monitorização e controlo *SCADA*

O sistema de monitorização e controlo *SCADA* servirá de *interface* entre os utilizadores e o sistema de irrigação. Este permitirá aos utilizadores desenhar digitalmente uma representação de uma instalação de irrigação que exista fisicamente e verificar o estado de funcionamento da mesma. De modo a garantir a compatibilidade com diferentes plataformas o sistema de monitorização e controlo basear-se-á numa aplicação *web*.



### 1.5. Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos. O primeiro capítulo é referente à introdução, nele encontram-se o enquadramento, a motivação, os objetivos desta dissertação e a proposta de trabalho a desenvolver.

O capítulo 2 é referente ao estado da arte. Em primeiro lugar, abordam-se alguns sistemas de monitorização e controlo já implementados no setor agrícola. Em segundo lugar abordam-se algumas tecnologias que possibilitam a um sistema a sua independência energética da rede elétrica. Por último, é feito um estudo sobre válvulas elétricas e os seus atuadores.

No capítulo 3 encontra-se a fundamentação teórica. Em primeiro lugar apresenta-se um estudo sobre os princípios de funcionamento dos painéis fotovoltaicos. Em segundo lugar apresenta-se um estudo sobre os conversores de potência mais usados para controlar a energia proveniente de painéis fotovoltaicos. Por último, apresenta-se um estudo sobre algoritmos de *MPPT* usados na procura do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos.

Nos capítulos 4, 5 e 6 encontra-se uma descrição do trabalho prático realizado no âmbito desta dissertação. O capítulo 4 faz referência à válvula motorizada e ao módulo de ultracondensadores. Os capítulos 5 e 6 apresentam o trabalho desenvolvido no âmbito do controlador energeticamente autónomo e no âmbito do sistema *SCADA*. Em ambos os capítulos é feita uma exposição da arquitetura, do projeto e dos resultados.

No capítulo 7 são expostas as conclusões retiradas da realização deste trabalho e são apresentadas as perspectivas de trabalho a realizar no futuro.

## 2. Estado da Arte

O estado da arte encontra-se dividido em três partes, primeiramente vão ser abordados alguns sistemas de monitorização e controlo já implementados no setor agrícola e as suas vantagens. Em segundo lugar estudar-se-á alguns sistemas de energia alternativos ao uso da energia da rede elétrica, de modo a que o controlador das electroválvulas seja eletricamente independente da rede. Por fim, abordar-se-á os dois tipos de válvulas elétricas mais usadas em sistemas de irrigação.

### 2.1. Sistemas de monitorização e controlo no setor agrícola

Os sistemas de monitorização e controlo trazem para o setor agrícola algumas das vantagens já comprovadas diversas vezes em vários tipos de indústria. Sendo as principais vantagens, a diminuição das despesas associadas à produção, uma melhor distribuição dos recursos e um aumento da produção.

#### 2.1.1 Modernização de canais de Rega

O Professor M. Rijo, professor de hidráulica da Universidade de Évora, apresentou no segundo congresso nacional de rega e drenagem, no Fundão, um documento que alertava para as vantagens do uso de sistemas de monitorização e controlo nos sistemas de rega, de modo a aumentar a eficiência do uso da água.

Segundo o autor, a utilização de sistemas de monitorização e controlo, nomeadamente os do tipo *SCADA*, trazem entre outros os seguintes benefícios ao setor [1]:

- Reduzir os caudais no sistema hidráulico;
- Melhorar o serviço de distribuição da água;
- Reduzir o desperdício de água;
- Reduzir os custos de bombagem.

### 2.1.2 Sistema Neptuno da ABB

O sistema Neptuno da ABB começou a ser usado em explorações agrícolas no sul de Espanha, mais propriamente no Canal *del Zújar*, 250 Km a sudoeste de Madrid. O sistema Neptuno é um sistema de monitorização e controlo desenvolvido para o setor agrícola e que tem como objetivo melhorar os sistemas de rega, aumentando assim a sua eficiência.

O primeiro estudo desenvolvido após a introdução do sistema nas explorações agrícolas, demonstram economias de 15 a 40 por cento em água, economias de 10 a 25 por cento no consumo de energia elétrica e um aumento da produção de cerca de 20 por cento. Tudo isto graças a um sistema de rega mais eficiente. Este estudo teve em consideração propriedades de várias dimensões, daí a variação dos valores obtidos, como é o caso dos dados relativos à economia da água.

Estas melhorias implementadas no sistema de regadio permitiu ainda, diminuir as deslocações dos técnicos às explorações agrícolas, deslocações essas que foram reduzidas em cerca de 20.000 Km. Consequentemente foram reduzidas as despesas com a manutenção, com o desgaste e consumo das viaturas e houve uma diminuição da emissão de gases poluentes.

O sistema Neptuno da ABB utiliza *software SCADA*, como se pode observar na Figura 1, para monitorizar e controlar o sistema de rega. Usa a tecnologia *GPRS (General Packet Radio Service)* com meio de comunicação, nomeadamente a comunicação entre telemóveis *M2M (Machine-to-Machine)*. Os dados relativos às plantações agrícolas são recolhidos e enviados para a estação central através de unidades terminais remotas (*Remote Terminal Unit – RTU*). Os *RTU* usam como fonte de energia pilhas de longa duração ou baterias recarregáveis através de painéis fotovoltaicos. Este facto permite a sua mobilidade, podendo os *RTU's* serem deslocados conforme as necessidades de rega.



Figura 1 - Interface SCADA - ABB [2].

Para possibilitar a diminuição dos custos e do consumo de energia inerentes à utilização do sistema Neptuno, o mesmo pode ser configurado para atuar apenas quando as tarifas são mais baixas (comunicações móveis), quando for ativado algum alarme ou quando estiver agendado algum trabalho. As configurações do sistema podem ser executadas remotamente através das comunicações móveis, diminuindo assim as deslocações do agricultor à plantação. O sistema base do Neptuno pode ser aperfeiçoado, completando-o com um sistema *CSIS (Centralized Smart Irrigation System)*.

De modo a aumentar a fiabilidade, a segurança do sistema e a diminuir o tempo de transmissão, o Neptuno usa uma rede particular *APN (Access Point Network)*, permitindo assim atribuir um endereço fixo *IP (Internet Protocol)* a cada *RTU*. Os utilizadores podem aceder à *interface SCADA* do Neptuno através de um telemóvel ou de um computador, desde que estes permitam o acesso à internet, ou através de *software* dedicado. Após a conexão estar estabelecida os utilizadores podem monitorizar e configurar o sistema de rega de acordo com as suas necessidades [2].

### **2.1.3 Sistemas de supervisão e controlo em estufas de vegetação**

Na Universidade Estadual Paulista foi realizado um trabalho com o propósito de desenvolver um sistema de supervisão e controlo para estufas de vegetação. De modo a parametrizar e controlar a estufa, foram desenvolvidos dois módulos, denominados de unidade de sensores e unidade de processamento de dados, como se pode observar na Figura 2.

O módulo unidade de sensores usa um microcontrolador *ATtiny15L* da *Atmel* e foi desenvolvido para medir a humidade e temperatura do solo, temperatura ambiente e radiação solar na estufa.

O módulo unidade de processamento de dados usa um microcontrolador *ATmega161* da *Atmel*. Esta unidade processa os dados provenientes da unidade de sensores e interage com os atuadores (electroválvulas, bombas de água, ventiladores e motores de cortinas) existentes na estufa. A comunicação entre as unidades foi feita recorrendo a módulos de rádio frequência, BiM2-433 da *Rediometrix*, que operam nos 433 MHz.

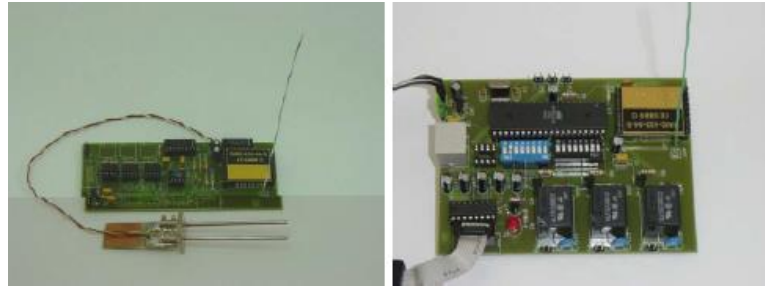


Figura 2 - Unidade de sensores e de processamento de dados [3].

A aplicação de supervisão e controlo do tipo *SCADA* foi desenvolvido recorrendo ao *software Eclipse PRO*, criando uma *interface* animada de todos os processos de produção da estufa. Através da aplicação desenvolvida é possível monitorizar e controlar todos os processos e alterar se necessário o valor de referência das variáveis a controlar. Como se trata de uma aplicação do tipo *SCADA* o sistema permite ainda criar relatórios e bases de dados, na Figura 3 pode-se observar a *interface* da aplicação *SCADA* criada [3].

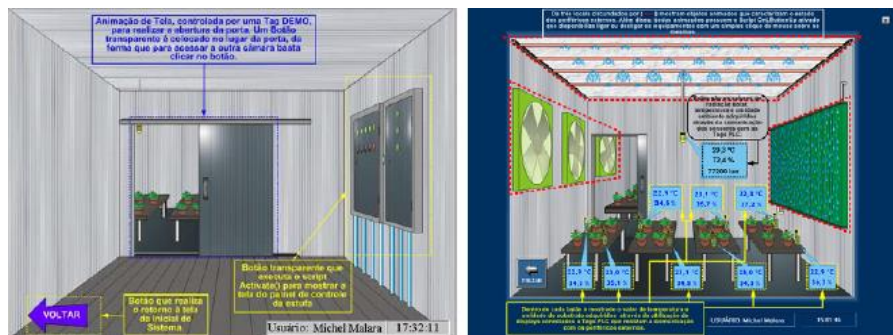


Figura 3 - *Interface* da aplicação *SCADA* [3].

### 2.1.4 Sistema *ClimateMinder*

O *ClimateMinder* da *Rain Birt* é um sistema de monitorização e controlo desenvolvido para o setor agrícola. Os seus módulos de sensores sem fios fazem uso de baterias e de painéis solares como sistema de alimentação, tornando os mesmos energeticamente independentes da rede elétrica. O sistema faz uso das tecnologias de comunicações móveis para enviar os dados recolhidos pelos sensores para um servidor.

A *interface* com o utilizador baseia-se no conceito de *web service*, como se pode observar na Figura 4. O utilizador pode aceder ao *website* através de qualquer dispositivo móvel ou fixo, desde que este permita uma ligação à internet. Após o utilizador se identificar perante o sistema, este pode ter acesso às informações provenientes da sua plantação, definir as condições de controlo e de alertas, personalizar e configurar os relatórios elaborados pelo sistema.

O sistema *ClimateMinder* permite monitorizar o solo e a plantação, tem a capacidade de controlar sistemas de irrigação, mesmo em pequenas parcelas de terreno cultivado. Deste modo, o sistema permite aumentar a qualidade e a produtividade das culturas, reduzir os custos relacionados com o consumo de água, fertilizantes e produtos químicos.

Segundo a *Rain Bird* o *ClimateMinder* é uma solução completa e económica, que inclui *hardware* e *software* (baseado num *web service*) de fácil compreensão e utilização [4].



Figura 4 - Sistema de monitorização baseado num *web service* [4].

### 2.1.5 Projeto *GrapeLook*

O projeto *GrapeLook* foi apoiado pela agência Espacial Europeia e tem como principais objetivos, otimizar o uso de água e de fertilizantes em vinhas. O projeto foi desenvolvido para ajudar as autoridades governamentais e os viticultores sul-africanos de *Western Cape*, a gerir eficientemente os escassos recursos hídricos de irrigação e otimizar o uso de fertilizantes.

O serviço faz uso das tecnologias de satélite para monitorizar as vinhas, fazendo assim uso de tecnologia de ponta para ajudar a otimizar o consumo de água e de fertilizantes. A informação recolhida pelo satélite, juntamente com as tecnologias usadas em terra permite aumentar a produção, melhorar a qualidade das uvas e diminuir o impacto ambiental.

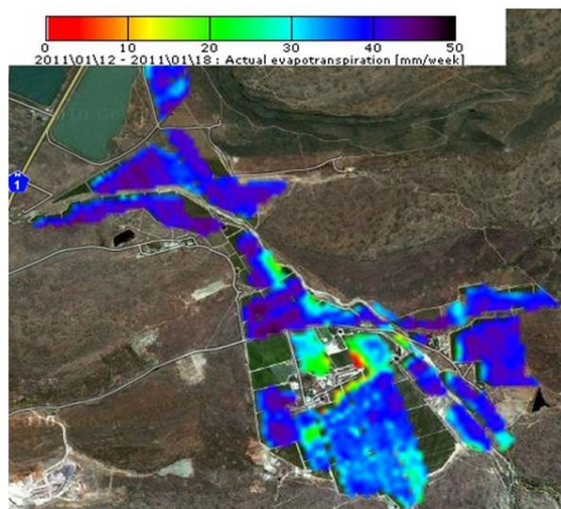


Figura 5 - Imagem do serviço em funcionamento [5].

Os utilizadores do serviço podem ter acesso em tempo real a informação quantitativa que diz respeito, à quantidade de água ou à necessidade de água existente na sua plantação. O sistema permite ainda que os utilizadores saibam a quantidade de nitrogénio existente em cada vinha e fornece recomendações de atuação precisas aos mesmos. Na Figura 5 pode-se observar uma imagem criada pelo sistema, que diz respeito à evaporação da água.

O sistema monitoriza a necessidade de água em cada plantação e as necessidades de água nos sistemas de irrigação de modo a criar uma distribuição mais eficiente e mais justa por todos os viticultores.

O projeto terminou em outubro de 2011. A equipa responsável por este projeto já se encontra a desenvolver o sucessor do *GrapeLook*, denominado de *FruitLook*, o qual cobre uma maior área de interesse uma vez que vai permitir monitorizar árvores de fruto decíduas (árvores que perdem as folhas nos meses mais frios do ano). A maioria da infraestrutura e dos modelos desenvolvidos no *GrapeLook* vão ser usados no *FruitLook* [5].

### **2.1.6 Sistema de monitorização e controlo para o setor agrícola da CTS**

A *CTS (Centra Tech Systems)* é uma empresa que desenvolve e comercializa sistemas de monitorização e controlo para o setor agrícola. Estes sistemas são desenvolvidos de modo a permitir um uso mais eficiente da água em sistemas de irrigação pressurizada (Figura 6). Ao promover um uso mais eficiente da água, o sistema consequentemente permite uma redução de custos com a mão-de-obra, com a transferência da água e em termos energéticos.

O Sistema da *CTS* permite que os utilizadores do mesmo controlem e monitorizem remotamente o sistema de irrigação da plantação, através de uma aplicação via telemóvel ou através da internet. A *CTS* faz uso da solução *ICC (IRRInet Control Center)*, *software SCADA* desenvolvido pela Motorola, para possibilitar ao utilizador tais funcionalidades.

A comunicação entre os utilizadores e o sistema pode ser efetuada de diversas maneiras, por comunicação privada por rádio, por telemóvel, por telefone fixo, por satélite, por fibra ótica, *Wi-Fi* ou por ligação à internet [6].

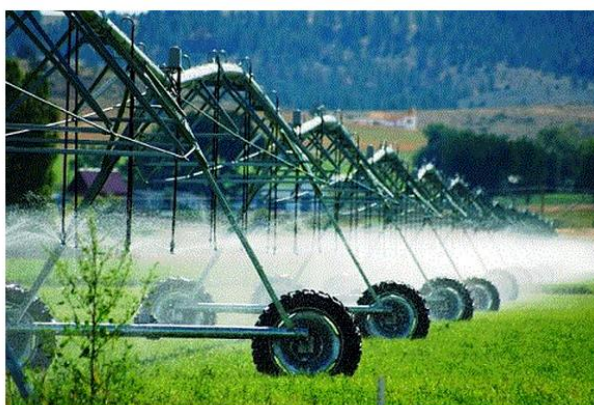


Figura 6 - Sistema de irrigação pressurizada [6].

## **2.2. Tecnologias que possibilitem a independia energética da rede elétrica**

Um dos objetivos desta dissertação passa por desenvolver um controlador para electroválvulas que seja energeticamente independente da rede elétrica, para que isso seja possível é crucial conhecer algumas das tecnologias usadas para a produção de energia elétrica.

### **2.2.1. Painéis fotovoltaicos**

Os painéis fotovoltaicos são usados para converter radiação solar em energia elétrica (corrente contínua), fazendo uso da tecnologia dos semicondutores. Nos painéis fotovoltaicos, as células de material fotossensível, células fotovoltaicas, são associadas em série ou paralelo, a Figura 7 ilustra a disposição das células em painéis fotovoltaicos. Considerando células idênticas, colocando-se células em paralelo consegue-se um valor de corrente máximo que é igual à soma das correntes individuais máximas de cada célula, mas a diferença de potencial aos terminais do painel fica limitada à diferença de potencial de uma célula. Se se colocar células em série consegue-se diferenças de potencial mais elevadas, igual à soma da diferença de potenciais de todas as células, mas a corrente máxima que o painel consegue fornecer fica limitado à corrente



máxima de uma só célula. Existem painéis construídos recorrendo a associações em série e em paralelo de células fotovoltaicas, isto permite-lhes ter uma melhor relação entre a diferença de potencial e a corrente.



Figura 7 - Imagem ilustrativa de uma célula fotovoltaica em um painel [7].

Os materiais usados para produzir células fotovoltaicas têm uma característica própria que lhes permite absorver fótons e libertar eletrões. Quanto maior a quantidade de radiação solar que atingir uma célula fotovoltaica maior vai ser a quantidade de eletrões libertados, consequentemente maior vai ser a corrente na célula, dentro de certos limites. Por maior que seja a quantidade de radiação solar que atinga a célula num dado instante, a corrente é limitada como consequência das características internas do material semiconductor do qual a célula é composta [8].

As células fotovoltaicas mais comuns no mercado são construídas a partir de cristais de silício (Si), monocristalino, policristalino e silício amorfo, mas existem células construídas a partir de outros materiais. O tipo de células produzidas a partir de silício cristalino são as mais usadas, segundo dados de 2010, na conceção de painéis fotovoltaicos, como se pode verificar na Figura 8. Na Figura 9 pode-se contemplar os diferentes tipos de tecnologias e os seus rendimentos.

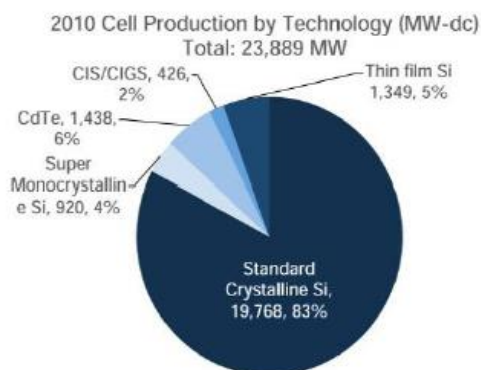


Figura 8 - Produção de células fotovoltaicas por tecnologia [9].

- **Células de silício monocristalino:** dos três tipos de células referidas acima, estas são as que têm o processo de fabrico mais dispendioso e complexo, pois o grau de pureza do

silício monocristalino anda à volta dos 99 %. Contudo, as células feitas a partir deste tipo de material apresentam um rendimento superior a qualquer uma das outras. Devido ao seu rendimento superior e ao seu processo de fabrico, os painéis fotovoltaicos existentes no mercado com este tipo de células são os que chegam ao consumidor a um preço mais elevado.

- **Células de silício policristalino:** este tipo de células não requer um processo de fabrico tão dispendioso e complexo como o requerido pelas células de silício monocristalino. Este processo de fabrico faz com que o silício policristalino tenha um grau de pureza inferior ao do silício monocristalino. Isto tem implicações diretas no rendimento deste tipo de células, sendo o rendimento inferior ao das células de silício monocristalino. Apesar de o rendimento ser inferior, os painéis fotovoltaicos que usam este tipo de células são os que apresentam a melhor relação preço/rendimento do mercado.
- **Células de silício amorfo:** considerando os três tipos aqui analisados, estas células apresentam o preço de fabrico mais baixo. Os rendimentos apresentados por este tipo de células ficam bastante abaixo dos dois tipos analisados anteriormente, além disso o tempo útil de vida dos painéis fotovoltaicos que fazem uso deste tipo de células é menor, começando estes a sofrer um processo de degradação logo nos primeiros meses de utilização [9].

Technology	Module Efficiency
Mono-crystalline Silicon	12.5-15%
Poly-crystalline Silicon	11-14%
Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)	10-13%
Cadmium Telluride (CdTe)	9-12%
Amorphous Silicon (a-Si)	5-7%

Figura 9 - Algumas tecnologias de células fotovoltaicas e os seus rendimentos [10].

### 2.2.2. Tecnologia *Windbelt*

A *Humdinger Wind Energy LLC* e a *Humdinger Wind Energy* estão focadas no desenvolvimento e pesquisa de uma tecnologia apelidada de *Windbelt*. Este tipo de tecnologia permite converter a energia cinética do vento em energia elétrica. Este sistema promete ter um lugar seguro entre as energias renováveis [11] [12].

Até ao aparecimento da tecnologia *Windbelt*, a única maneira de transformar a energia proveniente do vento em energia elétrica era através de turbinas. A Figura 10 ilustra os geradores eólicos com turbina mais comuns hoje em dia, existem entretanto outros tipos de geradores menos comuns, em que as diferenças assentam essencialmente no *design* das pás do rotor e no tipo de gerador.



Figura 10 - Gerador eólico equipado com turbina [13].

A tecnologia *Windbelt* não faz uso das engrenagens mecânicas nem dos aerofólios rotativos usados nos sistemas convencionais para converter a energia proveniente do vento em energia elétrica, em vez disso baseia-se num fenómeno aerodinâmico denominado de vibração aeroelástica. Este fenómeno causou a destruição da ponte de *Tacoma Narrows* em 1940 [11]. Este tipo de tecnologia usa uma membrana sobre tensão mecânica, a membrana possui um gerador de campo magnético, quando o vento passa pela membrana faz com que esta vibre, a vibração cria um campo magnético variável que induz uma corrente num condutor [14].

Neste momento a tecnologia *Windbelt* contempla três tipos de soluções, o *microBelt*, as *Windcells* e os *Windcell Panels* como se pode observar na Figura 11.

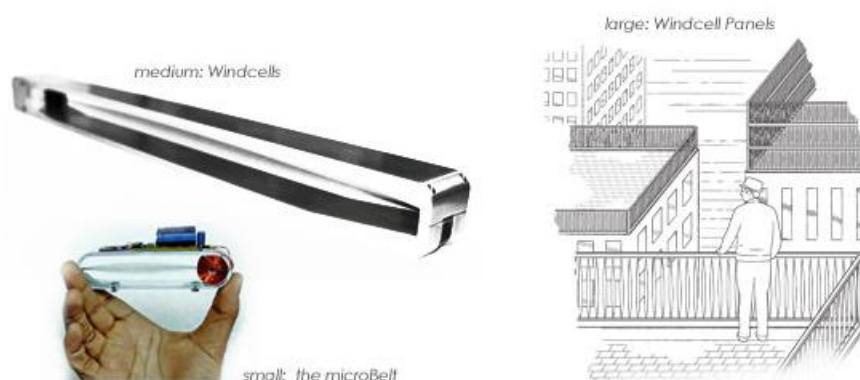


Figura 11 - Tecnologia Windbelt [11].

- **MicroBelt:** o *microBelt* é uma solução de pequeno porte, tem cerca de 13 cm de comprimento por 3 cm de largura por 2.5 cm de altura, é capaz de gerar 10 mW com ventos de 10 m/s e tem uma vida útil de 20 anos.
- **Windcells:** é uma solução de médias dimensões, tem cerca de 100 cm de comprimento por 3 cm de largura por 3 cm de altura, funcionam com ventos que sopram com velocidades entre os 2 m/s e os 20 m/s. Conseguem produzir entre 0.1 kW e 1 kW por mês.
- **Windcell Panels:** é uma solução de maiores dimensões, tem cerca de 100 cm de comprimento por 5 cm de largura por 100 cm de altura, consegue produzir cerca de 7.2 kWh por mês, com ventos que atinjam velocidades de cerca de 6 m/s.

### 2.2.3. Micro geradores eólicos de turbina

Os sistemas de geração de energia eólica são responsáveis por transformar a energia cinética do vento em energia elétrica. Estes tipos de sistemas são compostos por um conjunto de tecnologias elétricas e mecânicas, necessitam de uma torre que suporta o aerogerador e de um rotor para transmitir a energia cinética do vento ao eixo do gerador elétrico. Um rotor pode ser constituído por dois tipos de turbinas, as de eixo horizontal ou as de eixo vertical como se pode observar na figura 12 [15].



Figura 12 - Micro geradores eólicos, o primeiro com turbina de eixo vertical e o segundo com turbina de eixo horizontal [16].

São os geradores elétricos que transformam a energia mecânica de rotação proveniente do rotor em energia elétrica. Existem várias topologias quando se trata de geradores elétricos, de seguida vão ser descritas algumas dessas topologias.

- **Gerador síncrono de ímanes permanentes:** nesta topologia não existem enrolamentos para criação do campo magnético, estes foram substituídos por ímanes permanentes de alta produção energética. Esta topologia não usa escovas ou excitação com corrente, apresentando assim um custo de manutenção baixo e um rendimento elevado quando usada em sistemas de baixa potência.
- **Gerador síncrono convencional:** esta topologia encontra-se bastante consolidada quando se fala de geradores elétricos, uma vez que grande parte da energia produzida no mundo advém deste tipo de geradores. Este tipo de geradores usam corrente contínua para estabelecer um campo magnético no rotor e a frequência da senoide é diretamente proporcional à velocidade de rotação do rotor.
- **Gerador de corrente contínua:** os geradores de corrente contínua foram usados nos primeiros sistemas de baixa potência. Esta topologia foi substituída por outras devido ao facto de possuir um rendimento baixo e necessitar de muita manutenção. Este tipo de gerador tem a vantagem de não necessitar de um conversor CA-CC pois a conversão para corrente contínua é feita pelo próprio gerador mecanicamente.
- **Gerador de indução:** este tipo de topologia é muito usado em sistemas de produção de energia eólica pois tem um desempenho elevado e necessita de pouca manutenção. O gerador de indução não usa escovas e necessita de excitação de uma corrente alternada, a máquina pode ser excitada externamente ou autoexcitar-se.

### 2.3. Válvulas usadas em sistemas de irrigação e atuadores elétricos

A maioria das válvulas com atuadores elétricos usadas em sistemas de irrigação usam atuadores com motores rotativos ou atuadores de solenoide. Um atuador de motor rotativo pode ser visto de uma forma muito simplificada, como um motor elétrico acoplado a uma válvula, por sua vez um atuador de solenoide tem uma forma de atuar bastante diferente do atuador de motor rotativo, pois faz uso do núcleo de uma bobina para acionar uma válvula.

### 2.3.1. Atuadores de solenoide

Os atuadores de solenoide são constituídos por uma bobina com um núcleo móvel. Quando a bobina é excitada através de uma tensão elétrica cria-se um campo eletromagnético provocado pela corrente que passa na bobina, esse campo eletromagnético obriga o núcleo da bobina a subir, conseqüentemente a válvula abre-se. Quando a bobina deixa de ser excitada o campo eletromagnético estingue-se e o núcleo da bobina desce fechando a válvula, como se pode visualizar na Figura 13. Existem dois tipos de atuadores de solenoide, os que funcionam com corrente contínua e os que funcionam com corrente alternada, dependendo do fabricante e do tipo de atuador solenoide, os que usam corrente contínua podem ser alimentados a 12 V, 24 V ou 110 V contínuos, os que usam corrente alternada podem ser alimentados a 12 V, 24 V, 110 V e 220 V alternados [17].

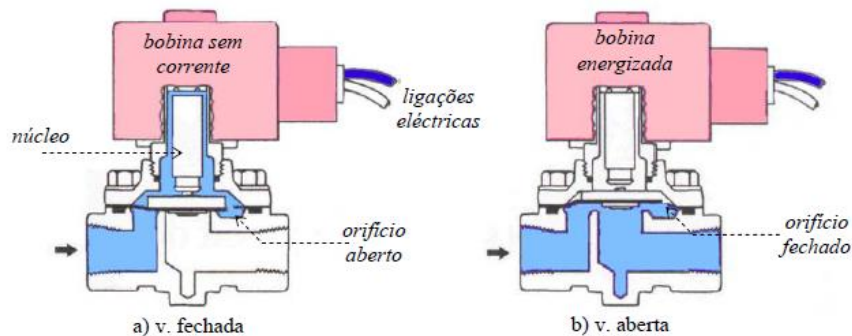


Figura 13 - Válvula com atuador de solenoide [17].

### 2.3.2. Atuador de motor rotativo

Existe uma grande diversidade de atuadores de motor rotativo, estes dividem-se em dois grandes grupos, os que são dotados de motores de corrente contínua e os que são dotados de motores de corrente alternada. Os atuadores com motor rotativo que usam motores de corrente alternada podem usar motores monofásicos ou trifásicos. Os atuadores dotados de motores trifásicos são geralmente usados para atuar válvulas de grandes dimensões, como por exemplo as válvulas usadas nas redes de abastecimento de água para consumo doméstico. Os atuadores que usam motores rotativos precisam de mudar o sentido de rotação dos motores para poderem atuar sobre as válvulas, de modo a possibilitar a abertura ou o fecho das mesmas.

Este tipo de atuadores usa um veio sem fim acoplado ao veio do motor. O veio sem fim transmite a energia mecânica proveniente do motor a uma roda planetária, o veio da roda transmite o movimento à válvula possibilitando assim a atuação sobre a mesma. Algumas válvulas

com atuador de motor rotativo usam um sistema mecânico extra que permite atuar manualmente sobre a válvula caso aconteça alguma anomalia no sistema elétrico. Na Figura 14 pode-se observar uma válvula com atuador de motor rotativo, dotada de um sistema secundário de atuação manual [17].

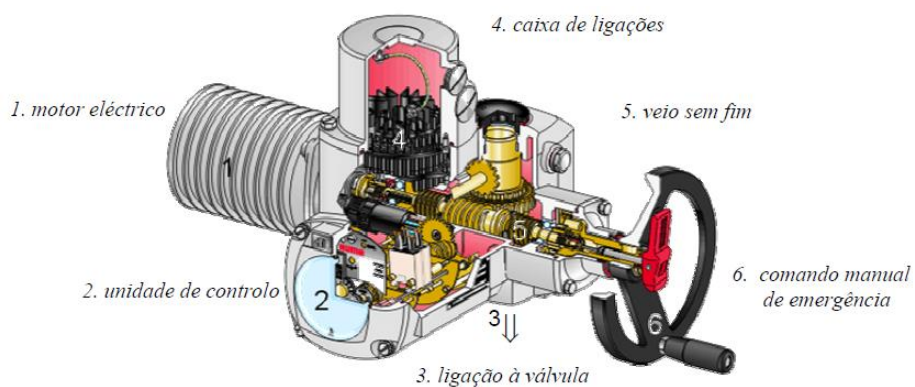


Figura 14 - Válvula com atuador de motor rotativo [17].

# 3. Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica encontra-se dividida em três subcapítulos. Primeiramente abordar-se-á os princípios de funcionamento dos painéis fotovoltaicos. Em segundo lugar estudar-se-á alguns conversores de potência usados para controlar o fluxo de energia proveniente de sistemas fotovoltaicos. Por fim, abordar-se-á alguns algoritmos *MPPT* usados para colocar os painéis fotovoltaicos a operar no seu ponto de máxima potência.

## 3.1. Painéis fotovoltaicos

Neste subcapítulo serão abordados os princípios de funcionamento dos painéis fotovoltaicos. Começar-se-á por avaliar os princípios de funcionamento e o modelo elétrico equivalente das células fotovoltaicas que compõem um painel. De seguida abordar-se-ão as características elétricas dos painéis. Por último estudar-se-á a influência da radiação solar e da temperatura das células, e as suas implicações no desempenho dos painéis fotovoltaicos.

### 3.1.1. Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício

As células fotovoltaicas têm a capacidade de converter a energia proveniente da radiação solar em energia elétrica. Estas são fabricadas a partir de materiais semicondutores, como é o caso das células fotovoltaicas produzidas a partir de silício.

Os materiais semicondutores têm a capacidade de em determinadas situações se comportarem como um condutor e noutras como um isolador. Estas características são facilmente observadas nas células fotovoltaicas. Quando a luz solar chega a superfície das células fotovoltaicas, o material semicondutor passa do estado isolador para o estado de material condutor, o processo inverso ocorre quando deixa de haver luz solar sobre a superfície das células.

Uma célula é composta por três camadas de material sobrepostas. A camada superior é composta por um material tipo n (negativo), assim designado devido ao tipo de carga que adquire, este material tem a capacidade de libertar eletrões quando estimulado pela luz solar. A camada



inferior é composta por material tipo p (positivo) e na presença de luz solar é carregada positivamente. A camada intermédia é designada de junção p-n e tem como função garantir o isolamento entre a camada de material do tipo n e do tipo p.

Quando a luz solar atinge a camada superior da célula fotovoltaica excita os eletrões que se encontram no material tipo n. Estes são atraídos pelo material tipo p mas a junção isoladora p-n não deixa os eletrões passarem diretamente de uma camada para a outra, obrigando assim os eletrões a percorrer o circuito elétrico externo que liga o material tipo n ao material tipo p [18] [19]. A Figura 15 ilustra o princípio de funcionamento da célula fotovoltaica.

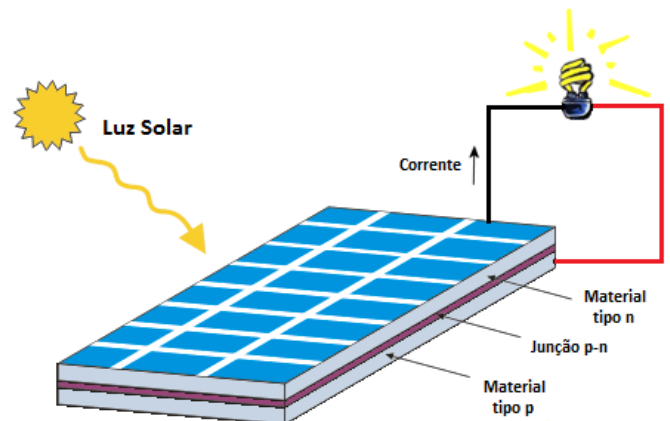


Figura 15 - Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica [20].

### 3.1.2. Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica

Quando se pretende demonstrar o comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica recorre-se frequentemente a um modelo elétrico equivalente. Os modelos mais usados para demonstrar o comportamento elétrico podem admitir um ou dois díodos. Neste documento será analisado o modelo que faz uso de um díodo. Uma célula fotovoltaica podem ser vista como uma fonte de corrente  $I_L$ , em paralelo com um díodo  $D$  e com uma resistência  $R_p$ , em série com isto encontra-se a resistência  $R_s$  como se pode observar na Figura 16 [21] [22] [23].

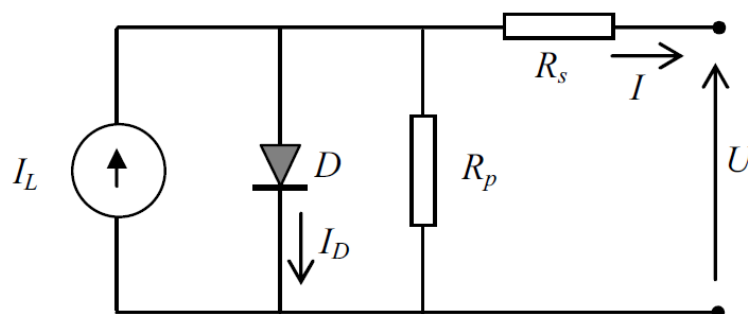


Figura 16 - Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica [21].

Em que:

- $I_L$  é a corrente gerada por uma determinada radiação solar (diretamente proporcional à radiação);
- O diodo  $D$  representa a junção p-n;
- $R_s$  representa as perdas por efeito de joule;
- $R_p$  representa as perdas provocadas por correntes de fuga no diodo;
- $I$  é a corrente de saída;
- $U$  é a tensão existente aos terminais da célula.

A relação entre a corrente de saída e a tensão, tendo em consideração o modelo da Figura 16, é descrita pela seguinte equação [21] [24]:

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q(U+IR_s)}{kAT}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

Em que:

- $I_0$  é a corrente de saturação;
- $q$  é a carga de um eletrão ( $1.602 * 10^{-19} C$ );
- $k$  é a constante de *Boltzmann* ( $1.38046 * 10^{-23} JK^{-1}$ );
- $A$  representa o fator de qualidade do diodo;
- $T$  representa a temperatura da célula em graus *Kelvin*.

A corrente  $I_L$ , considerando *Standard Test Conditions (STC)* é descrita pela equação (2) [21] [24], as condições de teste padrão são os seguintes:

- $T_{STC}$  é a temperatura da célula considerada nos testes padrão, o valor adotado é de 298.15 K (25° C);
- $G_{STC}$  representa a quantidade de radiação solar que chega á célula, o valor padrão é de cerca de 1000 W/m<sup>2</sup>;
- Os testes padrão consideram ainda um coeficiente de massa de ar de 1.5.

$$I_L = (I_{L,STC} + K_I \cdot \Delta T) \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (2)$$

Onde:

$$I_{L,STC} = \frac{(R_S + R_P)}{(R_P \cdot I_{SC})} \quad (3)$$

$$\Delta T = T - T_{STC} \quad (4)$$

Em que:

- $K_I$  é o coeficiente de corrente de curto-circuito;
- $G$  é a quantidade de radiação solar que irradia a célula;
- $I_{L,STC}$  representa a corrente gerada em  $STC$ ;
- $I_{SC}$  é a corrente de curto-circuito.

A corrente de saturação  $I_0$  depende da temperatura da célula de acordo com a seguinte equação [21]:

$$I_0 = I_{0,STC} \cdot \left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{qE_g}{kA} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (5)$$

Em que:

- $I_{0,STC}$  é a corrente de saturação em  $STC$ ;
- $E_g$  é a energia de *bandgap* do material da célula.

A relação entre a corrente e a tensão numa célula fotovoltaica depende da quantidade de radiação solar que atinge a célula e da temperatura a que a mesma se encontra, depende ainda da qualidade do material do qual a mesma é feita.

### 3.1.3. Características elétricas dos painéis fotovoltaicos

Como já foi referido neste documento, um painel fotovoltaico é composto por um conjunto de células fotovoltaicas combinadas em série e em paralelo, de modo a criar uma determinada

relação entre a corrente e a tensão em jogo. Isto deve-se ao facto de uma célula conseguir produzir isoladamente uma quantidade de energia elétrica que se encontra compreendida entre 1 e 2 W.

A relação entre a corrente e o número de células em série e em paralelo num painel fotovoltaico é descrita pela seguinte equação [21]:

$$I = N_P I_L - N_P I_0 \left( e^{\frac{q(U + I(N_S/N_P)R_S)}{(N_S k A T)}} - 1 \right) - \frac{U + I(N_S/N_P)R_S}{(N_P/N_S)R_P} \quad (6)$$

Em que:

- $N_P$  é o número de células em paralelo;
- $N_S$  é o número de células em série.

A maioria dos fabricantes de painéis fotovoltaicos descreve as principais especificações elétricas dos seus painéis tendo em consideração as condições de referência *STC* e as condições de referência *NOCT* (*Nominal Operating Cell Temperature*), como pode ser observado na Figura 17. As condições de referência *NOCT* representam uma aproximação mais fidedigna da realidade, pois tem em consideração as condições atmosféricas terrestres *NTE* (*Nominal Terrestrial Environment*) [25]:

- Painel exposto a uma radiação solar de 800 W/m<sup>2</sup>;
- Temperatura ambiente de 20 °C;
- Velocidade média do vento de 1 m/s.

## Fundamentação Teórica

ELECTRICAL SPECIFICATIONS							
STC rated output ( $P_{MPP}$ )*	270 Wp	275 Wp	280 Wp	285 Wp	290 Wp	295 Wp	
PTC rated output ( $P_{MPP}$ )**	242.6 Wp	247.2 Wp	251.8 Wp	256.5 Wp	261.1 Wp	265.7 Wp	
Standard sorted output	-0/+5 Wp						
Warranted power output STC ( $P_{MPPmin}$ )	270 Wp	275Wp	280 Wp	285 Wp	290 Wp	295 Wp	
Rated voltage ( $V_{MPP}$ ) at STC	35.57 V	35.60 V	35.63 V	35.66 V	35.68 V	35.72 V	
Rated current ( $I_{MPP}$ ) at STC	7.62A	7.76 A	7.90 A	8.04 A	8.15 A	8.30 A	
Open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) at STC	44.38 V	44.51 V	44.64 V	44.77 V	44.90 V	45.03 V	
Short circuit current ( $I_{sc}$ ) at STC	8.42 A	8.56 A	8.71 A	8.86 A	8.94 A	9.16 A	
Module efficiency	13.9%	14.1%	14.4%	14.7%	14.9%	15.2%	
Rated output ( $P_{MPP}$ ) at NOCT	188.5 Wp	192.0 Wp	195.5 Wp	199.0 Wp	202.5 Wp	206.0 Wp	
Rated voltage ( $V_{MPP}$ ) at NOCT	32.38 V	32.38 V	32.38 V	32.39 V	32.51 V	32.47 V	
Rated current ( $I_{MPP}$ ) at NOCT	5.82 A	5.93 A	6.04 A	6.14 A	6.23 A	6.34 A	
Open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) at NOCT	40.72 V	40.84 V	40.96 V	41.08 V	41.20 V	41.32 V	
Short circuit current ( $I_{sc}$ ) at NOCT	6.51 A	6.62 A	6.74 A	6.85 A	6.91 A	7.09 A	
Temperature coefficient ( $P_{MPP}$ )	-0.451%/K					Maximum system voltage SCII	1000 Vdc
Temperature coefficient ( $I_{sc}$ )	+0.087%/K					Maximum system voltage NEC	600 Vdc
Temperature coefficient ( $I_{MPP}$ )	+0.007%/K					Number of diodes	6
Temperature coefficient ( $V_{MPP}$ )	-0.445%/K					Maximum series fuse rating	15 A
Temperature coefficient ( $V_{oc}$ )	-0.332%/K						
Normal operating cell temperature (NOCT)	46±2°C						

\* Measurement tolerance +/- 3%  
\*\* Estimated

Figura 17 - Especificações elétricas de um painel fotovoltaico [26].

A Figura 17 descreve as especificações elétricas de 6 modelos distintos de painéis fotovoltaicos, os fabricantes usam normalmente como unidade de potência o Wp (Watt-pico) que descreve a potência fornecida por um determinado painel, em condições de funcionamento específicas e reproduzidas em laboratório (condições de referência *NOCT* e *STC*).

As especificações elétricas têm os seguintes significados:

- **Potência no ponto de máxima potência ( $P_{MPP}$ ):** Valor máximo de potência que o painel é capaz de fornecer;
- **Tensão no ponto de máxima potência ( $V_{MPP}$ ):** Valor de tensão no ponto de máxima potência;
- **Corrente no ponto de máxima potência ( $I_{MPP}$ ):** Valor da intensidade de corrente no ponto de máxima potência;
- **Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ):** Valor máximo de tensão medido aos terminais do painel quando este se encontra em circuito aberto;
- **Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ):** Valor máximo de corrente medida no painel quando os seus terminais se encontram curto-circuitados.

É comum na literatura caracterizar-se um painel através da sua curva característica I-V. Esta descreve de uma forma gráfica a relação entre a corrente, a tensão e o ponto de máxima potência. A Figura 18 ilustra uma curva característica I-V de um painel fotovoltaico.

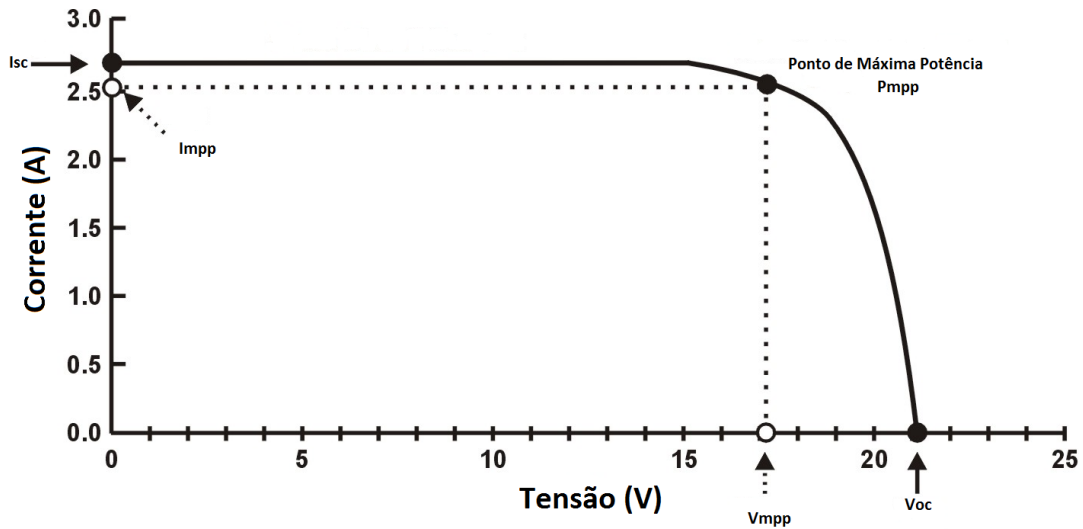


Figura 18 - Curva característica I-V (adaptada de [27]).

O desempenho de um painel fotovoltaico é tanto melhor, quanto maior for o valor do fator de forma das suas células fotovoltaicas. Um fator de forma elevado corresponde a uma quantidade de perdas menor. O fator de forma é obtido através da seguinte equação [28]:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (7)$$

#### 3.1.4. Influência da radiação solar

Quando ocorre uma variação da quantidade de radiação solar que incide sobre um painel fotovoltaico, ocorre simultaneamente uma variação na intensidade da corrente de curto-circuito do painel. Variação que é proporcional à variação da radiação. Assim sendo, se a incidência de radiação solar diminuir, isso implica diretamente um deslocamento do ponto de máxima potência para baixo. A tensão de circuito aberto também é influenciada pela radiação solar, mas esta sofre poucas alterações quando comparada com a corrente. Na Figura 19 podemos observar a influência da radiação solar na curva característica I-V de um painel.

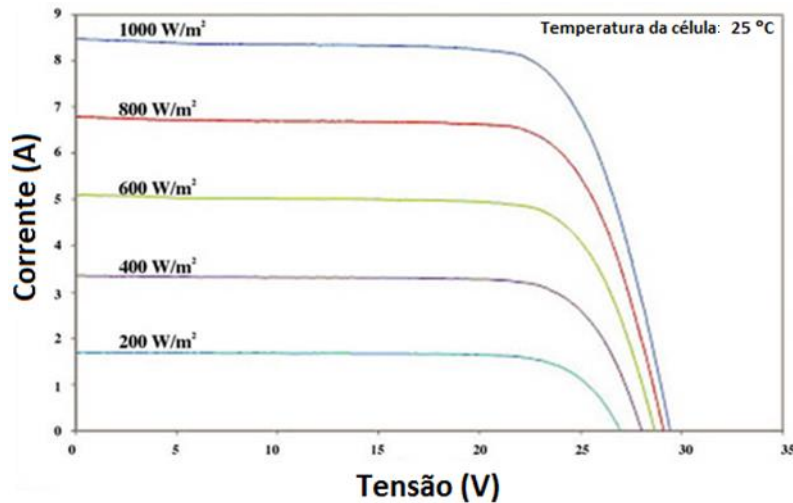


Figura 19 - Curvas características de um painel fotovoltaico para diferentes radiações solares (adaptada de [29]).

### 3.1.5. Influência da temperatura

Com a variação da temperatura das células de um painel fotovoltaico ocorre uma variação da tensão de circuito aberto e uma variação da corrente de curto-circuito. Quando a temperatura aumenta o valor da tensão diminui e a intensidade de corrente aumenta. A variação da corrente é pouco significativa comparada com a da tensão. Este comportamento implica um deslocamento do ponto de máxima potência para a esquerda e uma consequente perda de eficiência por parte do painel. Na Figura 20 pode-se observar o comportamento da corrente e da tensão para diferentes temperaturas, considerando uma incidência de radiação solar constante.

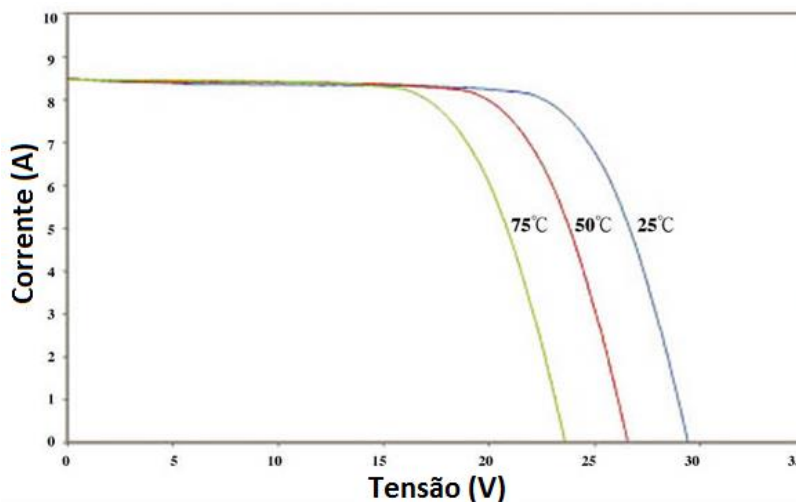


Figura 20 - Curvas características de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas (adaptada de [29]).

### 3.2. Conversores de potência CC-CC comutados

Neste capítulo apresenta-se um estudo sobre conversores de potência CC-CC comutados. Os conversores permitem o controlo do fluxo de energia num circuito elétrico, isto é, os conversores permitem controlar um valor pretendido de tensão ou de corrente numa carga. Esse controlo é normalmente efetuado através da manipulação do *duty-cycle* de uma onda *PWM* (*Pulse Width Modulation*) aplicada a um semicondutor totalmente controlável.

Este estudo é necessário por dois motivos. Em primeiro lugar porque existe a necessidade de criar uma solução que permita controlar o fluxo de energia entre o painel fotovoltaico e os elementos armazenadores de energia. Em segundo lugar, quando a energia armazenada é usada para alimentar o controlador energeticamente autónomo é necessário controlar o seu fluxo.

#### 3.2.1. Conversor *step-up-down* ou *buck-boost*

O conversor *step-up-down* é um conversor do tipo fonte de tensão. Este é composto por um *MOSFET* (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)  $S$  (interruptor), por um diodo  $D$ , por uma bobina  $L$ , por um condensador  $C$  e por uma carga  $R_L$ . Na Figura 21 pode-se observar o esquema elétrico do conversor em questão. Com este tipo de conversor consegue-se ajustar o nível de tensão  $V_o$  na carga, para valores inferiores, iguais ou superiores ao valor de tensão  $V_i$  existente na fonte. Neste tipo de conversor a tensão na carga encontra-se inversamente polarizada em relação à tensão na fonte [30].

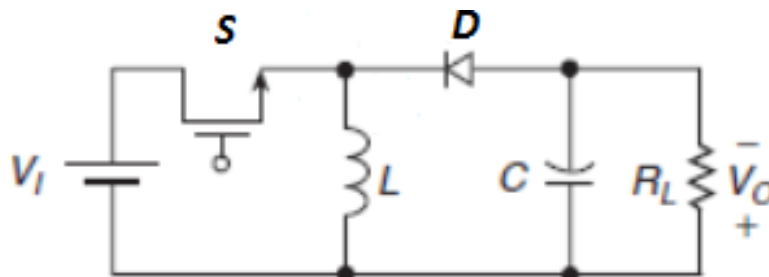


Figura 21 – Esquema elétrico do conversor *step-up-down* (adaptado de [30]).

Para analisar convenientemente este conversor é necessário considerar dois tipos de situações. A primeira situação corresponde a quando o *MOSFET*  $S$  se encontra em condução e a segunda situação diz respeito a quando o *MOSFET*  $S$  se encontra ao corte. Na Figura 22 apresenta-se os esquemas elétricos das duas situações descritas.



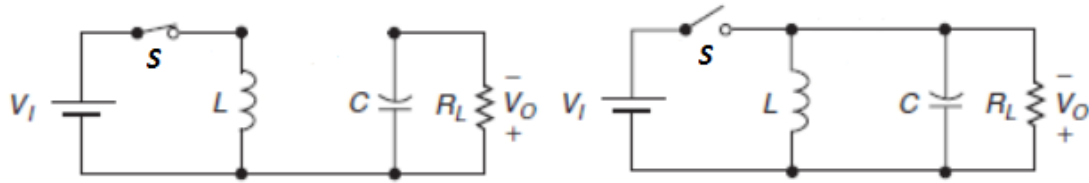


Figura 22 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor quando o *MOSFET S* se encontra em condução ou ao corte (adaptado de [30]).

Durante a análise que se segue todos os componentes foram considerados ideais, a carga  $R_L$  foi considerada puramente resistiva, quando se faz referência a tensão de saída  $V_o$  está-se a considerar o módulo da mesma. Considerou-se ainda que o conversor se encontra a funcionar em regime permanente e que a corrente na bobina  $L$  nunca se anula, ou seja, o conversor encontra-se no modo de condução contínua.

A relação entre a tensão  $V_I$  na fonte e a tensão  $V_o$  de saída depende diretamente do valor de *duty-cycle*  $D$  aplicado à onda *PWM*. A relação é descrita pela expressão seguinte:

$$\frac{V_o}{V_I} = \frac{D}{1 - D} \quad (8)$$

A relação entre o valor médio da corrente  $i_I$  na fonte com o valor médio da corrente  $i_o$  na carga e com o *duty-cycle*  $D$  segue a seguinte expressão:

$$\frac{i_o}{i_I} = \frac{D}{1 - D} \quad (9)$$

O *ripple* de tensão  $\Delta V_o$  na carga depende da frequência de comutação  $f$ , do valor médio da corrente  $i_o$  na carga, do *duty-cycle*  $D$  e do valor da capacidade do condensador  $C$ . A dependência descrita é regida pela seguinte expressão:

$$\Delta V_o = \frac{D \cdot i_o}{f \cdot C} \quad (10)$$

Levando em consideração a tensão  $V_I$  na fonte, a tensão  $V_o$  na saída e a indutância da bobina  $L$ , a corrente  $i_L$  na bobina é definida pela seguinte derivada (*MOSFET S* em condução):

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_I}{L} \quad (11)$$

Quando a *MOSFET S* se encontra ao corte:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_O}{L} \quad (12)$$

O *ripple* de corrente  $\Delta I_L$  na bobina  $L$  depende da frequência de comutação  $f$ , da tensão  $V_I$  na fonte, do duty-cycle  $D$  e do valor de indutância da bobina  $L$ . A dependência descrita é regida pela seguinte expressão:

$$\Delta I_L = \frac{D \cdot V_I}{f \cdot L} \quad (13)$$

Na Figura 23 podem ser observadas algumas formas de onda, da tensão e da corrente, em alguns dos componentes que compõem o conversor *step-up-down*.  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  correspondem respetivamente ao intervalo de tempo em que o *MOSFET S* se encontra em condução ou ao corte.

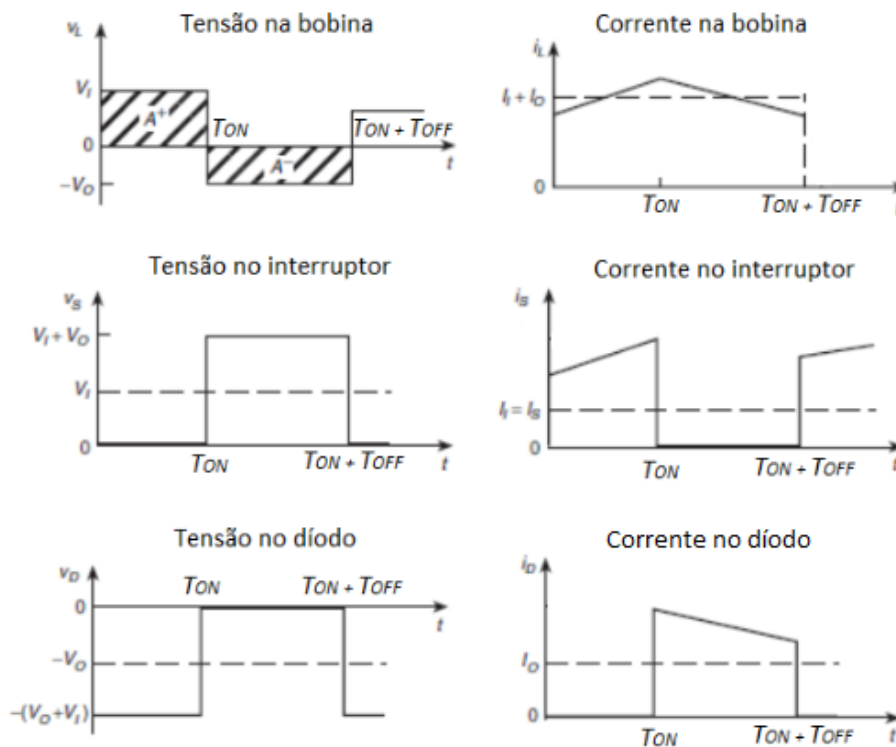


Figura 23 - Formas de onda da tensão e da corrente na bobina, no diodo e no interruptor (adaptado de [30]).

A principal vantagem do conversor *step-up-down* deve-se ao facto de a tensão  $V_o$  na carga poder tomar valores menores, iguais ou superior aos da tensão  $V_i$  na fonte. A grande desvantagem advém do facto de a tensão na carga se encontrar inversamente polarizada em relação à da fonte.

### 3.2.2. Conversor *step-up* ou *boost*

O conversor *step-up* é composto por um *MOSFET S* (interruptor), por um diodo *D*, por uma bobina *L*, por um condensador *C* e por uma carga  $R_L$ . Na Figura 24 apresenta-se o esquema elétrico do circuito que constitui o conversor *step-up*. Este conversor é do tipo fonte de tensão e permite ajustar a tensão de saída  $V_o$  para valores iguais ou superiores aos da tensão existente na fonte  $V_i$  [30].

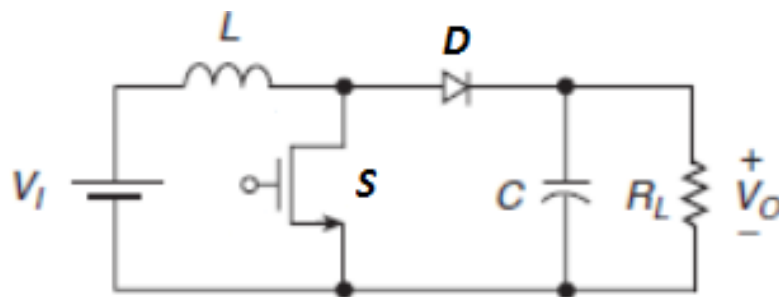


Figura 24 - Esquema elétrico do conversor *step-up* (adaptado de [30]).

Para analisar convenientemente este conversor é necessário considerar dois tipos de situações. A primeira situação corresponde a quando o *MOSFET S* se encontra em condução e a segunda situação diz respeito a quando o *MOSFET S* se encontra ao corte. Na Figura 25 apresenta-se os esquemas elétricos das duas situações descritas.

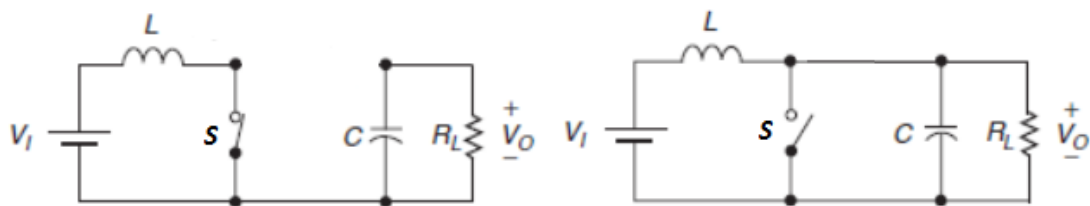


Figura 25 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor quando o *MOSFET S* se encontra em condução ou ao corte (adaptado de [30]).

Durante a análise que se segue todos os componentes foram considerados ideais e a carga  $R_L$  foi considerada puramente resistiva. Considerou-se que o conversor se encontra a funcionar em regime permanente e que a corrente na bobina  $L$  nunca se anula, ou seja, o conversor encontra-se no modo de condução contínua. Quando se faz referência a tensão de saída  $V_o$  está-se a considerar o módulo da mesma.

A relação entre a tensão  $V_I$  na fonte e a tensão  $V_o$  de saída depende diretamente do valor de *duty-cycle*  $D$  aplicado à onda *PWM*. A relação é descrita pela expressão seguinte:

$$\frac{V_o}{V_I} = \frac{1}{1 - D} \quad (14)$$

A relação entre o valor médio da corrente  $i_I$  na fonte com o valor médio da corrente  $i_o$  na carga e com o *duty-cycle*  $D$  segue a seguinte expressão:

$$\frac{i_o}{i_I} = 1 - D \quad (15)$$

O *ripple* de tensão  $\Delta V_o$  na carga depende da frequência de comutação  $f$ , do valor médio da corrente  $i_o$  na carga, do *duty-cycle*  $D$  e do valor da capacidade do condensador  $C$ . A dependência referida é regida pela seguinte expressão:

$$\Delta V_o = \frac{D \cdot i_o}{f \cdot C} \quad (16)$$

Levando em consideração a tensão  $V_I$  na fonte, a tensão  $V_o$  na saída e a indutância da bobina  $L$ , a corrente  $i_L$  na bobina é definida pela seguinte derivada (*MOSFET S* em condução):

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_I}{L} \quad (17)$$

Quando a *MOSFET S* se encontra ao corte:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_I - V_o}{L} \quad (18)$$

O *ripple* de corrente  $\Delta i_L$  na bobina  $L$  depende da frequência de comutação  $f$ , da tensão  $V_I$  na fonte, do *duty-cycle*  $D$  e do valor de indutância da bobina  $L$ . A dependência descrita é regida pela seguinte expressão:

$$\Delta I_L = \frac{D \cdot V_I}{f \cdot L} \quad (19)$$

Na Figura 26 podem ser observadas algumas formas de onda, da tensão e da corrente, em alguns dos componentes que compõem o conversor *step-up*.  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  correspondem respetivamente ao intervalo de tempo em que o *MOSFET S* se encontra em condução ou ao corte.

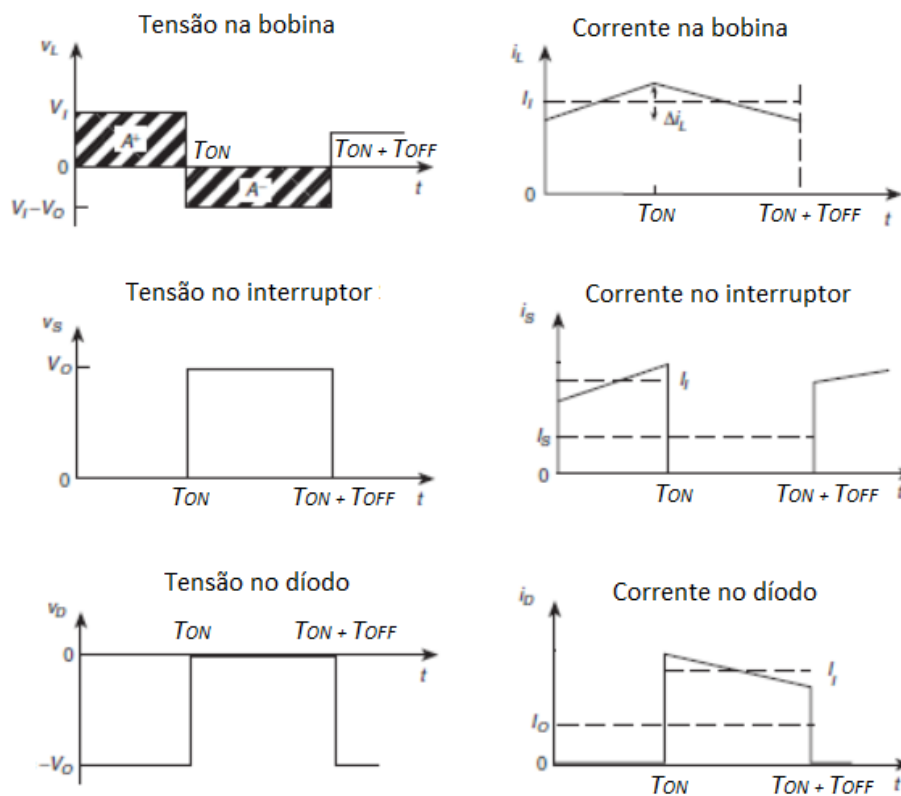


Figura 26 - Formas de onda da tensão e da corrente na bobina, no diodo e no interruptor (adaptado de [30]).

Em comparação com o conversor *step-up-down*, o conversor *step-up* apresenta a desvantagem de apenas conseguir manter na saída um valor de tensão igual ou superior a tensão de entrada. Contudo, o conversor *step-up* tem a vantagem de a sua tensão de saída não se encontrar inversamente polarizada em comparação com a tensão de entrada.

### 3.2.3. Conversor *step-down* ou *buck*

O conversor CC-CC *step-down* é um conversor do tipo fonte de tensão. Este é composto por um *MOSFET S* (interruptor), por um diodo *D*, por uma bobina *L*, por um condensador *C* e por uma carga *R*. Na Figura 27 pode-se observar o esquema elétrico do conversor *step-down*. Com

este tipo de conversor, os níveis de tensão  $V_o$  na carga podem ser ajustados para valores inferiores ou iguais ao valor de tensão  $V_i$  de entrada [30].

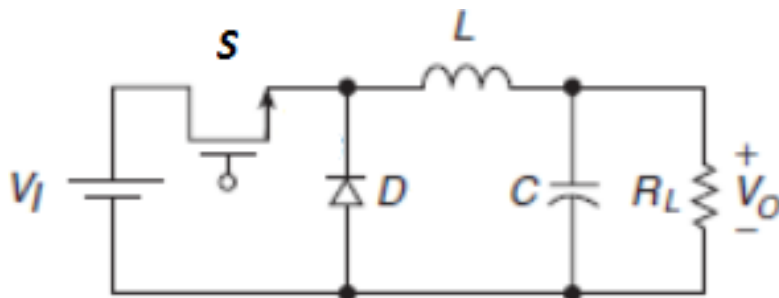


Figura 27 - Esquema elétrico do conversor *step-down* (adaptado de [30]).

Para analisar convenientemente este conversor é necessário considerar dois tipos de situações. A primeira situação corresponde a quando o *MOSFET S* se encontra em condução e a segunda situação diz respeito a quando o *MOSFET S* se encontra ao corte. Na Figura 28 apresenta-se os esquemas elétricos das duas situações descritas.

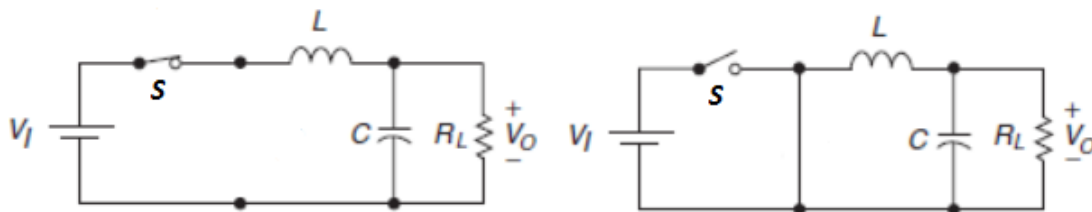


Figura 28 - Esquemas dos circuitos equivalentes do conversor quando o *MOSFET S* se encontra em condução ou ao corte (adaptado de [30]).

Durante a análise que se segue todos os componentes foram considerados ideais, a carga  $R_L$  foi considerada puramente resistiva, quando se faz referência a tensão de saída  $V_o$  está-se a considerar o módulo da mesma. Considerou-se ainda que o conversor se encontra a funcionar em regime permanente e que a corrente na bobina  $L$  nunca se anula, ou seja, o conversor encontra-se no modo de condução contínua.

A relação entre a tensão  $V_i$  na fonte e a tensão  $V_o$  de saída depende diretamente do valor de *duty-cycle*  $D$  aplicado à onda *PWM*. A relação é descrita pela expressão seguinte:

$$\frac{V_o}{V_i} = D \quad (20)$$

A relação entre o valor médio da corrente  $i$  na fonte com o valor médio da corrente  $i_o$  na carga e com o *duty-cycle*  $D$  segue a seguinte expressão:

$$\frac{i_o}{i_l} = \frac{1}{D} \quad (21)$$

O *ripple* de tensão  $\Delta V_o$  na carga depende da frequência de comutação  $f$ , do valor da tensão  $V_o$  na carga, do duty-cycle  $D$ , da capacidade do condensador  $C$  e da indutância da bobina  $L$ . A dependência referida é regida pela seguinte expressão:

$$\Delta V_o = \frac{V_o \cdot (1 - D)}{8 \cdot f^2 \cdot L \cdot C} \quad (22)$$

Levando em consideração a tensão  $V_I$  na fonte, a tensão  $V_o$  na saída e a indutância da bobina  $L$ , a corrente  $i_l$  na bobina é definida pela seguinte derivada (*MOSFET S* em condução):

$$\frac{d i_{iL}}{dt} = \frac{V_I - V_o}{L} \quad (23)$$

Quando a *MOSFET S* se encontra ao corte:

$$\frac{d i_{iL}}{dt} = \frac{V_o}{L} \quad (24)$$

O *ripple* de corrente  $\Delta I_L$  na bobina  $L$  depende da frequência de comutação  $f$ , da tensão  $V_I$  na fonte, da tensão  $V_o$  na carga, do duty-cycle  $D$  e do valor de indutância da bobina  $L$ . A dependência descrita é regida pela seguinte expressão:

$$\Delta I_L = \frac{D \cdot (V_I - V_o)}{f \cdot L} \quad (25)$$

Na Figura 29 podem ser observadas algumas formas de onda, da tensão e da corrente, em alguns dos componentes que compõem o conversor *step-down*.  $T_{ON}$  e  $T_{OFF}$  correspondem respetivamente ao intervalo de tempo em que o *MOSFET S* se encontra em condução ou ao corte.

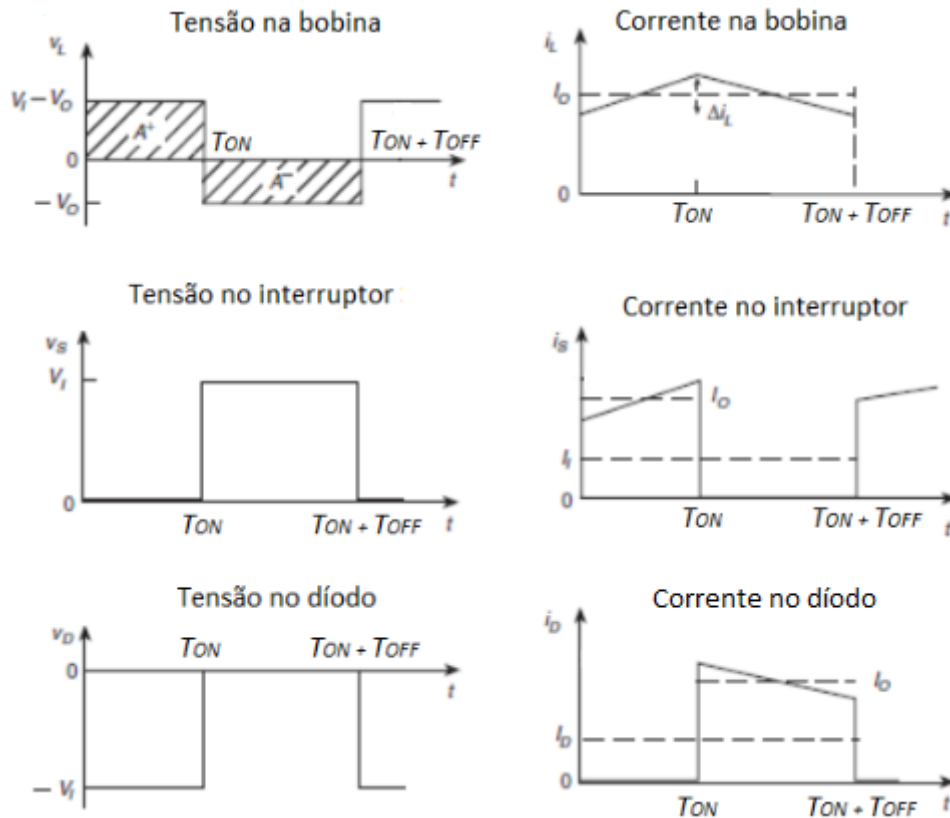


Figura 29 - Formas de onda da tensão e da corrente na bobina, no diodo e no interruptor (adaptado de [30]).

O conversor *step-down* consegue manter na saída um valor de tensão igual ou inferior à tensão de entrada. A tensão de saída mantém a mesma polaridade que a tensão de entrada.

### 3.3. Algoritmos MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)

No âmbito do carregamento do módulo de ultracondensadores pretende-se tirar o maior partido da potência disponibilizada pelo painel fotovoltaico. Para que tal seja possível é necessário que o painel se encontre a operar no ponto de máxima potência. De seguida serão apresentados alguns algoritmos usados para manter o painel a operar nesse ponto.

#### 3.3.1. Perturbação & Observação

O algoritmo seguidor do ponto de máxima potência perturbação e observação é um dos algoritmos mais usados. Isto deve-se ao facto de ser um algoritmo de fácil implementação e de exigir pouca capacidade computacional comparado com outros algoritmos existentes. Tal como o nome indica este algoritmo perturba e observa constantemente a potência em jogo no painel fotovoltaico para tentar encontrar o ponto de máxima potência. Dada a natureza do algoritmo, em



regime permanente a potência extraída do painel não atinge o ponto de máxima potência, mas oscila em torno do mesmo [31] [32]. A Figura 30 apresenta o fluxograma do algoritmo perturbação e observação.

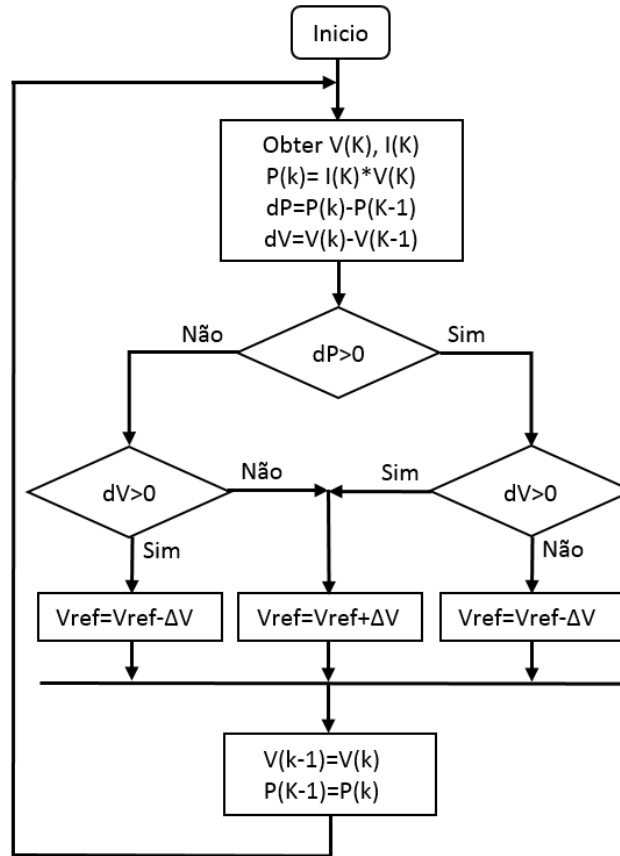


Figura 30 – Fluxograma do algoritmo Perturbação e Observação.

O algoritmo calcula a diferença da potência  $dP$  e a diferença de tensão  $dV$  à entrada do painel fotovoltaico. Estes cálculos levam em consideração os valores obtidos na iteração atual e na iteração anterior. Se a diferença de potência  $dP$  calculada for maior que zero significa que a potência ainda se encontra a crescer, de seguida é verificada a evolução da diferença de tensão  $dV$ . De acordo com a evolução de  $dV$  é tomada a decisão de introdução uma perturbação  $\Delta V$  positiva ou negativa na tensão de referência  $V_{ref}$ . A tensão de referência  $V_{ref}$  é a tensão na qual o painel fotovoltaico é forçado a operar. O algoritmo apresenta um comportamento igual ao referido anteriormente quando a diferença de potência  $dP$  é menor que zero, neste caso a potência encontra-se a decair.

### 3.3.2. Condutância Incremental

Em comparação direta com o algoritmo perturbação e observação, o algoritmo condutância incremental apresenta melhores resultados em regime permanente e na rapidez com que consegue seguir o ponto de máxima potência quando ocorrem variações rápidas de radiação. Todavia este método exige mais em termos de cálculo computacional [31] [32]. A Figura 31 apresenta o fluxograma do algoritmo condutância incremental.

Este algoritmo baseia-se na derivada da potência em jogo no painel em ordem à tensão para procurar o ponto de máxima potência. A derivada é descrita pela seguinte expressão:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (26)$$

Digitalmente a derivada é representada pela expressão:

$$I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \cong I_k + V_k \frac{I_k - I_{k-1}}{V_k - V_{k-1}} \quad (27)$$

A expressão pode ser reescrita:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad (28)$$

Considerando a expressão anterior temos:

- Se  $\Delta I/\Delta V = -I/V$ , o painel encontra-se a operar no ponto de máxima potência, logo a tensão de referência  $V_{ref}$  deve ser mantida;
- Se  $\Delta I/\Delta V > -I/V$ , o painel encontra-se a operar à esquerda do ponto de máxima potência, logo a tensão de referência  $V_{ref}$  deve ser incrementada;
- Se  $\Delta I/\Delta V < -I/V$ , o painel encontra-se a operar à direita do ponto de máxima potência, logo a tensão de referência  $V_{ref}$  deve ser decrementada.

Quando o painel já se encontra a operar no ponto de máxima potência ( $\Delta V = 0$ ) o algoritmo verifica a diferença entre a corrente atual e a corrente anterior. Se  $\Delta I = 0$ , o painel ainda se encontra



Onde  $k_1$  é a constante de proporcionalidade. O seu valor é independente das condições atmosféricas na qual o painel se encontra inserido, mas depende das características dos painéis o que o torna muitas vezes difícil de calcular, normalmente assumem-se valores de  $k_1$  que podem variar entre 0.71 e 0.78. A necessidade de mensurar a tensão de circuito aberto faz com que haja a necessidade de colocar o painel em circuito aberto periodicamente [31] [32] [33]. Na Figura 32 encontra-se o fluxograma do algoritmo tensão constante. Após calculada a tensão  $V_{mpp}$  através da expressão (29) e medida a tensão no painel  $V(k)$  é calculado o valor do erro referente à diferença entre as duas tensões. A tensão do painel converge para a tensão  $V_{mpp}$  através do índice de modulação  $M$  que atua sobre o valor do *duty-cycle* aplicado a uma onda *PWM*. O índice de modulação depende do seu valor anterior e do valor do erro multiplicado por um ganho  $G$ . Este ganho tem implicações diretas na velocidade de convergência e na estabilidade do sistema

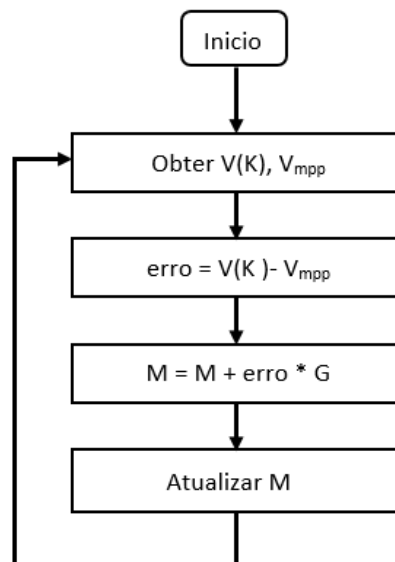


Figura 32 – Fluxograma do algoritmo Tensão Constante.



# 4. Válvula motorizada e módulo de ultracondensadores

Neste capítulo serão essencialmente descritos os trabalhos realizados no âmbito da válvula motorizada e no âmbito do módulo de ultracondensadores. Em primeiro lugar serão abordadas a arquitetura da válvula motorizada e do módulo de ultracondensadores. Posteriormente abordar-se-á a problemática do projeto. Por último, serão demonstrados os resultados de construção. Os testes realizados à válvula motorizada e ao módulo de ultracondensadores serão descritos no capítulo seguinte.

## 4.1. Arquitetura e especificações

Neste subcapítulo abordar-se-á a arquitetura e as especificações levadas em consideração para a construção da válvula motorizada e do módulo de ultracondensadores.

### 4.1.1. Válvula motorizada

A válvula motorizada tem como função controlar a direção do fluxo de água no sistema de irrigação. A válvula tem que usar um atuador capaz de acionar um passador de esfera de uma polegada e meia e tem que permitir saber o seu estado. Na Figura 33 pode-se observar o esquema representativo da arquitetura da válvula motorizada. A válvula será essencialmente composta por:

- Uma estrutura de suporte;
- Um passador de esfera;
- Um motor de corrente contínua;
- Sensores que permitam saber o estado da válvula.

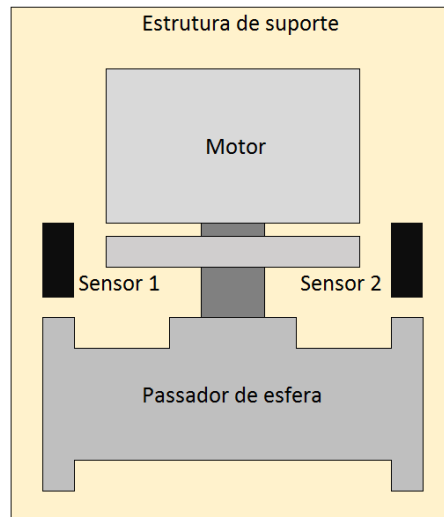


Figura 33 - Arquitetura da válvula motorizada.

A estrutura de suporte tem de manter todo o equipamento pertencente a válvula motorizada no devido lugar. Esta tem de ser capaz de aguentar as forças inerentes ao fecho e à abertura da válvula. O passador de esfera permite um controlo sobre a passagem água. Este é atuado através de um motor de corrente contínua. O controlador do sistema de irrigação necessitará de saber em que estado a válvula se encontra, para possibilitar essa informação serão usados dois sensores, um para cada estado.

### 4.1.2. Módulo de ultracondensadores

Um dos elementos armazenadores de energia do controlador energeticamente autónomo será um módulo de ultracondensadores. Este módulo tem que permitir a colocação de dois ultracondensadores em série. Na Figura 34 pode-se observar o esquema representativo da arquitetura do módulo de ultracondensadores. Esse módulo será essencialmente composto por:

- Uma estrutura de suporte;
- Placas metálicas de contacto;
- Dois ultracondensadores.

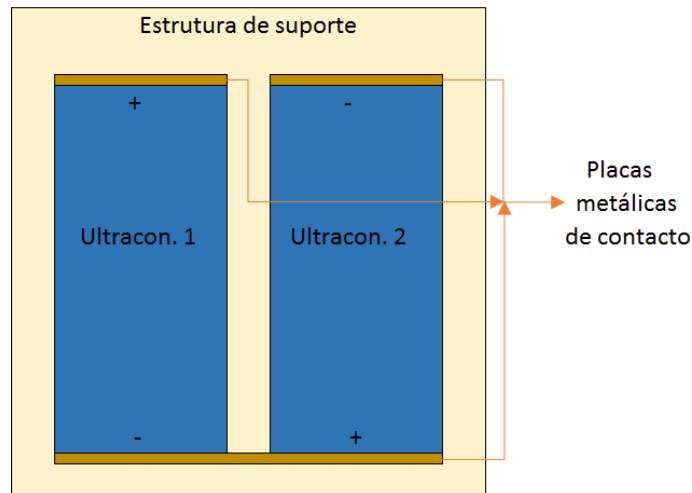


Figura 34 - Arquitetura do módulo de ultracondensadores.

A estrutura de suporte tem como função fixar todos os elementos pertencentes ao módulo dos ultracondensadores no devido lugar. As placas metálicas de contacto inferiores permitirão colocar os dois ultracondensadores em série. As placas superiores servirão de suporte aos condutores que posteriormente serão ligados ao controlador. Os ultracondensadores serão usados como elemento armazenador de energia.

### 4.2. Projeto

Para desenvolver a válvula motorizada e o módulo de ultracondensadores foi necessário escolher os diferentes componentes que constituem quer a válvula quer o módulo. As respetivas escolhas serão apresentadas neste subcapítulo.

#### 4.2.1. Válvula motorizada

O material escolhido para a construção do suporte para a válvula motorizada foi o compensado naval. Este material foi escolhido devido as suas características, é um material fácil de trabalhar e tem a resistência necessária para suportar as forças exercidas sobre a estrutura. Na Figura 35 pode-se observar o material mencionado.





Figura 35 - Compensado naval [34].

Como foi referido anteriormente a válvula motorizada tem como função controlar a direção do fluxo de água através do controlo de um passador de esfera. Na Figura 36 pode-se observar o tipo de passador descrito.



Figura 36 - Passador de esfera [35].

Para atuar sobre o passador de uma polegada e meia é necessário um motor com binário suficiente para permitir rodar a esfera do passador. A escolha acabou por recair por um motor de corrente contínua com caixa redutora. O motor escolhido já se encontrava disponível no laboratório e não foi possível descobrir o respetivo fabricante. Apenas se sabia que o motor era usado no setor automóvel e tinha como função atuar sobre o elevador de um vidro elétrico de uma porta. Além disso foi possível apurar que o motor funcionava com uma tensão de alimentação de cerca de 12 V na sua anterior função. Na Figura 37 pode-se observar um motor igual ao usado. Para identificar o estado da válvula recorreu-se a sensores óticos.



Figura 37 - Motor usado na válvula motorizada.

Após terem sido feitas as escolhas necessárias à construção da válvula motorizada passou-se ao desenho técnico da mesma. A válvula foi desenhada recorrendo ao *software* de desenho técnico *AutoCAD 2010* [36]. Na Figura 38 pode-se observar uma imagem do respetivo desenho técnico.

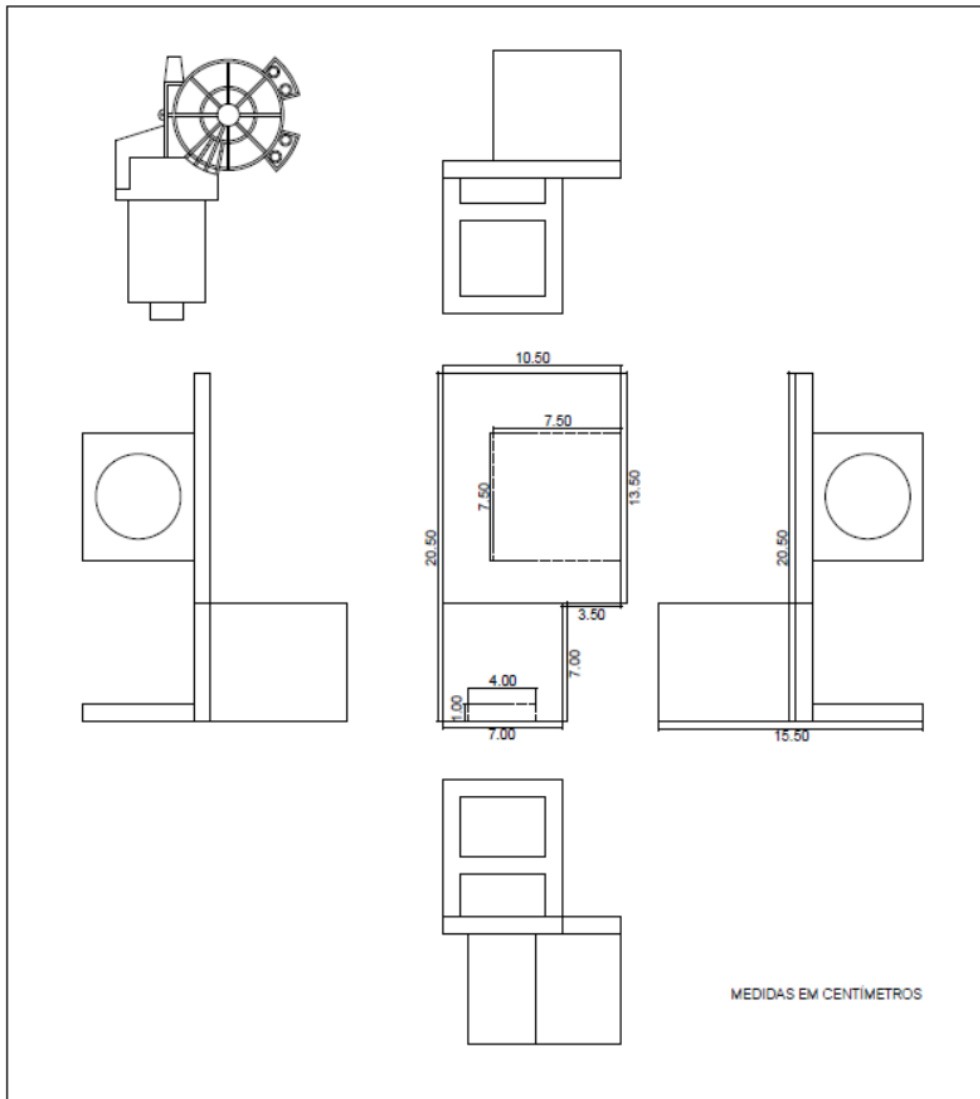


Figura 38 - Desenho técnico da válvula motorizada.

Terminado o desenho técnico, recorreu-se ao *software* gráfico 3D *SketchUp* [37] para gerar imagens tridimensionais da válvula motorizada. Na Figura 39 é possível visualizar uma das imagens geradas. As imagens foram criadas com o intuito de se criar uma melhor percepção do que será a versão final da válvula motorizada.

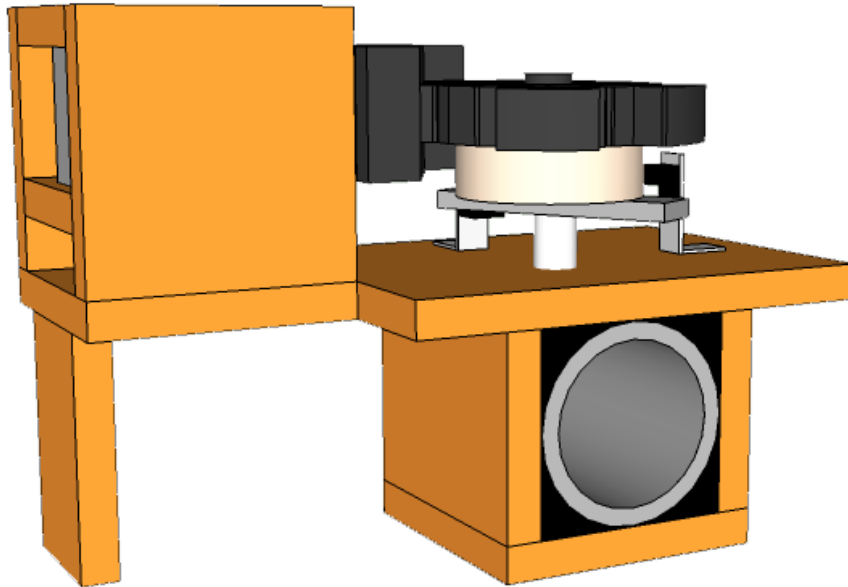


Figura 39 - Imagem tridimensional da válvula motorizada.

### 4.2.2. Módulo de ultracondensadores

Para construir a estrutura do módulo de ultracondensadores foi escolhido o compensado naval. Esta escolha foi tomada tendo em consideração as razões já descritas no subcapítulo anterior.

Em relação as placas metálicas de contacto a escolha incidiu sobre as placas usadas durante o fabrico de circuitos impressos (*PCB - Printed Circuit Board*). Estas placas são constituídas por uma base em fibra de vidro revestida por uma folha de cobre. Na Figura 40 pode visualizar uma imagem das placas referidas.



Figura 40 - Placas usadas durante o fabrico de circuitos impressos [38].

Os ultracondensadores selecionados para serem usados no módulo de ultracondensadores são os *Maxwell* BCAP3000 [39]. As suas características elétricas serão descritas no capítulo seguinte.

Feitas as escolhas necessárias à construção do módulo de ultracondensadores, passou-se ao desenho técnico. Tal como no desenvolvimento da válvula motorizada recorreu-se ao *AutoCAD* 2010 para o efeito. Na Figura 41 pode-se observar uma imagem do respetivo desenho técnico.

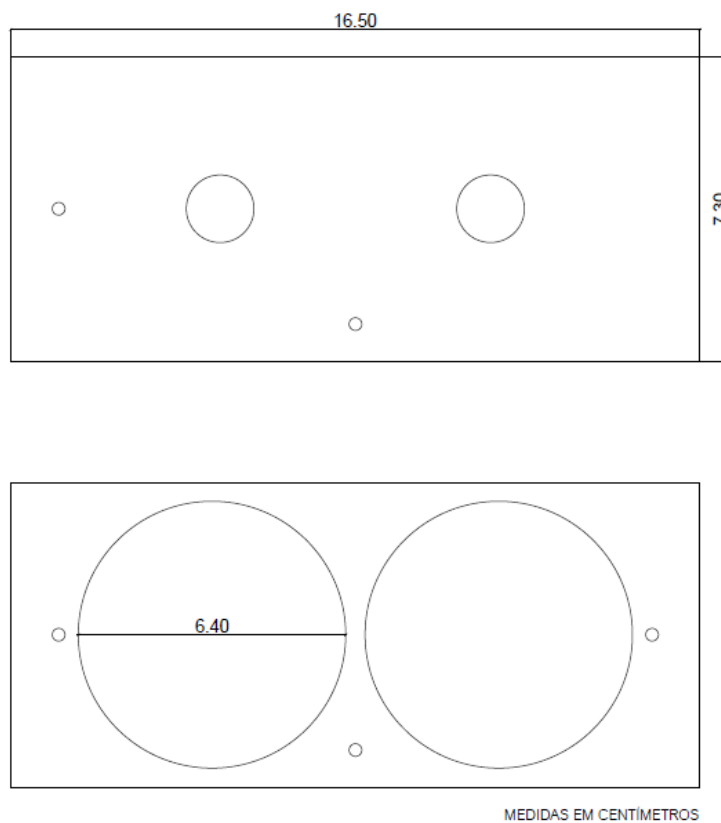


Figura 41 - Desenho técnico do módulo de ultracondensadores.

Para se obter uma melhor percepção do que será a versão final do módulo de ultracondensadores recorreu-se ao *software* gráfico 3D *SketchUp* para gerar imagens tridimensionais do módulo. Na Figura 42 pode-se observar uma das imagens geradas.



Figura 42 - Imagem tridimensional do módulo de ultracondensadores.

### 4.3. Resultados

Terminada a fase de estudo e de desenho técnico da válvula motorizada e do módulo de ultracondensadores passou-se às respetivas implementações práticas. Neste subcapítulo serão demonstrados os resultados de construção quer da válvula motorizada quer do módulo de ultracondensadores.

#### 4.3.1. Válvula motorizada

Na Figura 43 pode-se observar a placa de circuito impresso desenvolvida para suportar um dos sensores óticos. Como são usados dois sensores na válvula motorizada a placa foi produzida duas vezes. No apêndice A encontra-se o esquemático e o *layout* da placa desenvolvida. As especificações do tipo de sensores usados serão apresentados no capítulo seguinte.



Figura 43 - Placa de circuito impresso desenvolvida para suportar os sensores óticos.

Os resultados do desempenho da válvula motorizada serão descritos no capítulo seguinte. Na Figura 44 pode-se observar uma imagem da válvula motorizada desenvolvida.



Figura 44 - Válvula motorizada desenvolvido.

### 4.3.2. Módulo de ultracondensadores

O módulo de ultracondensadores, devido às suas características de construção mais simples não apresentou nenhuma folga entre os componentes que o constituem. O módulo mostrou-se capaz de suportar com eficiência e robustez os ultracondensadores no seu devido lugar. Na Figura 45 pode-se observar uma imagem do módulo de ultracondensadores desenvolvido.



Figura 45 - Módulo de ultracondensadores desenvolvido.



# 5. Controlador energeticamente autónomo

Neste capítulo será essencialmente descrito o trabalho realizado no âmbito do controlador energeticamente autónomo. Em primeiro lugar será abordada a arquitetura do controlador. Seguidamente abordar-se-á os modelos de simulação e a implementação prática do controlador. Por último, serão descritos os resultados provenientes da simulação e dos testes realizados ao sistema.

## 5.1. Arquitetura e especificações do controlador energeticamente autónomo

O controlador energeticamente autónomo pode ser decomposto nos seguintes subsistemas:

- Carregamento e balanceamento dos elementos armazenadores de energia;
- Sistema de alimentação do controlador;
- Controlo e alimentação da válvula motorizada;
- Sistema de comunicação.

Durante este subcapítulo irão ser evidenciados alguns esquemas demonstrativos da arquitetura do controlador energeticamente autónomo. Esses esquemas são compostos por blocos e por setas. As setas a azul representam o fluxo de energia e as setas a cinzento representam linhas de controlo.

### 5.1.1. Carregamento e balanceamento dos elementos armazenadores de energia

O sistema de carregamento tem como função extrair a energia proveniente da radiação solar, através de um painel fotovoltaico, e carregar devidamente um módulo de ultracondensadores ou uma bateria de Lítio-Polímero. Para controlar o fluxo de energia do painel para os elementos armazenadores de energia fez-se uso de um conversor *setp-down*. Este opera



como fonte de corrente se se pretender carregar a bateria. Se o objetivo for carregar o módulo de ultracondensadores o conversor é usado para extrair a potência máxima do painel.

O painel fotovoltaico apresenta uma corrente de curto-circuito máxima de 1.22 A, uma tensão de circuito aberto máxima de 20.59 V, é capaz de fornecer uma potência máxima de 20 W [40]. A bateria é composta por duas células em série de 3.7 V cada, apresenta uma tensão nominal de 7.4 V e uma capacidade nominal de 1000 mAh, o que corresponde a uma capacidade de armazenamento de 7.4 Wh. O módulo de ultracondensadores é composto por dois ultracondensadores em série, cada um com uma tensão máxima suportada de 2.7 V e uma capacidade de 3000 F. Na totalidade o módulo suporta uma tensão máxima de 5.4 V e tem uma capacidade de armazenamento de 6 Wh [39]. Na Figura 46 pode-se observar a arquitetura do sistema descrito.

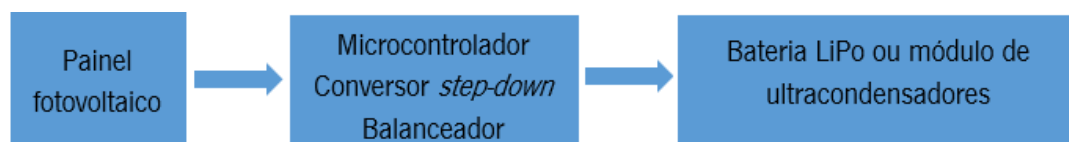


Figura 46 - Arquitetura do sistema de carregamento e balanceamento.

O balanceamento das células da bateria e do módulo dos ultracondensadores é efetuado através de uma resistência e um transistor bipolar em paralelo com cada uma das células. Assim é possível ter um balanceamento ativo que permite controlar individualmente o estado de carga de cada uma célula.

### **5.1.2. Sistema de alimentação do controlador**

O controlador pode ser alimentado a partir do painel fotovoltaico ou a partir de um dos dois elementos armazenadores de energia (bateria ou módulo de ultracondensadores). Quando o elemento armazenador de energia está descarregado, toda a energia necessária ao bom funcionamento do sistema de controlo provém do painel fotovoltaico. Quando o painel não consegue fornecer energia para alimentar o controlador o elemento armazenador de energia fornece a energia necessária ao bom funcionamento do sistema. A Figura 47 ilustra o sistema de alimentação do controlador.

### Controlador energeticamente autónomo

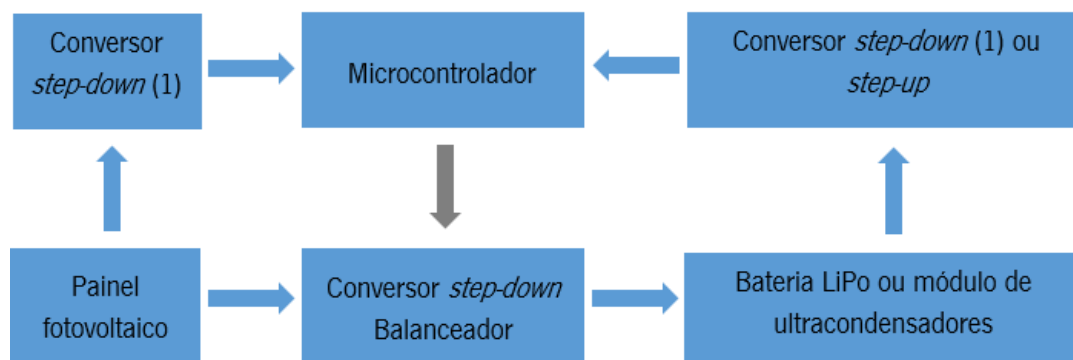


Figura 47 – Sistema de alimentação do controlador.

Quando o sistema de controlo está a ser alimentado pelo painel fotovoltaico é necessário baixar a tensão para 5 V, isto é feito recorrendo a um conversor *step-down* (1). Quando o sistema é alimentado por um dos elementos armazenadores de energia existem duas hipóteses. Se a alimentação partir do módulo de ultracondensadores e a tensão do módulo for inferior a 5 V, a tensão de alimentação do sistema é regulada para 5 V através de um conversor *step-up*. Caso a alimentação do sistema tenha origem na bateria a tensão é regulada para 5 V através de um conversor *step-down* (1).

#### 5.1.3. Controlo e alimentação da válvula motorizada

O painel não consegue fornecer a intensidade de corrente necessária para alimentar a válvula motorizada. Dado este facto, a válvula só pode ser alimentada a partir dos elementos armazenadores de energia. A válvula motorizada é comandada a partir do microcontrolador. Este sabe o estado da mesma por intermédio de dois sensores fins de curso óticos. Na Figura 48 pode-se observar um esquema ilustrativo do controlo e da alimentação da válvula.

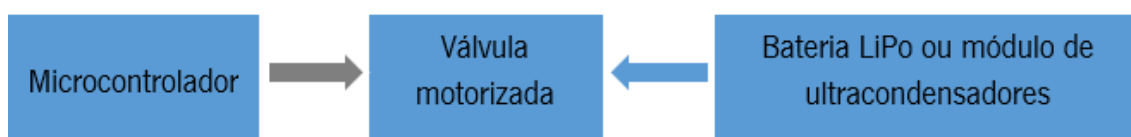


Figura 48 - Controlo e alimentação da válvula motorizada.

#### 5.1.4. Sistema de comunicação

A comunicação entre o controlador energeticamente autónomo e o sistema *SCADA* é feito através de *transceivers XBee PRO S2B* [41]. A comunicação usa uma topologia de rede *Mesh*. O *XBee coordinator* encontra-se diretamente ligado à máquina onde se encontra o servidor *web*. Os

módulos *XBee* que ficam junto dos controladores energeticamente autónomos são configurados como *Routers*. A Figura 49 representa o esquema ilustrativo da topologia de rede adotada.

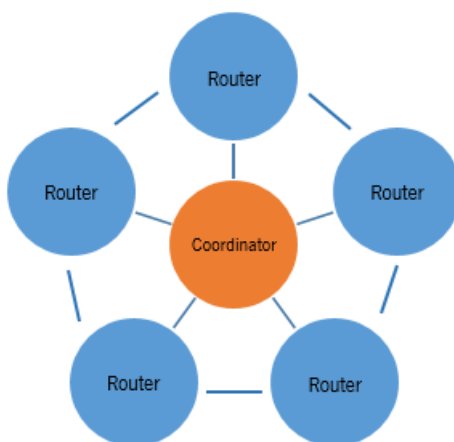


Figura 49 – Topologia de rede *Mesh*.

Esta topologia permite que a informação flua entre módulos através de diferentes percursos. Os módulos mensuram a potência do sinal entre si para atualizar as suas tabelas de endereços. Desse modo se o *coordinator* quiser enviar informação para um *router* distante, esta vai percorrer o percurso em que a qualidade do sinal entre módulos é melhor.

## 5.2. Projeto e modelos de simulação

Neste subcapítulo encontra-se todo o desenvolvimento e dimensionamento do controlador energeticamente autónomo. Apresentar-se-á os modelos de simulação e o dimensionamento dos principais componentes usados no desenvolvimento do controlador.

### 5.2.1. Carregamento e balanceamento dos elementos armazenadores de energia

Aqui abordar-se-á o dimensionamento que diz respeito ao carregamento e balanceamento dos elementos armazenadores de energia, e o seu respetivo modelo de simulação desenvolvido no *software* de simulação *PSIM (Power Simulator)* [42]. Os modelos de simulação usados encontram-se nos apêndices B e C.

#### 5.2.1.1. Carregamento dos elementos armazenadores

Como já foi referido anteriormente, a energia necessária para o carregamento dos elementos armazenadores de energia provém de um painel fotovoltaico. O valor de potência

nominal inicialmente pensado para o painel foi de 10 W, mas como este não estava disponível dentro do tempo necessário, foi adquirido um painel com as seguintes características:

- Potência no ponto de máxima potência ( $P_{MPP}$ ): 20 W;
- Tensão no ponto de máxima potência ( $V_{MPP}$ ): 17.49 V;
- Corrente no ponto de máxima potência ( $I_{MPP}$ ): 1.14 A;
- Tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ): 20.59 V;
- Corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ): 1.22 A.

Usou-se o modelo solar (modelo físico) do *PSIM* para simular o painel, tal como se pode observar na Figura 50. Para efeitos de simulação considerou-se uma temperatura de 25 °C para as células e uma intensidade luminosa de 1000 W/m<sup>2</sup>.

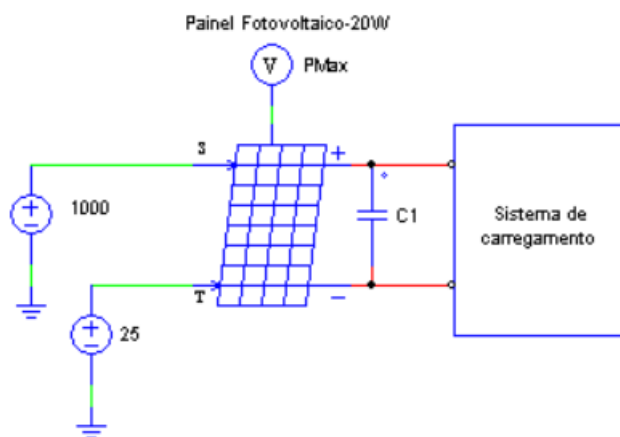


Figura 50 - Modelo de simulação do painel fotovoltaico

Para parametrizar o painel foi usado um dos utilitários do *software* de simulação, como se pode observar na Figura 51. Este utilitário recebe os valores especificados pelo fabricante no *datasheet* e calcula os parâmetros para o modelo de simulação. O utilitário permite guardar os valores dos parâmetros para uma posterior utilização. Para além disso, o utilitário também calcula as curvas características I-V e P-V do painel.

## Controlador energeticamente autónomo

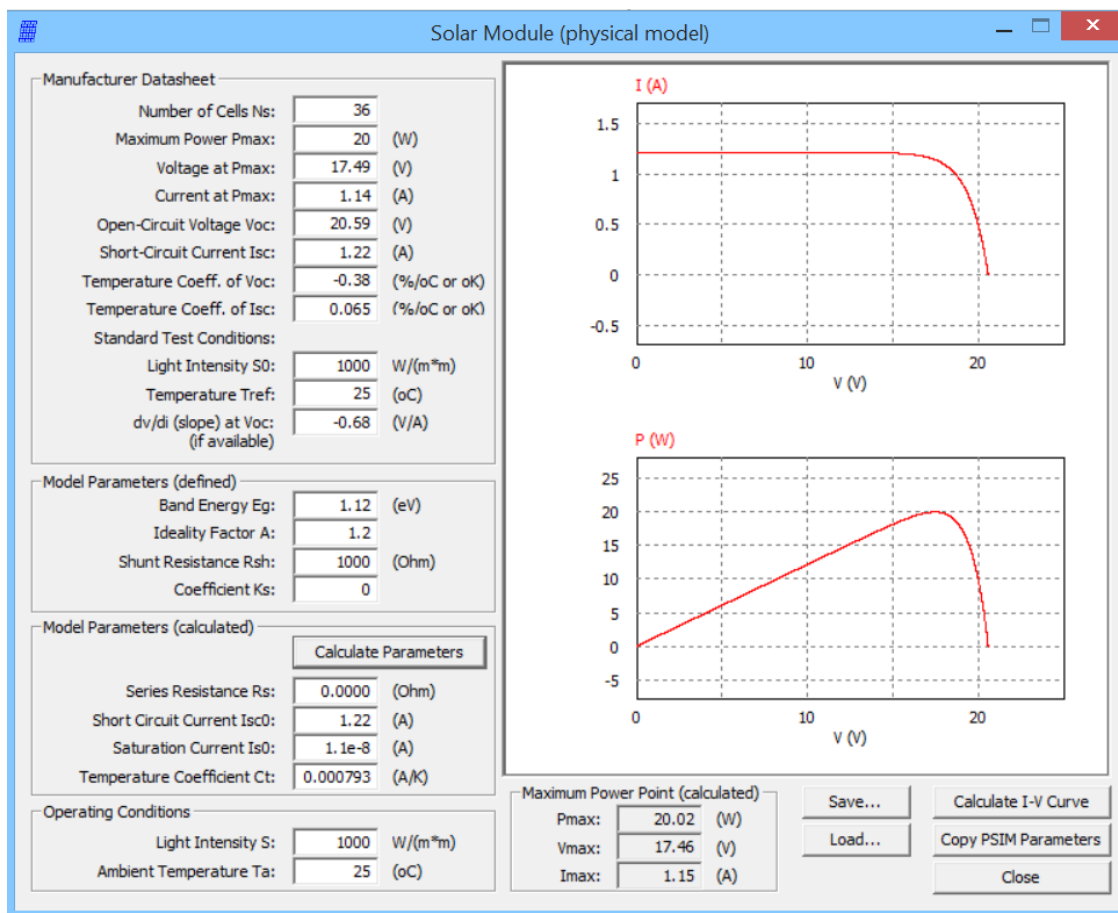


Figura 51 - Parametrização do modelo do painel fotovoltaico.

Depois de os parâmetros do modelo de simulação do painel terem sido calculados foram importados para o modelo, como pode ser observado na Figura 52.

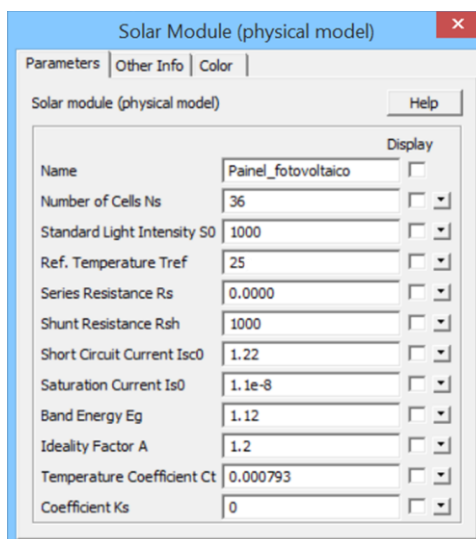


Figura 52 - Modelo do painel fotovoltaico parametrizado.

Para evitar o consumo de uma corrente com forma de onda quadrada proveniente do painel, foi colocado à entrada do circuito que permite carregar os elementos armazenadores de energia um filtro de segunda ordem LC. Na Figura 53 podemos observar a posição do filtro LC no circuito

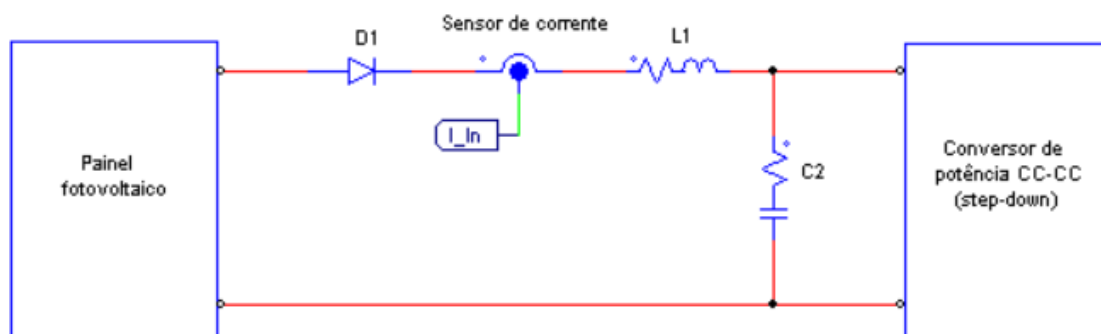


Figura 53 - Filtro LC à entrada do circuito.

O filtro foi dimensionado para que a frequência de corte fosse bastante inferior à frequência de comutação do *MOSFET* usado no conversor de potência CC-CC do tipo *step-down*, que será apresentado na página 61. O condensador tem uma capacidade (C) de 1000  $\mu\text{F}$  e suporta uma tensão máxima de 35 V, para efeitos de simulação foi considerada uma resistência em série de 40 m $\Omega$ . A bobina *Bourns JW Miller – 2118-V-RC* [43] tem uma indutância (L) de 330  $\mu\text{H}$  e uma resistência em série de 230 m $\Omega$ . Na equação (30) pode-se observar o cálculo da frequência de corte ( $f_c$ ) do filtro.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Leftrightarrow f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{330 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}} \Leftrightarrow f_c = 277,05 \text{ Hz} \quad (30)$$

Para evitar que a energia flua dos elementos armazenadores de energia para o painel, na ausência de radiação solar, optou-se por se usar o diodo *schottky* MBR1045 [44] que suporta uma corrente até 10 A e uma tensão reversa de 45 V.

Nesta zona do circuito é medida a corrente proveniente do painel, uma vez que esta se encontra filtrada. Para medir a corrente foi usada uma placa desenvolvida pela *Sparkfun*, esta é composta pelo sensor de corrente ACS712 [45] e pelo amplificador operacional OPA344 [46]. A placa pode ser observada na Figura 54.



Figura 54 - Placa desenvolvida pela Sparkfun [47].

Com esta placa consegue-se medir correntes AC e DC até 5 A. De origem a frequência de corte do sinal de saída da placa é de cerca de 34 Hz, mas com a remoção do condensador C1 essa frequência passou a ser de 80 kHz [47]. Na Figura 55 pode-se observar o esquemático da placa.

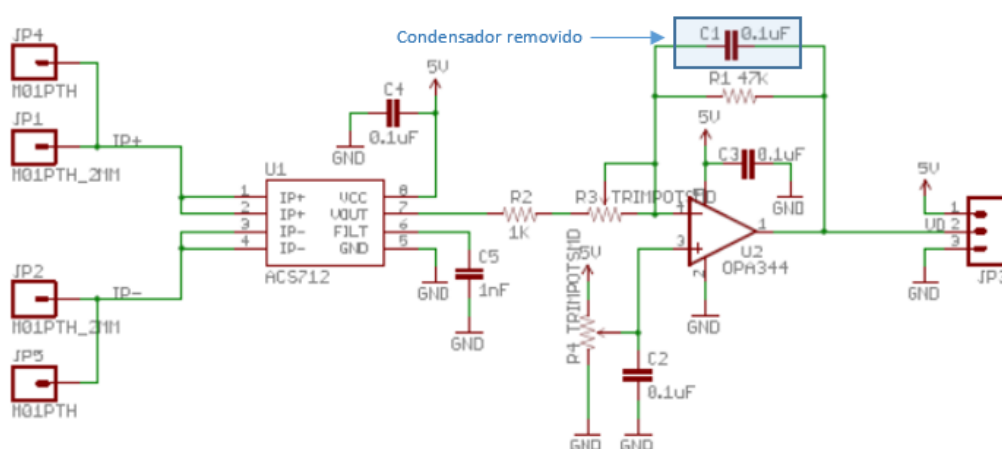


Figura 55 - Esquemático da placa da Sparkfun (adaptada de Schematic [47]).

Como nenhuma das frequências de corte anteriores era interessante para este projeto foi colocado um filtro passa-baixo de primeira ordem, à saída da placa, dimensionado para uma frequência de corte ( $f_c$ ) de aproximadamente 1 kHz. O filtro é composto por uma resistência (R) e um condensador (C). O valor de frequência ( $f_c$ ) foi dimensionado de modo a atenuar o ruído provocado pela comutação do *MOSFET* usado no conversor de potência CC-CC do tipo *step-down*, o qual referir-se-á a seguir. A equação (31) descreve o cálculo da frequência de corte.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \Leftrightarrow f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 6800 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} \Leftrightarrow f_c = 1063,87 \text{ Hz} \quad (31)$$

Na Figura 56 pode-se observar a componente do circuito que diz respeito ao conversor de potência *step-down*. Este permite que a energia flua de forma controlada do painel fotovoltaico para os elementos armazenadores de energia. Quando se pretende carregar o módulo de ultracondensadores o conversor *step-down* é usado com o intuito de extrair a máxima potência do

painel, através de um algoritmo *MPPT*. Caso se use a bateria como elemento armazenador de energia o conversor é usado com o propósito de controlar a corrente de carregamento da bateria, através de um controlador PI digital. Os algoritmos de controlo *MPPT* e PI fazem-se refletir no circuito através de uma onda *PWM* aplicada a gate do *MOSFET* MOS1. O microcontrolador escolhido para gerir o controlador energeticamente autónomo foi o *ATmega328P* da *Atmel* [48]. O código desenvolvido durante a implementação prática foi elaborado em linguagem de programação C.

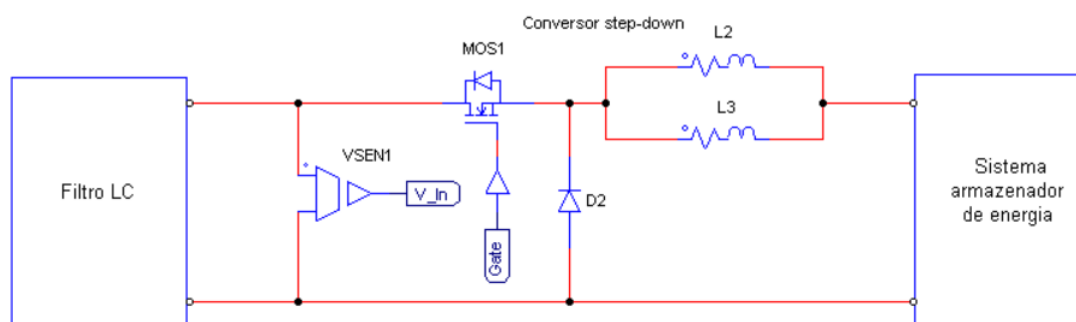


Figura 56 - Conversor de potência *step-down*.

O conversor foi dimensionado para a situação mais exigente, situação em que se pretende carregar o módulo de ultracondensadores, a corrente de saída no conversor pode chegar aos 16 A nos instantes iniciais (desprezando as perdas no circuito). Deste modo optou-se por se usar o *MOSFET* P80PF55 [49] capaz de suportar até 80 A e uma tensão reversa de 55 V, um diodo *schottky* MBR1660 [50] capaz de suportar até 16 A e uma tensão reversa de 60 V, duas bobinas *Bourns JW Miller- 2319-V-RC* [51] de 390  $\mu\text{H}$  em paralelo, dando origem a uma bobina equivalente de 195  $\mu\text{H}$ .

Na figura acima pode-se observar o sensor de tensão (VSEN1), este encontra-se em paralelo com o condensador C2 que pertence ao filtro LC. Neste ponto mensura-se uma tensão mais estável do que aos terminais do painel. O valor de tensão medido neste ponto não corresponde ao valor medido aos terminais do painel mas como a potência à entrada do filtro LC é igual à potência de saída do mesmo, é possível na mesma extrair a potência máxima do painel. O sensor de tensão foi implementado recorrendo a um divisor de tensão resistivo, composto por uma resistência de 36 k $\Omega$  e outra de 8.2 k $\Omega$ .

Durante a simulação do carregamento dos ultracondensadores consideraram-se os valores especificados pelo fabricante, 3000 F e uma resistência em série equivalente de 290  $\mu\Omega$  [39]. Para a bateria, foram levadas em consideração as características descritas na própria bateria,



7.4 V e 1000 mAh, a sua resistência interna foi medida experimentalmente e constatou-se que era de 152 mΩ. Na Figura 57 pode-se observar uma imagem da bateria e de um dos ultracondensadores usados.



Figura 57 - Ultracondensador de 3000 F, 2.7 V e bateria de 7.4 V, 1000 mAh.

As baterias de íões de lítio, tecnologia onde se enquadra a bateria usada neste projeto, apresentam uma degradação de 30 % da sua capacidade nominal ao fim de um determinado número de ciclos completos de carga. O número de ciclos está normalmente compreendido entre os 250 e os 500. Esta tecnologia de baterias exige uma manutenção frequente quando armazenada. Se a quantidade de energia numa bateria for inferior à quantidade mínima especificada pelo fabricante, o processo de degradação da mesma sofre uma aceleração, encurtando assim a sua vida útil [52] [53].

Os ultracondensadores apresentam uma degradação de 20 % da sua capacidade máxima ao fim de 1000000 de ciclos completos de carga [39]. Os ultracondensadores não apresentam problemas de armazenamento, uma vez que podem ser totalmente descarregados. No entanto, apresentam uma densidade energética por unidade de volume muito inferior à das baterias. Isto faz com que para a mesma quantidade de energia a armazenar, os ultracondensadores necessitam de um volume superior aquele que é requerido pelas baterias.

A bateria usada neste projeto custou cerca de 10 euros. Os dois ultracondensadores usados no módulo custaram 10 vezes mais e ocupam 21 vezes mais espaço por Watt que a bateria. Se se considerar os 500 ciclos de carga da bateria, seriam necessárias 2000 baterias para igualar o mesmo número de ciclos de carga dos ultracondensadores. Isto implicaria gastar cerca de 20000 euros em baterias para garantir um tempo útil de vida igual ao dos ultracondensadores.

### 5.2.1.2. Balanceamento dos elementos armazenadores

Como já foi referido anteriormente, o módulo de ultracondensadores é composto por dois ultracondensadores em série e a bateria é composta por duas células com a mesma disposição. Como os ultracondensadores e as células não são exatamente iguais, durante o carregamento dos elementos armazenadores de energia é necessário mensurar a tensão existente em cada uma das células ou em cada um dos ultracondensadores. Este processo é essencial para impedir que um dos ultracondensadores ou uma das células ultrapasse a tensão máxima especificada pelo fabricante. Para aproveitar ao máximo a capacidade de armazenamento dos elementos armazenadores de energia é necessário balancear cada uma das suas componentes individualmente.

Na Figura 58 pode-se observar o bloco usado durante a simulação do circuito de balanceamento. UC1 e UC2 representam o modelo equivalente dos ultracondensadores. Quando se pretende simular o comportamento da bateria, UC1 e UC2 são trocados por C1\_B e C2\_B que representam as duas células da bateria. Cada célula da bateria é representada por uma fonte CC e por uma resistência em série. O modelo de simulação considerado para a bateria não corresponde com a devida exatidão ao modelo real da mesma. Isto deve-se ao facto de o simulador não possuir um modelo equivalente adequado e à falta de documentos técnicos sobre a bateria.

O código desenvolvido para o balanceamento dos sistemas armazenadores durante a simulação em *PSIM* encontra-se no apêndice D e E.

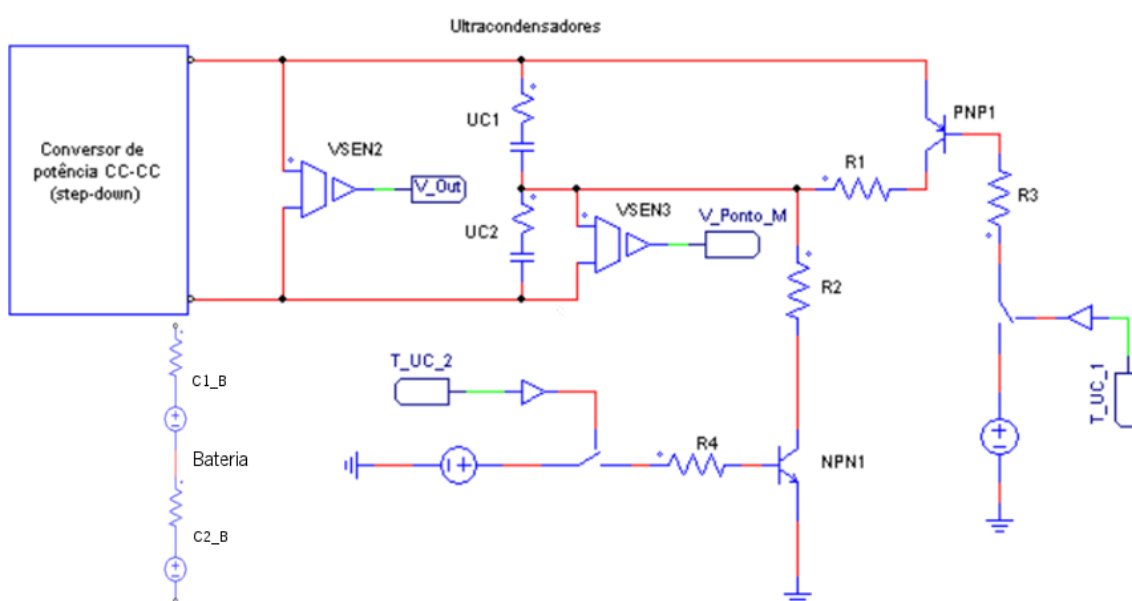


Figura 58 - Sistema de balanceamento (em *PSIM*).

Quando um dos ultracondensadores atingir uma diferença de potencial de 2.6 V ou uma das células atingir uma diferença de potencial de 4.2 V, o carregamento dos elementos armazenadores de energia é desligado. De seguida é medida a diferença de potencial na outra célula ou no outro ultracondensador e se a diferença de potencial for inferior entra em ação o sistema de balanceamento. O ultracondensador com 2.6 V ou a célula com 4.2 V são descarregados através do transistor bipolar NPN1 ou PNP2, até atingirem o valor da outra célula ou do outro ultracondensador. De seguida o sistema de carregamento volta a ser ligado. O processo repete-se até ambas as células terem uma diferença de potencial de 4.2 V ou ambos os ultracondensadores terem uma diferença de potencial 2.6 V.

Os valores dos potenciais os terminais dos ultracondensadores e os terminais das células da bateria são obtidos através do sensor VSEN2 e VSEN3. Na implementação prática estes sensores são dois divisores de tensão resistivos compostos por duas resistências de 10 K $\Omega$ .

Para dimensionar o sistema de balanceamento dos elementos de armazenamento de energia especificou-se um corrente de descarga máxima de 1.5 A para os ultracondensadores e uma corrente de descarga máxima de 2 A para a bateria.

Considerando os valores de corrente de descarga referidos anteriormente dimensionou-se o circuito da seguinte maneira: as resistências R1 e R2 são ambas de 2.35  $\Omega$  e 10 W, a resistência R3 é de 510  $\Omega$  e a resistência R4 é de 820  $\Omega$ . Para controlar o descarregamento optou-se por se usar os transístores bipolares *Darlington* NBD675 [54] e BD676 [55].

### 5.2.1.3. Controlador PI digital

Para efetuar o carregar da bateria optou-se por usar um controlador PI, na Figura 59 pode-se observar o bloco de programação usado no simulador *PSIM*. O código foi escrito em linguagem C. No apêndice E encontra-se o código usado durante a simulação.

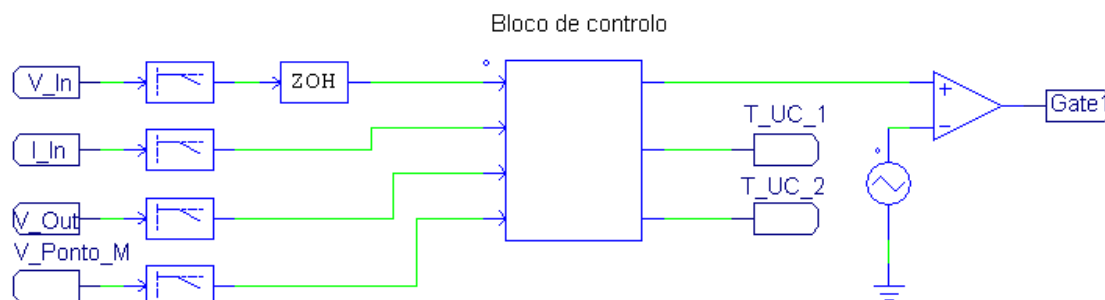


Figura 59 - Bloco de controlo usado em *PSIM*.

O controlador PI tem como função controlar a corrente de carga da bateria através do controlo da potência fornecida pelo painel fotovoltaico. Para esse efeito considerou-se a bateria completamente descarregada quanto a tensão aos seus terminais chegar aos 6.6 V, e completamente carregada aos 8.4 V. Se o controlador extrair 10 W do painel fotovoltaico e considerando os valores de tensão máximo e mínimo estabelecidos para a bateria, esta será carregada com uma corrente que varia entre 1.52 A (bateria completamente descarregada) e 1.19 A (bateria completamente carregada). Os sensores que permitem mensurar os valores de corrente e tensão do painel fotovoltaico já foram descritos em 5.2.1.1.

No modelo de simulação considerou-se uma frequência de amostragem de 1 kHz e uma frequência de comutação de 5 kHz para o *MOSFET* usado no conversor *step-down*. Quanto ao controlador PI considerou-se um ganho proporcional de 2.5 e um ganho integral de 0.020, estes valores foram obtidos experimentalmente até terem sido obtidos valores de simulação considerados satisfatórios. Na Figura 60 encontra-se o fluxograma do algoritmo implementado. No fluxograma a *Potencia\_p* representa a potência em jogo no painel, *corrente\_p* e *tensao\_p* representam respetivamente a corrente no painel e a tensão no painel, *Potencia\_r* representa a potência que se pretende extrair do painel. A variável *D* representa o *duty-cycle*, em valor percentual, a aplicar à *gate* do *MOSFET* do conversor *step-down*. A variável *h* representa o intervalo de tempo entre iterações do controlador. Para evitar *overshoots* acentuados foi considerado durante a implementação um sistema de *anti-reset windup*.

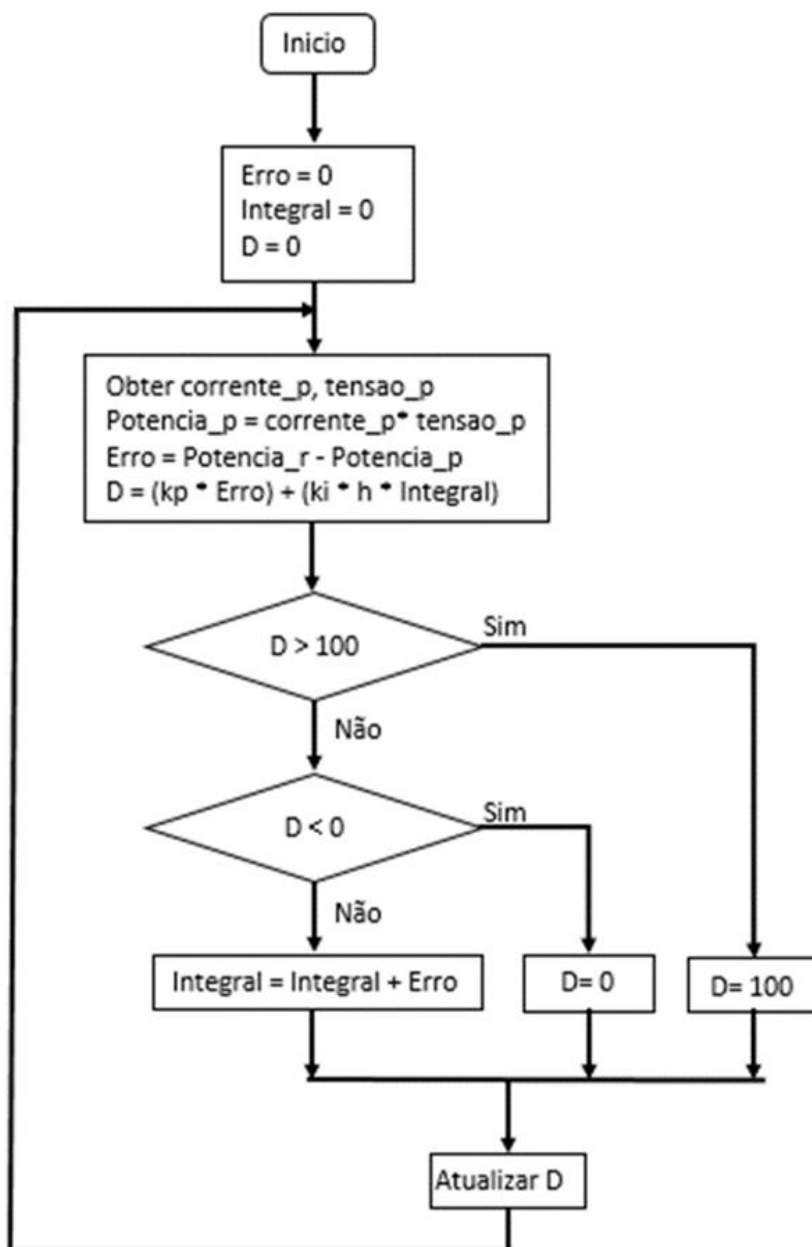


Figura 60 - Fluxograma do algoritmo responsável por controlar a corrente de carga da bateria.

#### 5.2.1.4. Controlador *MPPT*

Como já foi referido anteriormente, optou-se por se usar um controlador *MPPT* para extrair a energia do painel fotovoltaico e carregar o módulo de ultracondensadores. Esta opção advém do facto de os ultracondensadores usados suportarem uma corrente de carga muito superior à das baterias. Neste caso, os ultracondensadores usados, suportam correntes de carga e descarga de cerca de 100 A [39]. Na Figura 61 pode observar um diagrama da arquitetura do sistema de carregamento do módulo de ultracondensadores.

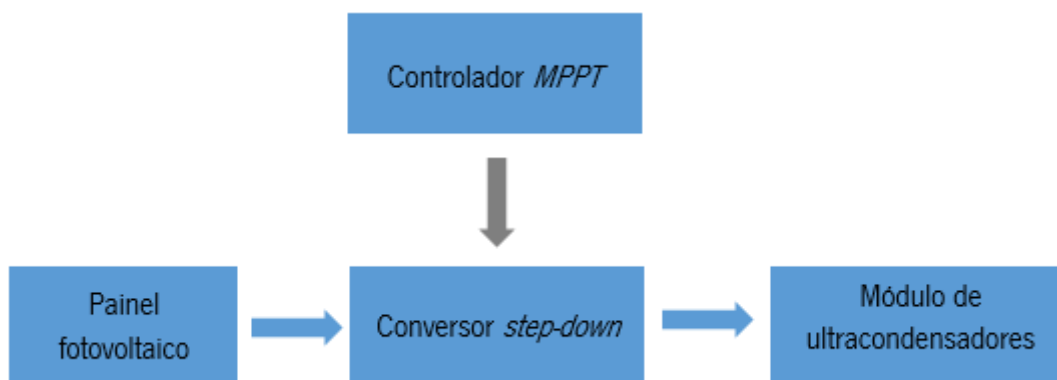


Figura 61 - Diagrama da arquitetura do sistema de carregamento do módulo de ultracondensadores.

Após a análise feita (no capítulo correspondente aos fundamentos teóricos) a alguns algoritmos de controlo *MPPT*, optou-se por se usar o algoritmo designado por condutância incremental. Este apresenta características que vão de acordo com as exigências do projeto.

No modelo de simulação e no projeto considerou-se uma frequência de amostragem de 150 Hz e uma frequência de comutação de 5 kHz para o *MOSFET* usado no conversor *step-down*. Tal como no controlador PI o código desenvolvido no *PSIM* foi escrito em linguagem C. No apêndice D encontra-se o código usado durante a simulação.

Na Figura 62 pode-se observar o fluxograma do algoritmo *MPPT* responsável por extrair a máxima potência do painel fotovoltaico e carregar o módulo de ultracondensadores. O funcionamento do algoritmo de *MPPT*, condutância incremental, já foi explicado no capítulo referente à fundamentação teórica. No fluxograma seguinte  $V_p$  e  $V_{p\_a}$  significam respetivamente a tensão medida no painel e a tensão medida no painel na iteração anteriormente.  $I_p$  e  $I_{p\_a}$  representam a corrente medida no painel e corrente medida no painel na iteração anterior. As variáveis  $dI$  e  $dV$  representam a variação de corrente e tensão entre iterações, após os seus cálculos, o algoritmo calcula em que zona da curva característica I-V o painel se encontra a operar. Conforme a zona de operação é calculado um valor de *duty-cycle*  $D$ . O cálculo do *duty-cycle* tem em consideração o seu valor anterior e um incremento  $iD$ . Quer na simulação, quer no projeto o valor de  $iD$  usado foi de 0.4.

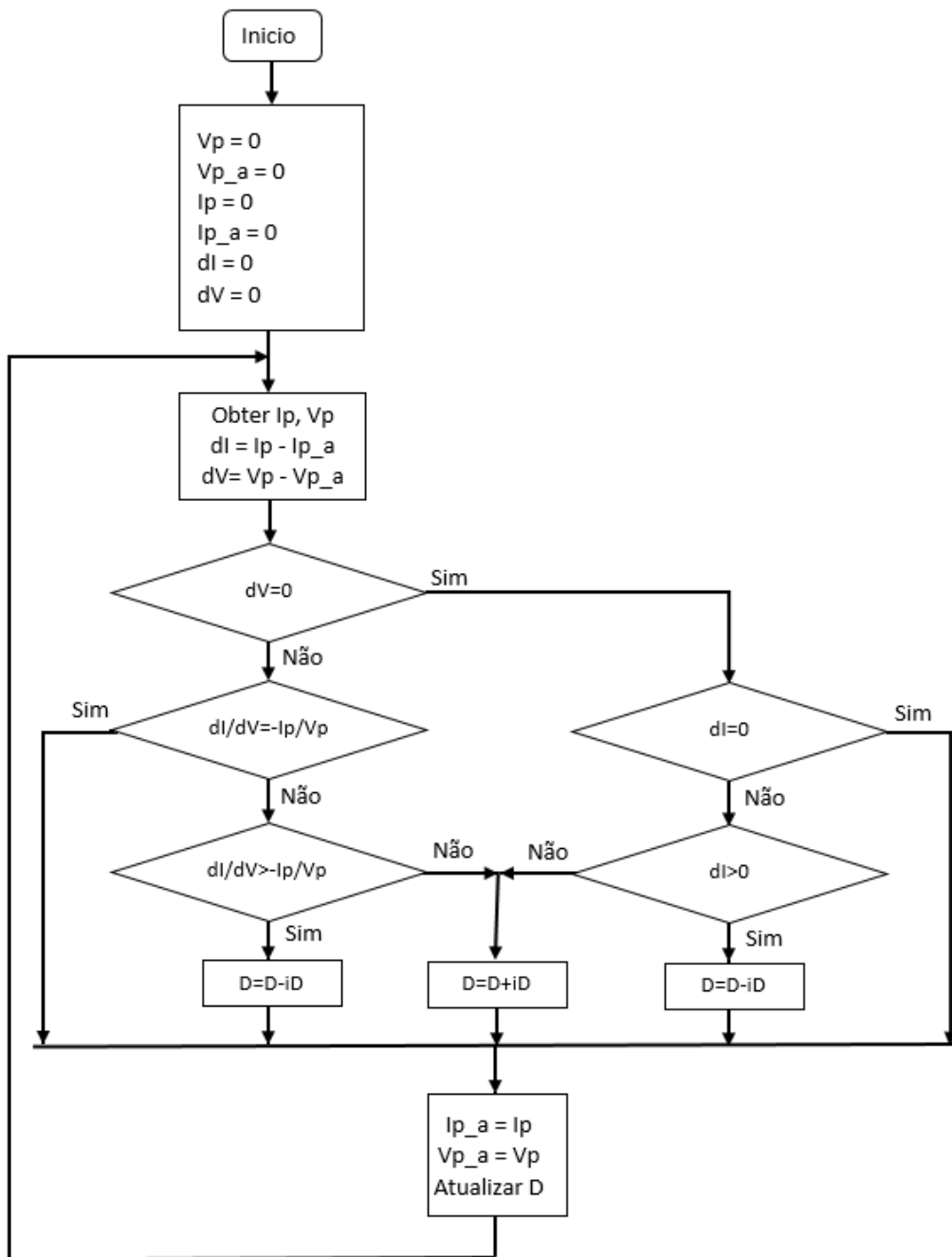


Figura 62 - Fluxograma do algoritmo *MPPT* responsável por extrair a máxima potência do painel fotovoltaico e carregar o módulo de ultracondensadores.

### 5.2.2. Sistema de alimentação do controlador

A energia necessária para o bom funcionamento do controlador pode ser proveniente do painel fotovoltaico ou de um dos elementos armazenadores de energia, as especificações elétricas

para o controlador são de 5 V de tensão de entrada e 500 mA de corrente máxima. De seguida serão apresentadas as escolhas efetuadas para a gestão da energia de alimentação do controlador.

#### 5.2.2.1. Energia proveniente do painel

Devido às características elétricas do painel, já descritas anteriormente, foi necessário usar um conversor CC-CC do tipo *step-down* para que fosse possível alimentar o controlador sem danificar nenhum dos seus componentes. O conversor CC-CC escolhido foi o *Traco Power* TSR 1-2450 [56]. Na Figura 63 pode-se observar uma imagem desse conversor.



Figura 63 – Conversor *step-down* Traco Power TSR 1-2450 [57].

O conversor *Traco Power* TSR 1-2450 apresenta um rendimento que pode chegar aos 96 %, consegue fornecer à saída uma corrente máxima de 1 A e é capaz de impor uma tensão de saída de 5 V para tensões de entrada que variam entre os 6.5 V e os 36 V.

Quando o painel começa a perder a capacidade de conseguir alimentar o controlador na totalidade, a restante energia necessária para a alimentar o controlador começa a fluir do elemento armazenador de energia usado. Deste modo, o controlador só passa a ser alimentado na totalidade por um dos elementos armazenadores de energia quando o painel perder a capacidade de fornecer qualquer energia ao sistema.

#### 5.2.2.2. Energia proveniente da bateria

Devido às características elétricas da bateria, já descritas anteriormente, foi necessário usar um conversor CC-CC do tipo *step-down* para que fosse possível alimentar o controlador sem danificar nenhum dos seus componentes. A escolha recaiu sobre o mesmo conversor usado para converter a energia proveniente do painel, o conversor CC-CC *Traco Power* TSR 1-2450.



### 5.2.2.3. Energia proveniente do módulo de ultracondensadores

Quando a energia necessária para alimentar o controlador provém do módulo de ultracondensadores, passa a haver a necessidade de elevar a tensão. Para o efeito foi selecionado o conversor CC-CC do tipo *step-up* U1V10F5 da *Pololu* [58]. Na Figura 64 pode observar uma imagem do conversor.



Figura 64 - Conversor *step-up* U1V10F5 da *Pololu* [58].

Este conversor necessita de uma tensão de entrada mínima de 0.5 V para entrar em funcionamento. Após entrar em funcionamento consegue manter na saída uma tensão regulada de 5 V até que a tensão de entrada baixar até aos 0.3 V. O rendimento máximo do conversor anda em torno dos 90 %, como se pode observar na Figura 65. A corrente máxima de saída do conversor é de cerca de 1.2 A. Este conversor *step-up* tem uma particularidade importante, pois consegue manter uma tensão de saída regulada em 5 V com uma tensão de entrada superior à saída, desde que a tensão de entrada não ultrapasse os 5.5 V.

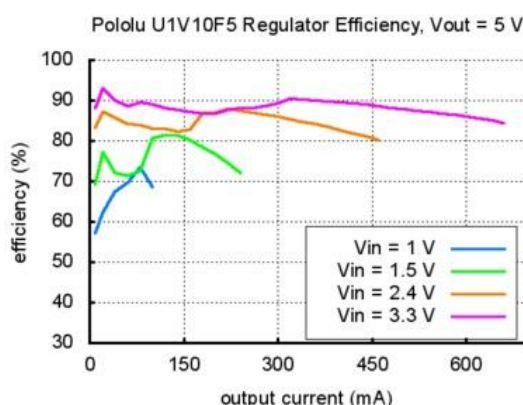


Figura 65 – Curvas do rendimento do conversor *step-up* U1V10F5 da *Pololu* [58].

### 5.2.3. Controlo e alimentação da válvula motorizada

Neste subcapítulo abordar-se-á as escolhas referentes ao controlo do estado da válvula motorizada e as escolhas referentes à alimentação da mesma.

### 5.2.3.1. Alimentação da válvula

Após alguns testes realizados ao motor escolhido para ser usado na válvula motorizada, constatou-se que o motor poderia consumir em algumas situações 20 W. Este valor de consumo inviabiliza a alimentação da válvula motorizada a partir do painel. Tendo em conta a situação referida, foi tomada a decisão de alimentar a válvula exclusivamente a partir dos elementos armazenadores de energia.

### 5.2.3.2. Controlo da válvula

Para que seja possível verificar o estado (aberta ou fechada) da válvula optou-se por se usar dois sensores óticos TCST 1000 [59], na Figura 66 pode-se observar uma imagem ilustrativa de um dos sensores em questão. Os sensores são alimentados com 5 V, cada um a partir de um pino do microcontrolador, deste modo é possível ligar os sensores apenas quando é necessário, evitando que os mesmos estejam a consumir constantemente.



Figura 66 - Imagem ilustrativa do sensor TCST 1000 [59].

Quando o microcontrolador recebe ordens para abrir ou fechar a válvula, o respetivo sensor é ligado. De seguida a alimentação da válvula é ligada através do *MOSFET* P60NF06 [60] que suporta até 60 V de tensão máxima e 60 A de corrente máxima. A sua resistência interna típica quando ligado é de cerca de 14 m $\Omega$ . Quando o microcontrolador recebe o *feedback* do sensor, a alimentação quer do sensor quer da válvula é desligada.

### 5.2.4. Sistema de comunicação

Neste subcapítulo explicar-se-á como foi feita a configuração da rede de comunicação e apresentar-se-á as tramas consideradas.

### 5.2.4.1. Configuração da rede

Para configurar a rede de comunicação recorreu-se ao *software XCTU* fornecido pelo fabricante dos *transceivers XBee PRO S2B*. Começou-se por configurar o *XBee* responsável pela gestão da rede, o *XBee coordinator*. Na Figura 67 pode observar uma imagem do *software XCTU* referente à configuração (rede e modo de endereçamento) do *XBee coordinator*. O *coordinator* foi configurado no modo *ZigBee coordinator API (Application Programming Interface)* com a versão de *firmware 22A7*.

No modo *API* todos os parâmetros configuráveis foram mantidos de origem menos o parâmetro *ID-PAN* (identificador da *Personal Area Network*). Para que os diferentes módulos *XBee* comuniquem entre si é necessário que estes se encontrem na mesma *PAN*. O modo de endereçamento por defeito permite ao *coordinator* transmitir em *broadcast*, a não ser que durante a comunicação seja passado ao mesmo, o endereço de 64 bits do *XBee* de destino. Deste modo os parâmetros *DH (Destination Address High)* e *DL (Destination Address Low)* foram mantidos.

#### Networking

Change networking settings

ID PAN ID	4321	
SC Scan Channels	7FFF	Bitfield
SD Scan Duration	3	exponent
ZS ZigBee Stack Profile	0	
NJ Node Join Time	FF	x 1 sec
OP Operating PAN ID	4321	
OI Operating 16-bit PAN ID	598A	
CH Operating Channel	E	
NC Number of Remaining Children	A	

#### Addressing

Change addressing settings

SH Serial Number High	13A200	
SL Serial Number Low	408D9E06	
MY 16-bit Network Address	0	
DH Destination Address High	0	
DL Destination Address Low	FFFF	
NI Node Identifier		
NH Maximum Hops	1E	
BH Broadcast Radius	0	
AR Many-to-One Route Broadcast Time	FF	x 10 sec
DD Device Type Identifier	30000	
NT Node Discovery Backoff	3C	x 100 ms
NO Node Discovery Options	3	
NP Maximum Number of API Transmission Bytes	FF	
CR PAN Conflict Threshold	3	

Figura 67 - Configuração da rede e do endereçamento do *coordinator*.

Os *XBee* usados como *routers* foram configurados no modo *ZigBee router API* e usam o mesmo *firmware* que o *XBee* configurado como *coordinator*. Todos os parâmetros configuráveis do modo *API* foram mantidos por defeito menos o *ID-PAN*, o *DH*, o *DL*, o *PL (Power Level)* e o *PM (Power Mode)*. O *ID-PAN* foi configurado com o mesmo valor que o *ID-PAN* do *XBee coordinator*, caso contrário era impossível a comunicação. Os valores de *DH* e de *DL* foram configurados respetivamente com o valor da parte alta e da parte baixa do endereço de 64 bits do *XBee coordinator*. Os valores de *PL* e *PM* foram configurados de modo a diminuir o consumo de energia através da diminuição da potência do sinal, como se pode observar na Figura 68.

### RF Interfacing

Change RF interface options

ⓘ <b>PL</b> Power Level	Lowest [0]
ⓘ <b>PM</b> Power Mode	Boost Mode Disabled [0]
ⓘ <b>PP</b> Power at PL4	12

Figura 68 - Configuração do *Power Level* e do *Power Mode*.

A comunicação entre os módulos *XBee* e os equipamentos onde estes se encontram ligados é feita através da porta série. Na Figura 69 pode-se observar a configuração da porta série que foi usada no módulo *XBee coordinator* e nos módulos *XBee routers*.

### Serial Interfacing

Change modem interfacing options

ⓘ <b>BD</b> Baud Rate	9600 [3]
ⓘ <b>NB</b> Parity	No Parity [0]
ⓘ <b>SB</b> Stop Bits	One stop bit [0]
ⓘ <b>D7</b> DIO7 Configuration	CTS flow control [1]
ⓘ <b>D6</b> DIO6 Configuration	Disable [0]
ⓘ <b>AP</b> API Enable	1 API enabled (1), ...with escaping (2)
ⓘ <b>AO</b> API Output Mode	Native [0]

Figura 69 - Configuração da porta série.

### 5.2.4.2. Estrutura das tramas

A utilização dos módulos *XBee* no modo *API* permite usar vários tipos de tramas, como se pode observar na Figura 70. Neste projeto são levadas em consideração dois dos diferentes tipos de tramas possíveis. As tramas usadas foram as seguintes:

- *ZigBee Transmit Request*;
- *ZigBee Receive Packet*.

API Frame Names	API ID
AT Command	0x08
AT Command - Queue Parameter Value	0x09
ZigBee Transmit Request	0x10
Explicit Addressing ZigBee Command Frame	0x11
Remote Command Request	0x17
Create Source Route	0x21
AT Command Response	0x88
Modem Status	0x8A
ZigBee Transmit Status	0x8B
ZigBee Receive Packet (AO=0)	0x90
ZigBee Explicit Rx Indicator (AO=1)	0x91
ZigBee IO Data Sample Rx Indicator	0x92
XBee Sensor Read Indicator (AO=0)	0x94
Node Identification Indicator (AO=0)	0x95
Remote Command Response	0x97
Over-the-Air Firmware Update Status	0xA0
Route Record Indicator	0xA1
Many-to-One Route Request Indicator	0xA3

Figura 70 - Diferentes tipos de tramas existentes no modo *API* [41].

De modo a tornar mais perceptível o porquê da utilização destes dois tipos de tramas, vai-se dar um exemplo através do seguinte exercício. Pretende-se enviar um pedido de informação do *coordinator* para um dos *routers*.

Para enviar o pedido é necessário utilizar a trama *ZigBee Transmit Request*, cujos parâmetros estão evidenciados na Figura 71. Passar-se-á agora a explicar os parâmetros mais importantes. Todas as tramas começam com o *Start Byte* 0x7E, independentemente do seu tipo. Para se identificar o dispositivo com quem se pretende comunicar tem que se conhecer o seu endereço de 64 bits (*64-bit Destination Address*). Trata-se de um endereço único pois não existem dois *XBee* da mesma série com o mesmo. O endereço de rede (*16-bit Destination Network Address*) do *XBee* também pode ser usado juntamente com o endereço de 64 bits para endereçar o dispositivo. Devido ao facto de este endereço tem um comportamento idêntico ao do *IP (Internet Protocol)* na rede de internet, este foi dado como desconhecido. A informação útil da trama (o nosso pedido de informação enviado a router) é enviada através do campo *RF Data*, cujo tamanho é variável, podendo no máximo atingir os 100 bytes. O último byte a ser enviado na trama é o *checksum*, cujo objetivo é identificar eventuais erros na mesma.

Frame Fields		Offset	Example	Description	
A P I P a c k e t	Start Delimiter	0	0x7E		
	Length	MSB 1	0x00	Number of bytes between the length and the checksum	
		LSB 2	0x16		
	Frame-specific Data	Frame Type	3	0x10	
	64-bit Destination Address	Frame ID	4	0x01	Identifies the UART data frame for the host to correlate with a subsequent ACK (acknowledgement). If set to 0, no response is sent.
		64-bit Destination Address	MSB 5	0x00	Set to the 64-bit address of the destination device. The following addresses are also supported: 0x0000000000000000 - Reserved 64-bit address for the coordinator 0x000000000000FFFF - Broadcast address
			6	0x13	
			7	0xA2	
			8	0x00	
			9	0x40	
			10	0x0A	
			11	0x01	
			LSB 12	0x27	
		16-bit Destination Network Address	MSB 13	0xFF	Set to the 16-bit address of the destination device, if known. Set to 0xFFFE if the address is unknown, or if sending a broadcast.
			LSB 14	0xFE	
		Broadcast Radius	15	0x00	Sets maximum number of hops a broadcast transmission can occur. If set to 0, the broadcast radius will be set to the maximum hops value.
	Options	16	0x00	Bitfield of supported transmission options. Supported values include the following:  0x01 - Disable retries and route repair 0x20 - Enable APS encryption (if EE=1) 0x40 - Use the extended transmission timeout  Enabling APS encryption presumes the source and destination have been authenticated. It also decreases the maximum number of RF payload bytes by 4 (below the value reported by NP).  The extended transmission timeout is needed when addressing sleeping end devices. It also increases the retry interval between retries to compensate for end device polling. See Chapter 4, Transmission Timeouts, Extended Timeout for a description.  Unused bits must be set to 0.	
	RF Data	17	0x54	Data that is sent to the destination device	
		18	0x78		
		19	0x44		
		20	0x61		
		21	0x74		
		22	0x61		
		23	0x30		
24	0x41				
Checksum	25	0x13	0xFF - the 8 bit sum of bytes from offset 3 to this byte.		

Figura 71 – Trama ZigBee Transmit Request [41].

Quando a informação enviada pelo *coordinator* chega ao *router* é tratada e enviada pela porta série para o dispositivo onde este se encontra ligado. A informação chega ao dispositivo no formato de trama *ZigBee Receive Packet*. Os parâmetros deste tipo de trama encontram-se evidenciados na Figura 72. Na trama *ZigBee Receive Packet* vem especificado o endereço de 64 bits do *coordinator* (*64-bit Source Address*) e o seu respetivo endereço de rede (*16-bit Source Network Address*). Por defeito o endereço de rede de um *XBee* configurado como *coordinator* é sempre zero. A informação útil recebida pelo *router* encontra-se em *Received Data*.

Assim que o pedido de informação for processado, a utilização dada às tramas usadas inverter-se-á. O *router* fará uso da trama *ZigBee Transmit Request* para responder ao pedido de informação enviado pelo *coordinator*. Por sua vez o *coordinator* passará essa informação ao dispositivo onde se encontra ligado através de uma trama *ZigBee Receive Packet*.

Frame Fields		Offset	Example	Description			
A P I  P a c k e t	Start Delimiter	0	0x7E				
	Length	MSB 1	0x00	Number of bytes between the length and the checksum			
		LSB 2	0x11				
	Frame-specific Data	Frame Type	3	0x90			
			MSB 4	0x00			
		64-bit Source Address	5	0x13	64-bit address of sender. Set to 0xFFFFFFFFFFFFFFFF (unknown 64-bit address) if the sender's 64-bit address is unknown.		
			6	0xA2			
			7	0x00			
			8	0x40			
			9	0x52			
			10	0x2B			
			LSB 11	0xAA			
		16-bit Source Network Address	MSB 12	0x7D	16-bit address of sender		
			LSB 13	0x84			
		Received Data	Receive Options	14	0x01	0x01 - Packet Acknowledged 0x02 - Packet was a broadcast packet 0x20 - Packet encrypted with APS encryption 0x40 - Packet was sent from an end device (if known) Note: Option values can be combined. For example, a 0x40 and a 0x01 will show as a 0x41. Other possible values 0x21, 0x22, 0x41, 0x42, 0x60, 0x61, 0x62.	
15							0x52
16	0x78						
17	0x44						
18	0x61						
19	0x74						
20	0x61						
Checksum		21	0x0D	0xFF - the 8 bit sum of bytes from offset 3 to this byte.			

Figura 72- Trama *ZigBee Receive Packet* [41].

### 5.3. Resultados computacionais e experimentais

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados das simulações e do projeto prático realizado no âmbito do controlador energeticamente autónomo.

#### 5.3.1. Módulo de ultracondensadores como elemento armazenador de energia

Antes de o desenvolvimento ter sido feito, realizaram-se várias simulações em *PSIM* com o intuito de garantir a viabilidade do sistema de carregamento do módulo de ultracondensadores. As simulações serviram ainda para dimensionar alguns dos componentes usados durante o projeto. No apêndice B encontra-se o modelo de simulação desenvolvido.

A primeira simulação tem como objetivo demonstrar as formas de onda na entrada do sistema. Na Figura 73 apresentam-se as formas de onda da corrente, da tensão e da potência extraída do painel fotovoltaico. Para esta simulação os ultracondensadores encontravam-se inicialmente totalmente descarregados. Para o painel fotovoltaico foram consideradas as características elétricas especificadas pelo fabricante.

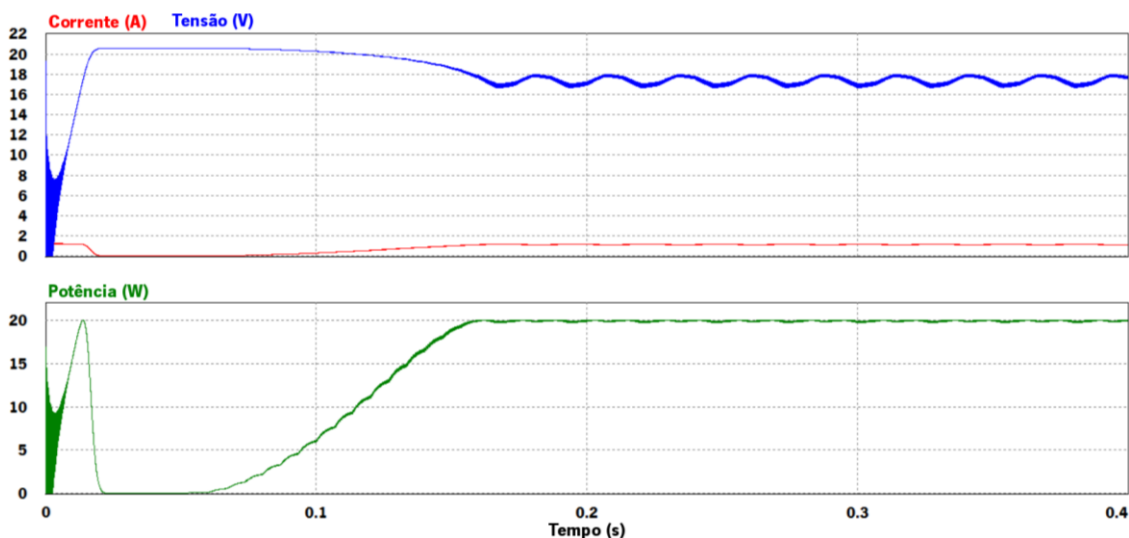


Figura 73 - Formas de onda (obtidas em simulação) da corrente, da tensão e da potência extraída do painel na fase inicial do carregamento do módulo de ultracondensadores.

O sistema demorou aproximadamente 170 ms a entrar em regime permanente. Para calcular o valor médio da corrente, da tensão e da potência considerou-se o intervalo de simulação compreendido entre os 200 e os 300 ms. O valor médio obtido para a corrente foi de 1.15 A, o valor médio obtido para a tensão foi de 17.42 V e o valor médio obtido para a potência foi de 19.94 W.

A segunda simulação demonstra as formas de onda à entrada do módulo de ultracondensadores durante o seu carregamento. Tal como na simulação anterior os ultracondensadores encontravam-se inicialmente totalmente descarregados. Na Figura 74 pode-se observar as formas de onda da corrente, da tensão e da potência à entrada do módulo de ultracondensadores.



## Controlador energeticamente autónomo

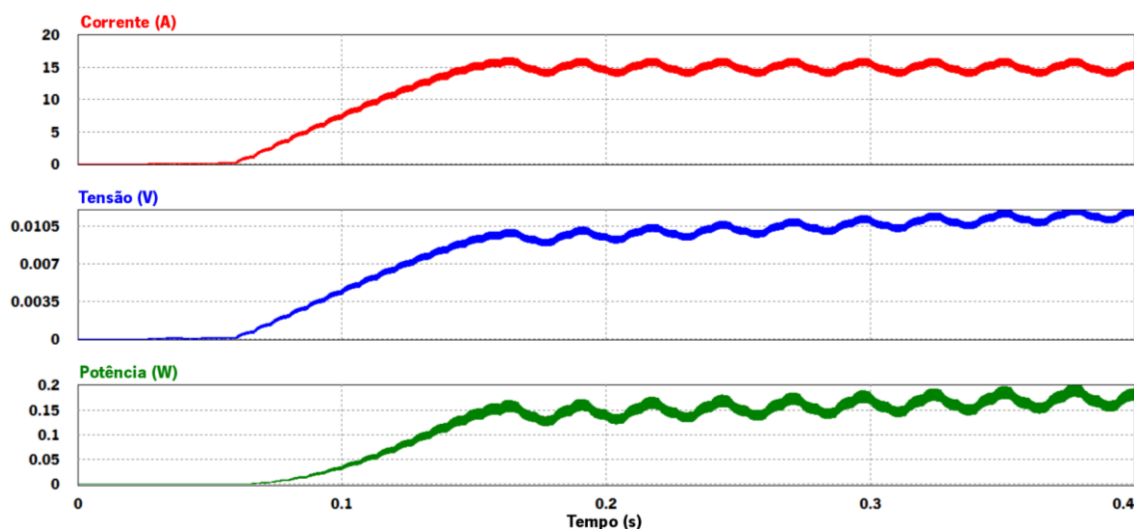


Figura 74 - Formas de onda (obtidas em simulação) da corrente, da tensão e da potência à entrada do módulo de ultracondensadores na sua fase inicial de carregamento.

O valor médio de corrente obtido durante esta simulação foi de 15 A, este valor vai descendo ao longo do carregamento do módulo de ultracondensadores. O valor do *ripple* de tensão observado durante a simulação foi de cerca de 2 mV. Através das formas de onda da tensão e da potência é possível observar que os ultracondensadores se encontram efetivamente a ser carregados.

Na terceira simulação foram tidas em consideração as formas de onda da corrente e da tensão à entrada do modelo de ultracondensadores na fase final do seu carregamento. Para efeitos de simulação o módulo é considerado carregado quando a tensão aos seus terminais atinge os 5.4 V. As formas de onda resultantes da simulação podem ser observadas na Figura 75.

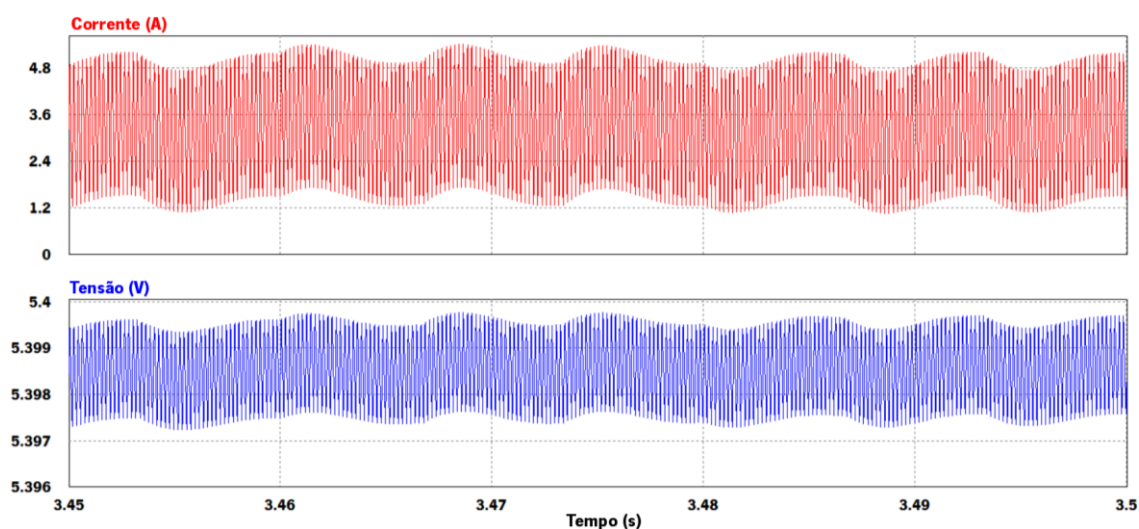


Figura 75 - Formas de onda (obtidas em simulação) da corrente e da tensão à entrada do módulo de ultracondensadores na fase final do seu carregamento.

O valor médio de corrente obtido durante esta simulação foi de cerca de 3.35 A. O *ripple* de tensão manteve-se inalterável em relação a simulação anterior, mantendo-se este nos 2 mV. Numa simulação completa ao carregamento do módulo de ultracondensadores apurou-se o tempo de simulação necessário para carregar o módulo. Segundo o simulador são necessários aproximadamente 24 minutos (para uma potência de entrada de 20 W), para levar a tensão aos terminais do módulo dos 0 aos 5.4 V.

Na Figura 76 pode-se observar a forma de onda da potência na entrada do sistema quando o módulo de ultracondensadores se encontra na fase final de carregamento. A potência média extraída do painel fotovoltaico é de cerca de 19.96 W. O algoritmo usado durante a simulação manteve a potência de entrada em torno dos 20 W, independentemente do estado de carga do módulo de ultracondensadores.

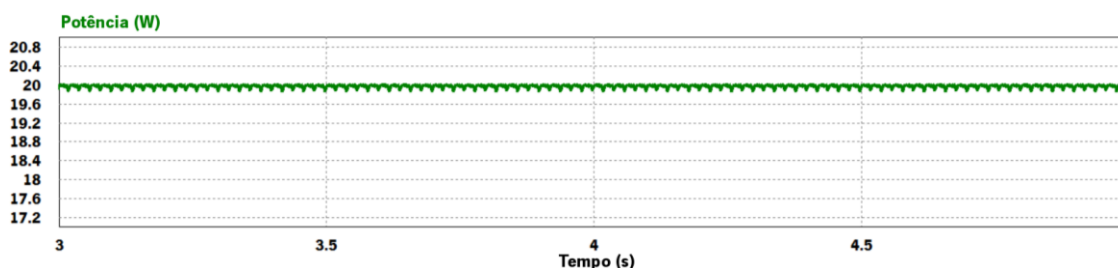


Figura 76 - Formas de onda (obtidas em simulação) da potência extraída do painel fotovoltaico quando o módulo de ultracondensadores se encontra na fase final de carregamento.

Passada a fase de simulação e dimensionamento passou-se a fase de desenvolvimento do *hardware*. No âmbito do controlador energeticamente autónomo foi necessário desenvolver duas placas de circuito impresso. As placas foram desenhadas recorrendo ao *software* de desenvolvimento *Cadsoft Eagle* [61]. No apêndice F e no apêndice G encontram-se os esquemáticos e os *layouts* das placas desenvolvidas.

Em primeiro lugar, na Figura 77 apresenta-se o cerne de todo o controlador energeticamente autónomo. O *hardware* apresentado nesta figura é responsável pela gestão de todo o controlador. Este é responsável e permite extrair a energia do painel fotovoltaico e carregar quer o módulo de ultracondensadores quer a bateria. A gestão do sistema de comunicação e a gestão da válvula motorizada é feita recorrendo a este *hardware*.

O *hardware* desenvolvido juntamente com o módulo de radiofrequência *XBee PRO S2B* consome cerca de 450 mWh. Sendo que módulo de radiofrequência é responsável por aproximadamente 63 % do consumo, cerca de 284mWh.

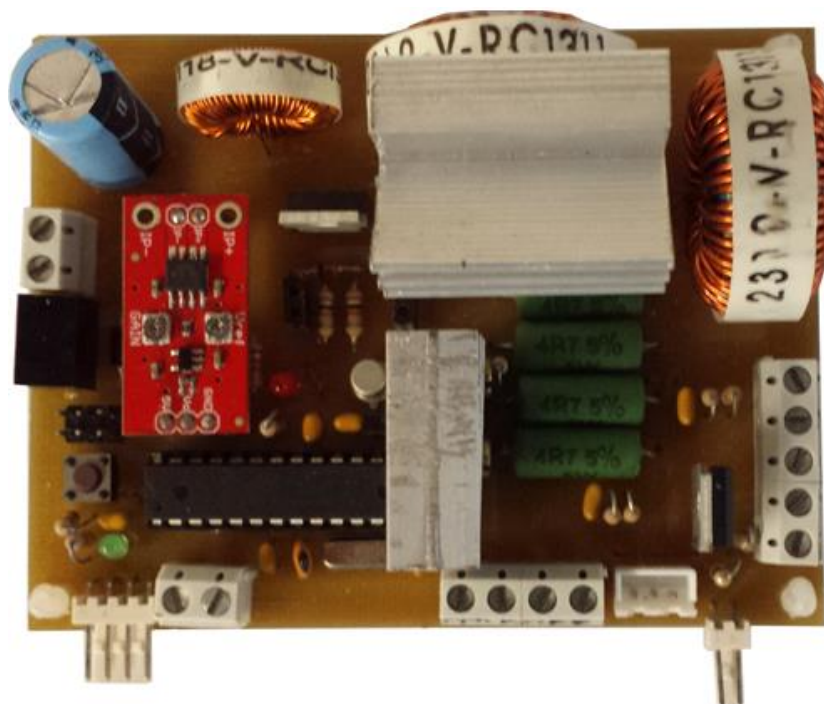


Figura 77 - Hardware responsável pela gestão de todo o controlador energeticamente autónomo.

Em segundo lugar, na Figura 78 apresenta-se a placa de circuito impresso desenvolvida para permitir extrair a energia do módulo de ultracondensadores e alimentar o controlador energeticamente autónomo. Esta placa é responsável por elevar a tensão existente no módulo de ultracondensadores e mantê-la estável nos 5 V. A placa é essencialmente composta por um conversor *step-up* U1V10F5 da *Pololu*.



Figura 78 - Placa responsável por manter a alimentação do controlador estável em 5 V quando se usa o módulo de ultracondensadores como elemento armazenador de energia.

Passada a fase de implementação prática passou-se a fase de testes. Os testes realizados no âmbito do carregamento do módulo de ultracondensadores foram realizados entre as 17 horas e as 18 horas de modo a recriar um ambiente com uma intensidade de radiação solar intermédia, algo entre o pico máximo e mínimo de intensidade de radiação solar. Esta decisão foi tomada devido a falta de equipamento capaz de recriar uma intensidade de radiação solar controlável e devido a falta de equipamento que permitisse medir a quantidade de radiação solar que incidia sobre o painel fotovoltaico.

Em primeiro lugar, na Figura 79 apresenta-se a forma de onda da tensão, obtida através do osciloscópio, aos terminais do módulo de ultracondensadores durante o seu carregamento.

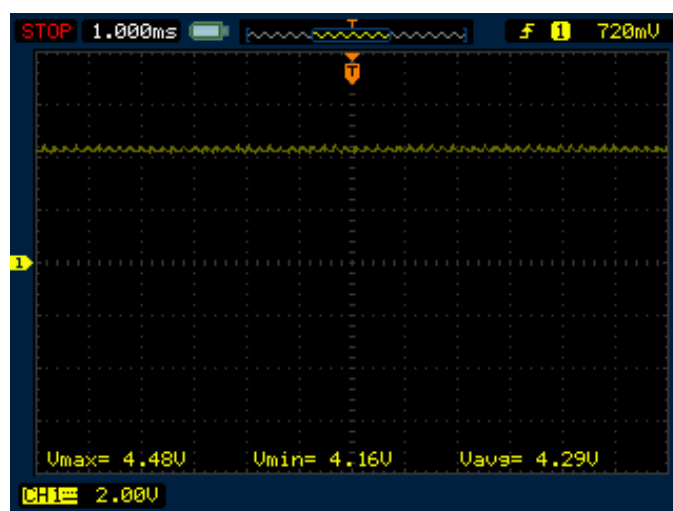


Figura 79 - Forma de onda da tensão (obtidas através do osciloscópio) aos terminais do módulo de ultracondensadores durante o seu carregamento.

A forma de onda apresenta um *ripple* de 0.32 V, o qual se deve facto de o algoritmo *MPPT* usado perturbar a tensão do painel fotovoltaico para procurar o ponto de máxima potência.

Em segundo lugar, na Figura 80 apresenta-se a evolução da potência à entrada do módulo de ultracondensadores durante o seu carregamento. A evolução foi calculada a partir de dados recolhidos manualmente de 2 em 2 minutos.

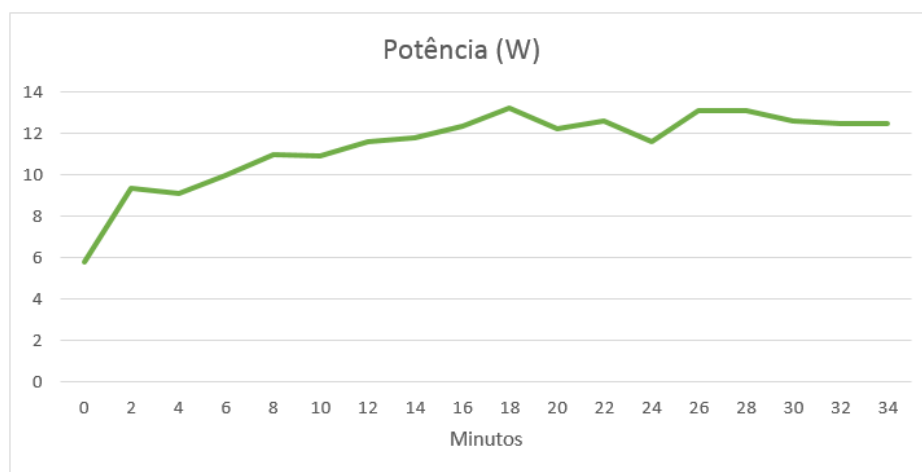


Figura 80 - Potência à entrada do módulo de ultracondensadores durante o seu carregamento.

A curva da potência apresenta alguns picos, isto deve-se ao facto de as medidas da tensão e corrente terem sido obtidas manualmente. Aumentar o número de amostragens traria certamente um aspeto mais suave à curva da potência. De qualquer forma é perceptível a evolução da potência à entrada do módulo de ultracondensadores. A evolução da potência ao longo do

tempo encontra-se dentro do espectável uma vez que esta aumenta durante o processo de carregamento do módulo de ultracondensadores e tende a estagnar na fase final. Isto deve-se ao facto de as perdas no circuito irem diminuindo consoante a corrente de carregamento diminui.

Em terceiro lugar, apresenta-se na Figura 81 a evolução do rendimento durante o carregamento do módulo de ultracondensadores.

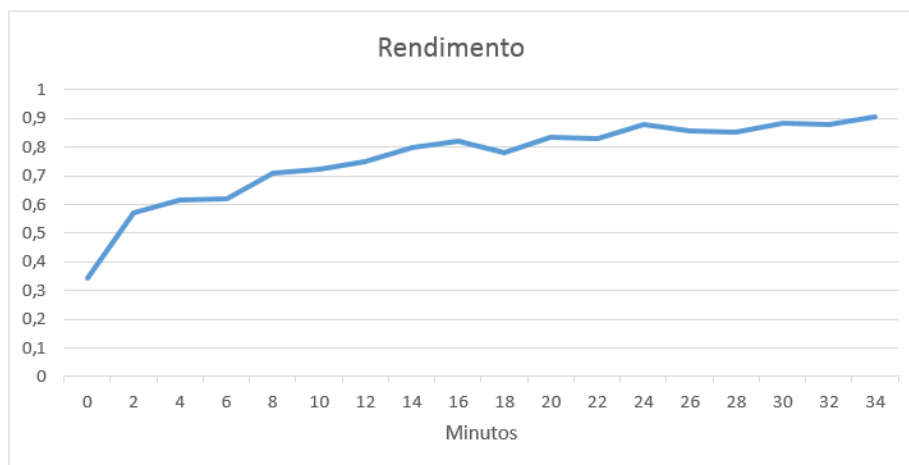


Figura 81 - Evolução do rendimento durante o carregamento do módulo de ultracondensadores.

A curva do rendimento encontra-se dentro do expectável, o rendimento aumenta com a evolução do estado de carga do módulo de ultracondensadores, o rendimento médio foi de aproximadamente 76 %. À medida que a tensão aos terminais do módulo de ultracondensadores aumenta a corrente injetada no mesmo diminui, isto faz com que as perdas intrínsecas ao *hardware* desenvolvido diminuam. A maioria das perdas dão-se no *MOSFET* P80PF55 (perdas de comutação) e no diodo *schottky* MBR1660.

Durante este teste a potência máxima extraída do painel fotovoltaico foi de aproximadamente 17 W e a mínima foi de aproximadamente 13 W. em termos médios a potência extraída durante o carregamento foi de aproximadamente 15 W.

A corrente inicial de carregamento chegou aos 6.5 A e foi decaindo até aos 2.4 A na fase final de carregamento. A corrente média no painel fotovoltaico foi de aproximadamente 1 A.

Foi possível carregar o módulo de ultracondensadores até aos 5.24 V, 94 % da sua capacidade máxima, não foi possível atingir a capacidade máxima devido a erros de medição da tensão existente aos terminais do módulo. Esses erros resultam da junção dos erros inerente ao divisor de tensão usado para medir a tensão existente no módulo e ao *ripple* de tensão provocado pelo algoritmo *MPPT*.

O módulo demorou 34 minutos a atingir os 94 % da sua capacidade máxima, valor que ficou 10 minutos acima do tempo de carregamento calculado pelo simulador para a capacidade máxima possível. Isto deve-se ao facto de o simulador não levar em consideração várias perdas associadas aos componentes usados no *hardware* desenvolvido e ao facto de durante a simulação ter sido considerada uma potência extraída constante de 20 W do painel.

Foram realizados três testes de balanceamento ao módulo de ultracondensadores e o desequilíbrio máximo verificado entre células foi de 0.07 V.

Para testar a autonomia do controlador energeticamente autónomo carregou-se o módulo de ultracondensadores até ao nível máximo de carga conseguido (5.24 V aos terminais do módulo). Posteriormente o painel foi desconectado do sistema, passando o controlador a ser exclusivamente alimentado pelo módulo. O *step-up* U1V10F5 da *Pololu* conseguiu extrair a energia do módulo até este atingir 1 V aos seus terminais, ficando ainda aproximadamente 3.6 % da energia do módulo de ultracondensadores por extrair. Com as condições descritas o módulo foi capaz de manter o controlador devidamente alimentado durante 11 horas e 50 minutos.

Durante o teste à autonomia, a válvula motorizada foi atuada 8 vezes de modo a esta completar 4 ciclos (abertura seguida de fecho). É possível atuar sobre a válvula enquanto a tensão do módulo de ultracondensadores se encontrar acima dos 3 V, perto deste valor de tensão a válvula já demonstra dificuldade em executar os comandos de abertura e fecho. Os testes à válvula motorizada foram realizados em vazio (sem a existência de água na mesma). Na Figura 82 apresenta-se todo o sistema testado.



Figura 82 - Sistema testado durante o uso do módulo de ultracondensadores como elemento armazenador de energia.

### 5.3.2. Bateria como elemento armazenador de energia

Como foi referido anteriormente, recorreu-se a um resistência em série com uma fonte CC para simular cada uma das células da bateria. Isto deve-se ao facto de o simulador não possuir um modelo equivalente adequado e à falta de documentação técnica sobre a bateria. No apêndice C encontra-se o modelo de simulação desenvolvido.

Em primeiro lugar, na Figura 83 apresenta-se as formas de onda da corrente, da tensão e da potência extraída do painel fotovoltaico. O sistema demora aproximadamente 1.2 s a atingir o regime permanente. Em regime permanente o valor médio da potência é de 10.24 W para uma valor médio de corrente de 513 mA e um valor médio de tensão de 19.9 V.

Durante esta simulação a bateria foi considerada inicialmente descarregada, assumindo-se o valor de 6.6 V para simular o efeito.

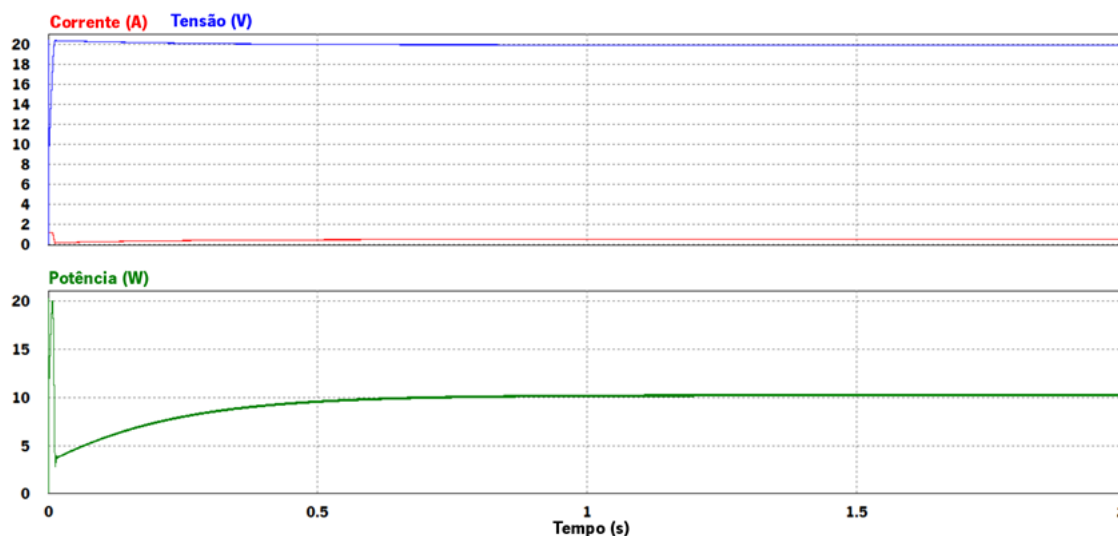


Figura 83 - Formas de onda (obtidas em simulação) da corrente, da tensão e da potência extraída do painel durante o carregamento da bateria.

Em segundo lugar, na Figura 84 apresentam-se as formas de onda da corrente e da tensão à entrada da bateria durante o seu carregamento. A corrente apresenta um *ripple* de aproximadamente 2 A e a tensão apresenta um *ripple* de aproximadamente 1.8 V. A corrente apresenta um valor médio de 1.37 A e a tensão apresenta um valor médio de 6.81 V.

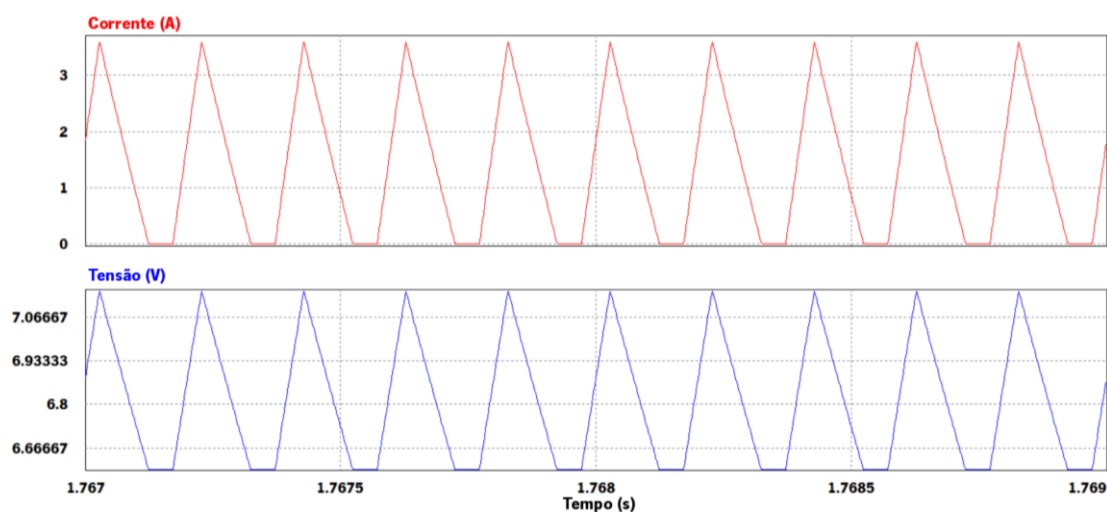


Figura 84 - Formas de onda (obtidas em simulação) da corrente e da tensão à entrada da bateria durante o seu carregamento.

Passada a fase de simulação e dimensionamento passou-se a fase de desenvolvimento do *hardware*. O *hardware* usado para proceder ao carregamento da bateria é o mesmo que foi usado para carregar o módulo de ultracondensadores, este pode ser observado na Figura 77.

Passada a fase de implementação prática passou-se a fase de testes. Os testes realizados no âmbito do carregamento da bateria foram realizados entre as 17 horas e as 18 horas de modo a recriar um ambiente com uma intensidade de radiação solar intermédia, algo entre o pico



máximo e mínimo de intensidade de radiação solar. Esta decisão foi tomada devido as razões já apresentadas durante o teste realizado ao carregamento do módulo de ultracondensadores.

Em primeiro lugar, na Figura 85 apresenta-se a forma de onda da tensão, obtida através do osciloscópio, aos terminais da bateria durante o seu carregamento.

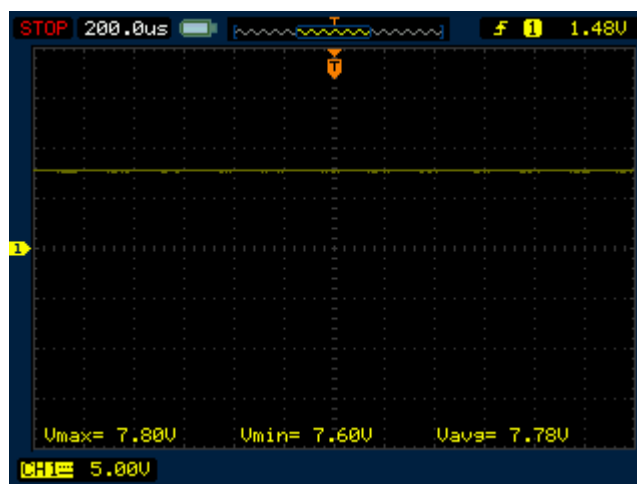


Figura 85 - Forma de onda da tensão (obtidas através do osciloscópio) aos terminais da bateria durante o seu carregamento.

A forma de onda apresenta um *ripple* de 0.2 V, a corrente média proveniente do painel fotovoltaico foi de aproximadamente 370 mA. O sensor de corrente usado apresentou por diversas vezes dificuldade em medir com precisão um valor de corrente desta ordem de grandeza. Os erros de medição provocados pelo sensor de corrente fizeram com que o controlador PI calculasse valores de atuação incorretos, o que criou diversas oscilações durante o carregamento da bateria. Essas oscilações tiveram repercussão no *ripple* de tensão e no nível de carregamento que se conseguiu atingir.

Em segundo lugar, na Figura 86 apresenta-se a evolução da potência aos terminais da bateria durante o seu carregamento. A evolução foi calculada a partir de dados recolhidos manualmente de 2 em 2 minutos.

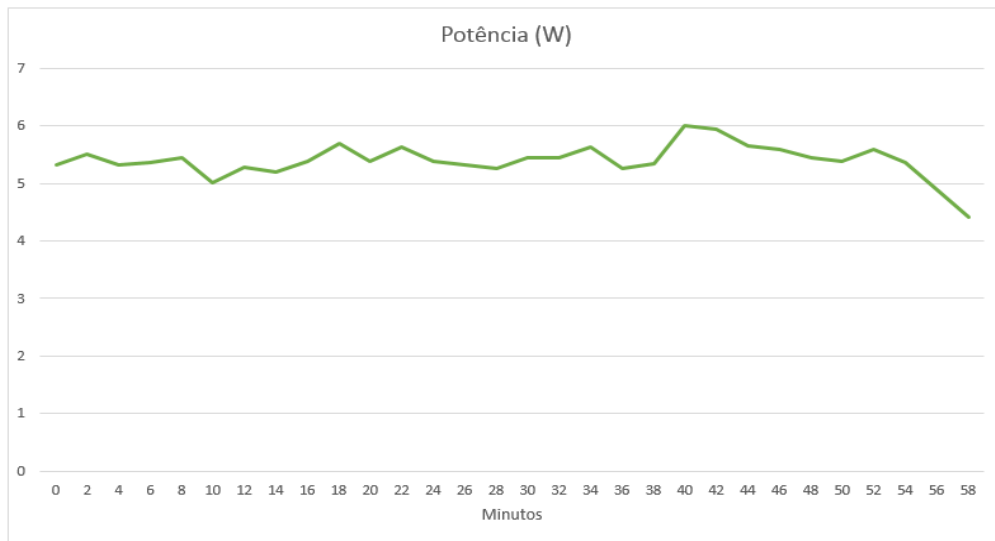


Figura 86 - Potência aos terminais da bateria durante o seu carregamento.

A oscilação apresentada pela potência ocorre devido ao tempo de amostragem escolhido para recolher os dados e devido aos erros provocados pelo sensor de corrente usado para mensurar a corrente proveniente do painel. A potência média de carregamento foi de aproximadamente 5.5 W para uma potência média extraída do painel fotovoltaico de aproximadamente 7 W. Nos últimos minutos da fase final de carregamento o valor da potência tende a decair. Isto deve-se a facto do *ripple* de tensão fazer com que o valor de *duty-cycle* aplicado ao *MOSFETP80PF55* varie rapidamente entre iterações do controlador PI. A tensão aos terminais da bateria estabiliza em 8.19 V, este valor não indica diretamente qual o nível de carga da mesma. Tendo em consideração as condições referidas anteriormente, foram necessários 58 minutos para levar a tensão aos terminais da bateria dos 6.6 V até os 8.19 V.

Em terceiro lugar, na Figura 87 apresenta-se a evolução do rendimento do sistema durante o carregamento da bateria.

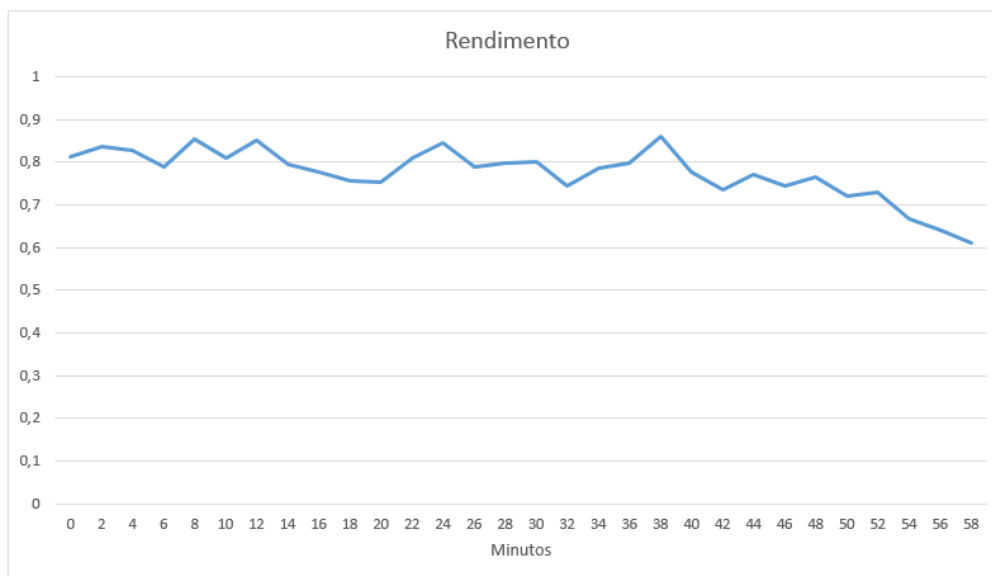


Figura 87 - Evolução do rendimento do sistema durante o carregamento da bateria.

As oscilações que se observam no gráfico de rendimento devem-se aos problemas já descritos anteriormente. O rendimento médio foi de aproximadamente 78 %.

Foram realizados três testes de balanceamento à bateria, nos quais se verificou que o desequilíbrio máximo foi de 0.05 V.

Para testar a autonomia do controlador energeticamente autónomo carregou-se a bateria até ao nível máximo de carga conseguido (8.19 V aos terminado da mesma). Posteriormente o painel foi desconectado do sistema, passando o controlador a ser exclusivamente alimentado pela bateria. O conversor *Traco Power* TSR 1-2450 conseguiu extrair a energia da bateria e alimentar o controlador devidamente até a tensão aos terminais da mesma atingir os 6.6 V (tensão para a qual a bateria é considerada completamente descarregada). Com as condições descritas anteriormente a bateria foi capaz de manter o controlador devidamente alimentado durante 14 horas e 2 minutos. Levando em consideração este tempo e os 450 mWh de consumo do controlador foi possível averiguar que a bateria foi carregada até aos 85 % da sua carga máxima.

Durante o teste à autonomia, a válvula motorizada foi atuada 8 vezes, de modo a esta completar 4 ciclos (abertura seguida de fecho). É possível atuar sobre a válvula enquanto a tensão os terminais da bateria se encontra acima dos 6.6 V. Os testes à válvula motorizada foram realizados em vazio (sem a existência de água na mesma). Na Figura 88 apresenta-se todo o sistema testado.



Figura 88 - Sistema testado durante o uso da bateria como sistema armazenador de energia.

### 5.3.3. Desempenho da válvula motorizada

Quando a válvula motorizada usa o módulo de ultracondensadores como elemento fornecedor de energia, a potência em jogo na mesma varia entre os 10.24 W e os 21.6 W. A potência em jogo depende diretamente da tensão aos terminais do módulo. O consumo é superior quando a tensão aos terminais do módulo é maior. A medida que a tensão aos terminais do módulo vai decaindo ao longo do tempo o consumo vai diminuindo. A diminuição do consumo tem implicações diretas no tempo de abertura e fecho da válvula. Quando o módulo se encontra completamente carregado a válvula demora aproximadamente 1.3 segundo a passar do estado fechado para aberto ou vice-versa. Quando a tensão aos terminais do módulo se aproxima dos 3 V a válvula demora aproximadamente 3 segundos a passar de um estado para o outro. Para a situação em que a tensão aos terminais do módulo é de aproximadamente 3 V a válvula consegue trocar de estado, mas começa claramente a apresentar dificuldades em fazê-lo. Dada esta situação pode-se concluir que a válvula pode ser atuada (com a devida fiabilidade) quando a tensão aos terminais do módulo de ultracondensadores se encontra entre os 5.4 V e os 3.5 V.

Quando a válvula motorizada faz uso da bateria como elemento fornecedor de energia a potência em jogo na mesma anda em torno dos 27 W independentemente da tensão aos terminais da bateria. Quer a tensão aos terminais da bateria seja de 8.4 V ou de 6.6 V a válvula motorizada demora menos de 1 segundo a passar do estado aberta para o estado fechada ou vice-versa.

### 5.3.4. Sistema de comunicação

Foram realizados testes para averiguar o alcance máximo possível entre módulos *Xbee*, tendo em consideração a configuração adotada no subcapítulo 5.2.4.1. Durante os testes foram usados dois *XBee routers* (*router 1* e *router 2*) e um *XBee coordinator*. Na Figura 89 apresenta-se uma imagem retirada do *software XCTU*, no qual se pode observar as ligações entre módulos.

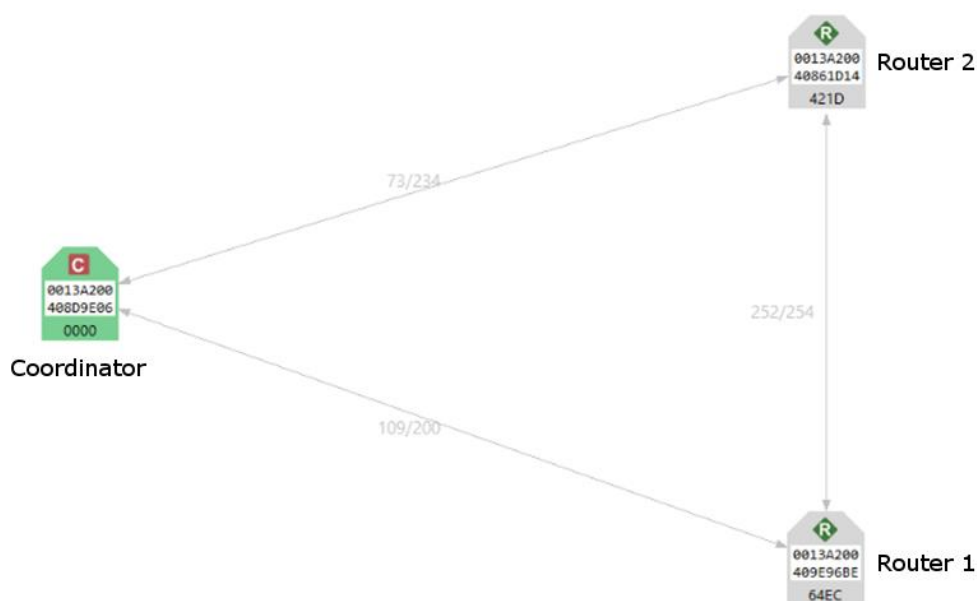


Figura 89 - Ligações entre módulos *XBee*.

Os testes realizados à distância entre módulos foram realizados dentro do campus de Azurém da Universidade do Minho em Guimarães. O *router 2* foi colocado o mais distante possível do *coordinator*. O *router 1* foi colocado a uma distância intermédia entre o *coordinator* e o *router 2* de modo a simular o controlo sobre uma válvula entre as duas extremidades da rede. Na Figura 90 apresenta-se uma imagem retirada do *Google Earth* onde se pode verificar a distância máxima conseguida entre o *coordinator* e o *router 2*. Na figura pode-se também observar as distâncias do *router 1* ao *coordinator* e ao *router 2*. Durante os testes os módulos *XBee* encontravam-se aproximadamente a 1.5 metros do solo.

Segundo os testes realizados é possível com 8 *routers* cobrir uma área de aproximadamente 468085 m<sup>2</sup>, ou seja, aproximada 47 hectares.



Figura 90 - Imagem retirada do *Google Earth* onde é possível verificar a distância máxima alcançada entre dois módulos.



## 6. Sistema *SCADA*

O sistema *SCADA* desenvolvido pode ser decomposto em duas partes distintas. A primeira parte passou pela criação de uma aplicação *web* que serve de *interface* gráfica entre o sistema *SCADA* e o operador. A segunda parte visou a criação de um *software* que serve de *interface* entre a aplicação *web*, uma base de dados e um módulo de radiofrequência *XBee*. O módulo *XBee* encontra-se ligado a uma das portas série da máquina onde se encontra alojado o sistema *SCADA*.

### 6.1. Descrição e especificações do sistema *SCADA*

Pretende-se desenvolver um sistema *SCADA* capaz de controlar e monitorizar o modelo de sistema de irrigação desenvolvido nesta dissertação. É nesse contexto de integração que se orientam as considerações de desenvolvimento. O sistema deve considerar um conjunto de características em função das necessidades operacionais associadas a este tipo de sistema de irrigação. Passa-se assim a considerar a necessidade de se desenvolver um sistema de controlo para instalações de irrigação organizado no tempo (agendamento) e no espaço (divisão sectorial das diversas zonas de irrigação).

Considerando as necessidades reais do sistema a desenvolver e de modo a simplificar o entendimento da sua implementação, este foi repartido em quatro áreas principais:

- **Caraterização das instalações de irrigação:** A caraterização deve permitir destacar as partes físicas dos diferentes componentes/módulos da instalação. A identificação das componentes operacionais (fontes, válvulas e zonas de irrigação) será assumida por essa *interface* de caraterização. Desta *interface* dependem todas as outras tarefas orientadas à programação, controlo, execução e monitorização. Nesta fase de definição estrutural pretende-se facilitar o processo de descrição e localização através de uma abordagem bidimensional (representação dos componentes de uma instalação de irrigação na forma de um esquema sobreposto sobre um mapa). A realização do esquema deverá idealmente ser realizada numa *interface* gráfica, sendo que esta deverá disponibilizar elementos gráficos predefinidos e representativos dos componentes de uma instalação. Para evitar que nessa fase descritiva o operador tenha que representar as diversas conexões entre



componentes de uma instalação, será implementado um sistema de representação automático de ligações. Toda a informação de caracterização referente a uma instalação será armazenada numa base de dados.

- **Programação das instalações de irrigação:** A programação de uma instalação é concebida como uma lista de especificações de serviço sujeitas aos seguintes critérios:
  - Todas as especificações de serviço correspondem a necessidades de irrigar uma determinada zona específica, a partir de uma determinada hora, e considerando um determinado período de duração;
  - Uma especificação de serviço poderá igualmente estar sujeita a um prazo de validade limitativo ou não;
  - Considerações sobre a periodicidade podem ser definidas para diferentes unidades de referência.

Diversos programas poderão ser definidos para uma mesma instalação, no entanto apenas um programa poderá ser executado de cada vez (programa que nesse caso é designado de programa ativo).

Tal como ocorre na caracterização das instalações, toda a informação será mantida em tabelas dedicadas na base de dados. Durante a programação apenas serão definidas zonas de irrigação e fontes de abastecimento. Essa abstração apenas será possível devido ao facto de serem definidas na base de dados as ligações dos componentes que se encontram entre uma fonte e uma zona de irrigação específica.

- **Execução de programas ativos:** A execução de programas ativos deve permitir que um ou mais programas ativos controlem de facto uma ou mais instalações. Levando em consideração que apenas pode existir um programa ativo por instalação. A parte do sistema *SCADA* responsável pela execução de programas ativos deve poder assumir o controlo de várias instalações. A execução deverá ocorrer de forma automática, para uma determinada instalação, se um programa se encontrar ativo e a data atual respeitar os prazos de execução definidos pelos operadores do sistema.

A parte do sistema responsável pela execução de programas realizará a gestão da porta COM que lhe deve estar dedicada. Assim sendo, trata do envio e da receção de ordens para as partes operacionais do sistema físico de irrigação. Acresce ao módulo de execução de programas ativos, a responsabilidade de monitorizar o estado da instalação quando tal se revele possível. De facto, como esta parte do sistema *SCADA* tem um acesso exclusivo à porta COM, por ele transitam informações relativas aos estados dos elementos armazenadores de energia (bateria ou módulo de ultracondensadores), informações relativas à energia extraída por unidade de tempo a partir do painel fotovoltaico e informações relativas a problemas de erros devido a *timeouts* ou falhas físicas consideradas por falta de resposta dos equipamentos.

- **Monitorização e controlo do estado da instalação:** A autonomia inerente à parte do sistema responsável pela execução de programas ativos não deve impedir os operadores de monitorizarem o estado da instalação de irrigação (informação sobre erros ocorridos, informação inerente ao estado do painel fotovoltaico e dos elementos armazenadores de energia), nem impedir a eventual necessidade de parar, modificar, reativar ou desativar um programa. Para tal, os mecanismos a desenvolver no módulo de execução de programas ativos devem permitir em permanência todas as tarefas de controlo e monitorização.

Idealmente a *interface* gráfica de monitorização e controlo do estado da instalação deverá ser concebida separadamente do módulo de execução de programas. Deste modo a troca de informação entre as duas componentes será exclusivamente realizada através da base de dados.

### 6.2. Arquitetura e implementação do sistema SCADA

A arquitetura a implementar para o sistema *SCADA* prevê a divisão das quatro áreas principais (descritas no subcapítulo anterior) em dois grupos distintos de implementação:

- O grupo 1 é composto por três das quatro áreas:
  - Caracterização das instalações de irrigação;
  - Programação das instalações de irrigação;
  - Monitorização e controlo do estado da instalação.

- O grupo 2 é composto pela área restante:
  - Execução de programas ativos.

Ambos os grupos devem constituir um produto de *software* a instalar numa estação de trabalho (computador) única. Apesar de serem possíveis implementações em arquiteturas distribuídas, optou-se num âmbito de simplificação, por desenvolver e executar o *software* a partir de uma única estação servidora.

Na Figura 91 apresenta-se a arquitetura adotada para o sistema SCADA. O modelo arquitetural da aplicação *web* representa a implementação do grupo 1 e o controlador de execução de programas representa a implementação do grupo 2.

Em primeiro lugar, apresenta-se o modelo arquitetura da aplicação *web* onde se enquadram o servidor onde fica alojada a aplicação, a base de dados e a *interface* de gestão de instalações de irrigação. Através da *interface* de gestão, o operador pode criar, modificar, parar ou reativar um programa de irrigação para uma determinada instalação que tenha previamente criado. O operador pode também verificar o estado de funcionamento dos equipamentos que constituem uma dada instalação. O operador pode aceder à *interface* de gestão a partir da máquina (computador) onde se encontra instalado o servidor e a base de dados. Em alternativa este pode aceder à *interface* através de uma rede local ou externa.

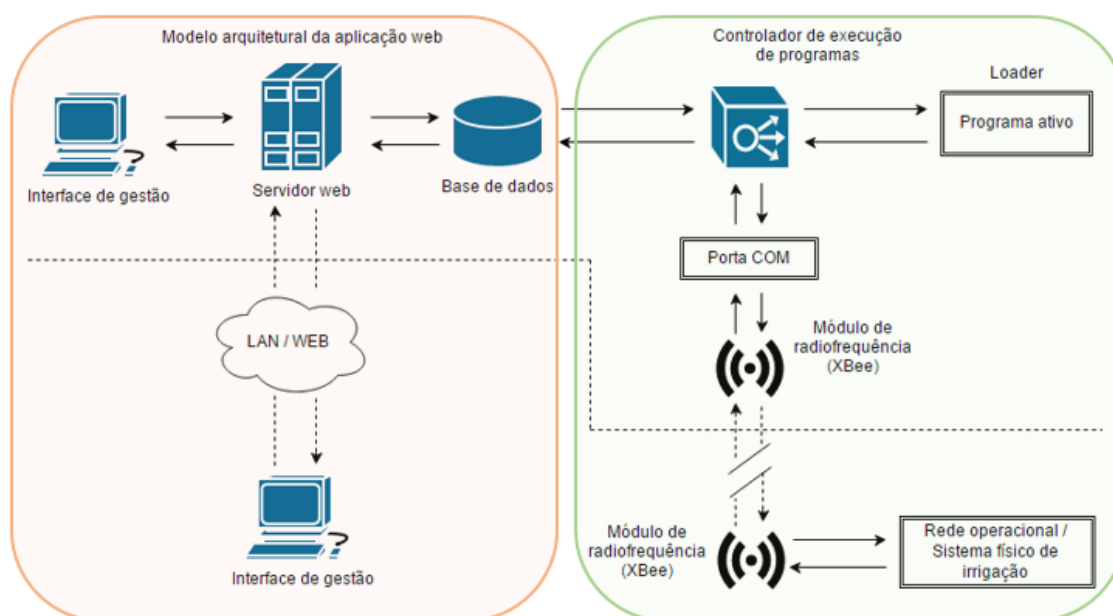


Figura 91 - Arquitetura adotada para o sistema SCADA.

Em segundo lugar, apresenta-se o controlador de execução de programas. Esta parte do sistema é responsável por fazer refletir junto da instalação físico de irrigação os programas

predefinidos pelo operador através da *interface* de gestão. A base de dados serve de ponte entre as duas frações do sistema SCADA. O controlador de execução de programas apresenta um arquitetura cliente/servidor. Assim que é detetado um programa de irrigação ativo na base de dados, o controlador cria um novo processo (*Loader*), ficando este processo responsável por gerir o programa de irrigação. O controlador cria tantos processos quantos programas ativos existirem na base de dados. Quando um processo verifica a necessidade de atuar sobre um determinado sistema físico de irrigação, este estabelece a comunicação com o controlador passando-lhe as instruções de atuação pertencentes aos dispositivos físicos da instalação. O controlador envia as instruções para o sistema físico de irrigação através da porta série. Nesta encontra-se conectado um módulo de radiofrequência *XBee PRO S2B*. O controlador de execução de programas é responsável pela receção e reencaminhamento de todos os dados provenientes da porta série.

Tendo em consideração os critérios de acessibilidade (potencialmente remota), o primeiro grupo assenta sobre as seguintes tecnologias de programação:

- *HTML (HyperText Markup Language) + CSS (Cascading Style Sheets)*: estruturação da camada de apresentação;
- *Javascript*: linguagem de *script* a executar em *interfaces* clientes;
- *PHP (Hypertext Preprocessor)*: linguagem de *script* a executar do lado servidor.

Assim, todas as *interfaces* disponíveis aos operadores poderão ser consultadas através de um *browser*, tornando o primeiro grupo desenvolvido numa aplicação *web*.

Para desenvolver o grupo 1 utilizou-se a ferramenta de desenvolvimento *web WampServer version 2.5* [62], esta é composta por um servidor *Apache* e por uma base de dados *MySQL*.

O grupo 2 foi desenvolvido em *C#*, linguagem orientada a objetos, assente no *.NET Framework 4* da *Microsoft* [63].

A escolha da linguagem *C#* deve-se à facilidade com que esta permite uma *interface* simplificada com a porta série e com os sistemas de gestão de base de dados, através de bibliotecas já existentes.

Ambos os grupos partilham a informação constante num *SGBD* (Sistemas de Gestão de bases de dados) *Mysql (version 5.6.17)*. Todas as transações de dados são assim realizadas em linguagem *SQL (Structured Query Language)*.

### 6.3. Estrutura da base de dados

A Figura 92 destaca as principais tabelas e relações consideradas para o desenvolvimento da camada lógica do projeto. Na presente estrutura, destacar-se-ão 4 âmbitos em direta dependência com as funcionalidades pretendidas para a *interface* de gestão e para o controlador de execução de programas. Âmbitos considerados:

- **Utilizadores:** Protocolo de acessibilidade;
- **Topologia da instalação:** informação descritiva da topologia da instalação;
- **Programação:** Informação necessária à definição, alteração e execução de programas;
- **Registo de erros:** Informação para gestão de potenciais anomalias detetadas em modo de execução de programas.

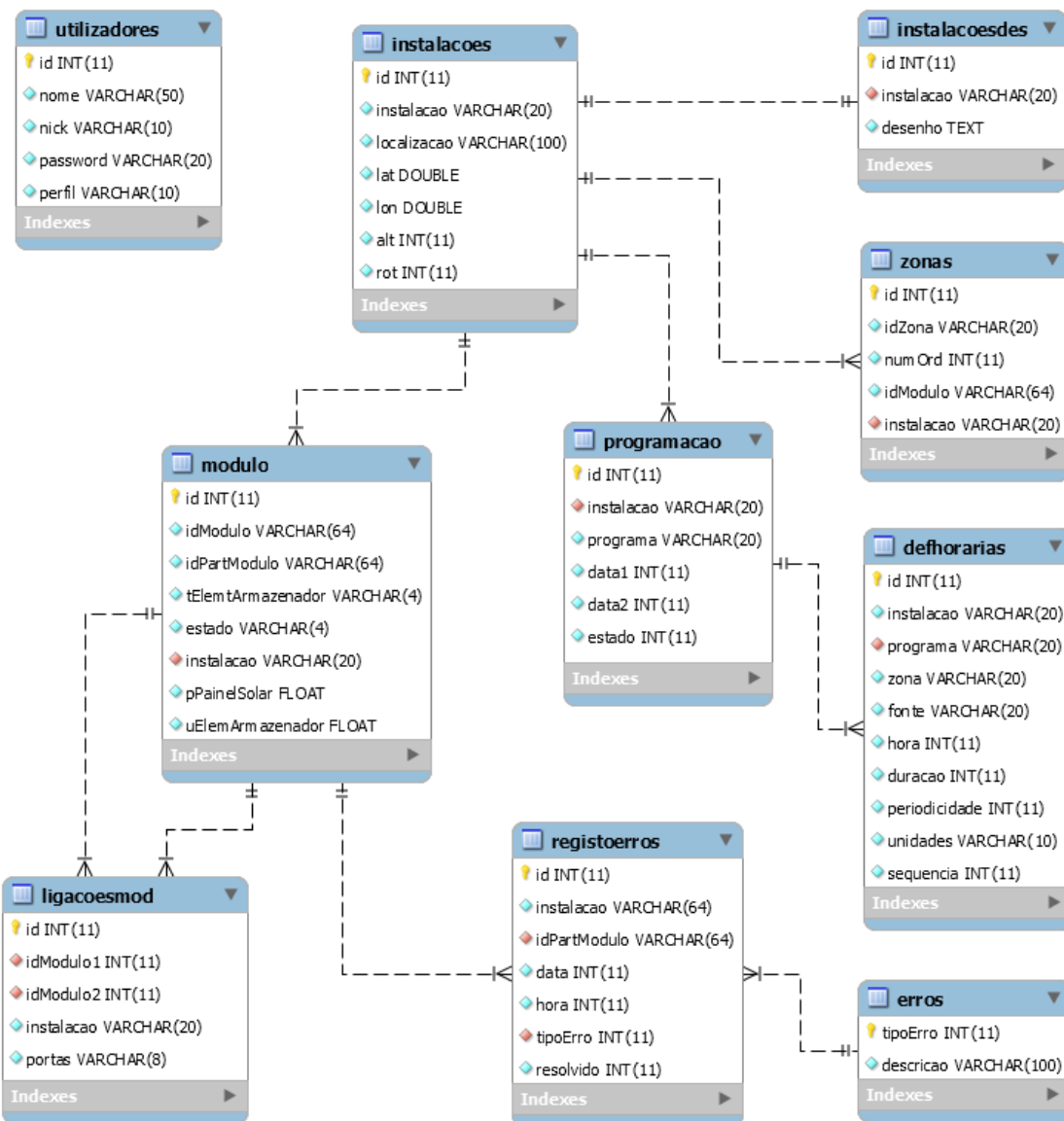


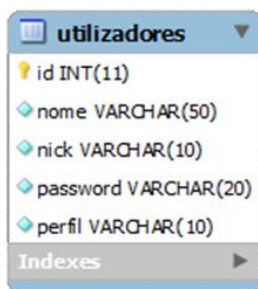
Figura 92 - Estrutura da base de dados.

### 6.3.1. Utilizadores

O acesso ao sistema de gestão, disponibilizado através de uma *interface web*, está sujeito a um controlo de forma a garantir a exclusividade da intervenção de entidades operadoras autorizadas.

Um utilizador é inequivocamente identificado pelo seu *username* e pela sua *password*. Cada utilizador poderá estar associado a um perfil que torne o seu raio de ação no sistema mais ou menos abrangente em função de políticas de acesso a definir.

No caso da presente aplicação, não foram implementados níveis de acesso por perfil, pelo que todos os utilizadores registados têm atualmente acesso total de operação na *interface* de gestão do sistema. Este projeto foi orientado para a usabilidade do sistema e não para o controlo de acessos e consequentes privilégios associados, embora num sistema de utilidade real o controlo de acessos por perfil seja uma parte importante a considerar. Na Figura 93 apresenta-se a tabela de utilizadores considerada neste sistema.



Column Name	Data Type
id	INT(11)
nome	VARCHAR(50)
nick	VARCHAR(10)
password	VARCHAR(20)
perfil	VARCHAR(10)

Figura 93 - Tabela de utilizadores considerada na base de dados.

### 6.3.2. Topologia da instalação

Cada instalação é descrita como um conjunto de zonas irrigáveis. No entanto, verifica-se em instalações reais a necessidade de descrever uma instalação como uma rede de módulos (bombas, válvulas, ligações, derivações e outros componentes) que em conjunto formalizam circuitos de abastecimento de uma ou mais fontes para uma ou mais zonas de irrigação. Assim sendo, acresce a necessidade de se representar potenciais sub-redes partilhadas no caso em que um ou mais pontos de abastecimento poderem estar ligados a uma ou mais zona de irrigação. As tabelas apresentadas na Figura 94 permitem descrever a topologia que assenta nessas considerações. A tabela central "instalacoes" mantém apenas uma descrição relativa à instalação e à sua localização geográfica. A localização geográfica é especificada pelo operador do sistema através de informação textual e através da seleção num mapa interativo construído com o auxílio

da *API* do *Google Maps* (a informação relativa às coordenadas geográficas e aos níveis de altitude é diretamente adquirida através dessa *API*). Na tabela “modulo”, é descrita toda a informação que permite caracterizar individualmente cada um dos módulos pertencentes a uma dada instalação. Toda a informação de caracterização de cada módulo é inserida pelo operador num formulário criado para o efeito. Durante a fase de desenho (descrição) da rede associada à instalação, a tabela de ligações de módulos rastreia as conexões necessárias entre módulos. A fase de desenho permite assim considerar cada ligação como uma conexão entre dois módulos na rede de irrigação (cada módulo é visto como um nó). A tabela de zonas forma um grupo independente de módulos que destacam os pontos efetivos de irrigação. Finalmente, a tabela "instalacoesdes", conserva os registos de objetos *JSON (JavaScript Object Notation)* necessários à representação da informação na *interface* utilizador do programa de gestão.

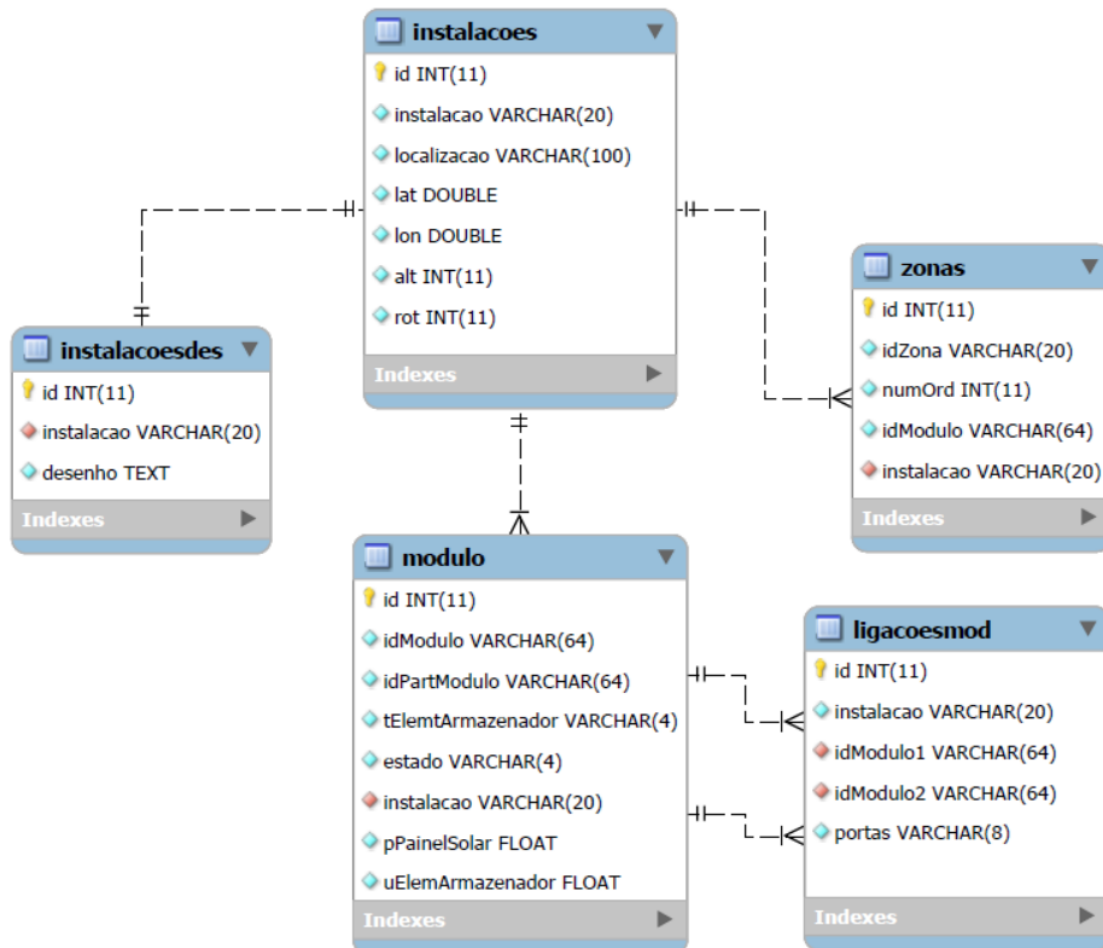


Figura 94 – Tabelas usadas na base de dados para descrever a topologia de uma instalação.

### 6.3.3. Programação

A programação das instalações de irrigação é realizada a partir da *interface* de gestão em formulário dedicado. O operador usufrui da possibilidade de definir tantos programas quanto considere relevante para o funcionamento que pretende para uma instalação. No entanto, apenas será possível ativar um programa num determinado intervalo de tempo. Nunca ocorrerá execução simultânea de programas numa mesma instalação num determinado instante.

A definição de um programa resume-se à especificação de restrições de funcionamento por intervalos de tempo das diferentes zonas existentes na instalação. Dado que um ponto de irrigação pode ser abastecido a partir de uma ou mais fontes, a especificação de cada restrição horária exige a informação do ponto de abastecimento. Cada especificação horária está associada a um período de validade e a uma periodicidade especificada em horas, dias ou semanas. Na Figura 95 apresentam-se as tabelas consideradas em base de dados durante a definição de programas de irrigação.

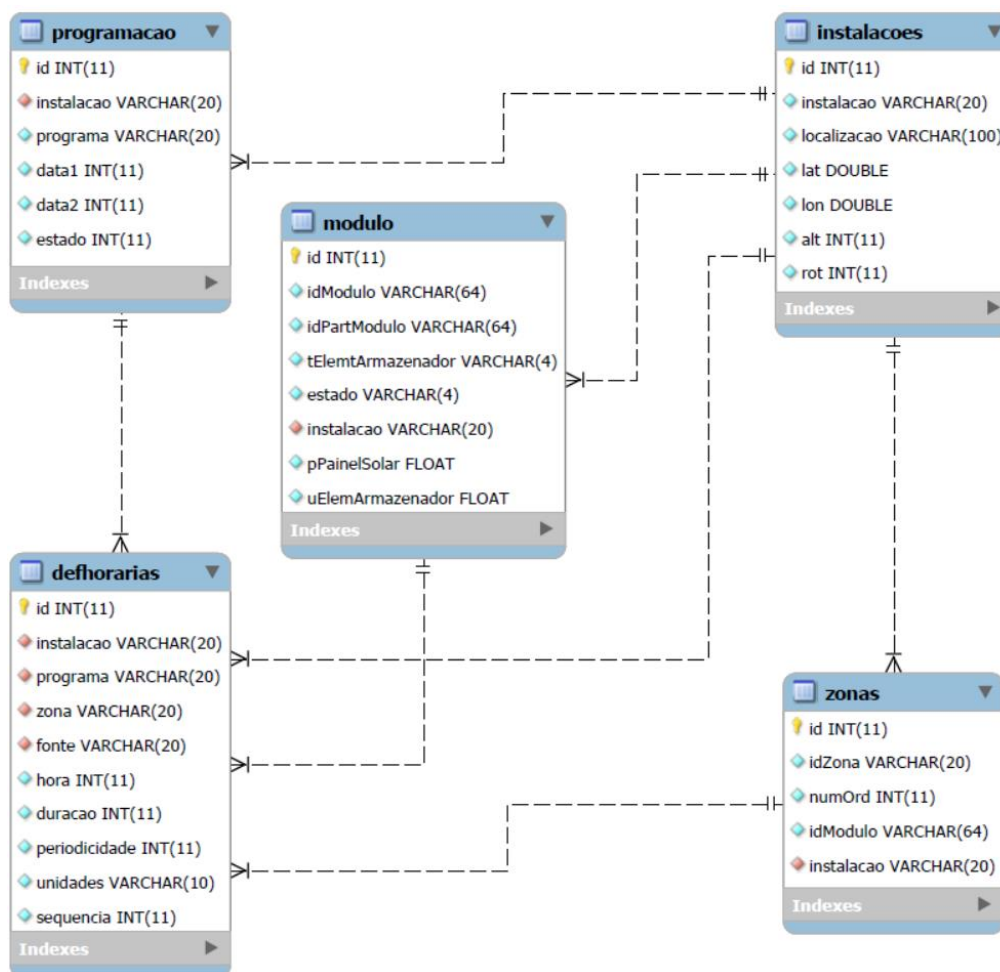


Figura 95 -Tabelas consideradas em base de dados durante a definição de programas de irrigação.



A tabela "defhorarias" contém as linhas de programação inseridas num determinado programa. Mantém a informação relativa a instantes de ativação do sistema de irrigação, periodicidades, programa a que pertencem a linha e instalação à qual se associa o programa. A tabela "programacao" estabelece uma unidade referencial para um conjunto de linhas de programa e define um prazo de validade. A informação do estado existente na tabela "programacao" indica se um programa se encontra num estado ativo (valor 0), pronto a executar, ou num estado "pendente" (valor 1), à espera de uma ativação por parte de um operador. Quando um programa ativo é modificado pelo operador, este sofre uma alteração para o estado "pendente de reativação" (estado 2). Este terceiro estado permite informar o controlador de execução de programas que uma alteração ocorreu num programa que estava ativo e que necessita de proceder à ativação de uma nova versão. Quando um programa em estado 2 é carregado pelo controlador de execução, o seu estado passa novamente para o valor 0.

#### **6.3.4. Registo de erros**

O registo de erros ocorre em fase de execução do programa controlador. Este registo visa identificar os equipamentos que possam ter vindo a apresentar uma falha durante a execução de um programa de irrigação. Atualmente o sistema prevê o rastreio de 4 tipos de erros:

- Erros ocorridos perante uma ordem de abertura da válvula motorizada;
- Erros ocorridos perante uma ordem de fecho da válvula motorizada;
- Erros de *timeout*, cada ordem submetida pelo programa controlador deve ser confirmada pelo dispositivo pilotado. Na ausência de mensagem de confirmação (que pode ocorrer por falha técnica nos dispositivos da parte operacional, perda de sinal de conexão, etc), o erro é registado passado um tempo limite pré-estabelecido;
- Erros devido à deteção de níveis de energia baixos nos elementos armazenadores de energia dos dispositivos da parte operacional (sendo pré-estabelecidos níveis mínimos necessários ao bom funcionamento do dispositivo).

Na Figura 96 pode-se observar as tabelas da base de dados usadas durante a verificação de eventuais erros ocorridos numa instalação. Os erros são registados em "registoerros". No registo fica descrito a identificação do módulo ao qual pertence a anomalia, a instalação à qual este pertence, o tipo de erro relatado, a data e hora da verificação da ocorrência do mesmo. Um

módulo pode ser associado a vários tipos de erros e o mesmo erro pode ser referenciado em vários módulos.

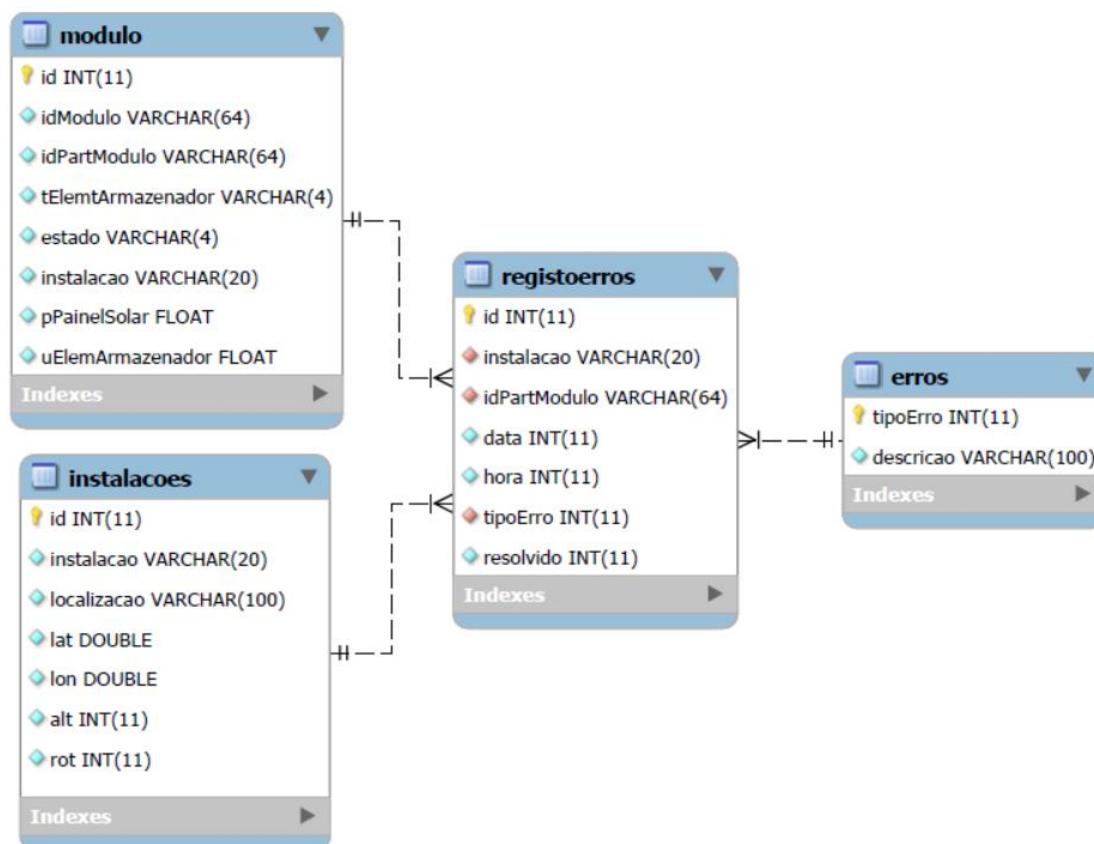


Figura 96 - Tabelas da base de dados usadas durante o registo de erros.

#### 6.4. Algoritmo de definições de conexões

A definição de caminhos, ou seja, a criação automática de canalização entre duas células previamente específicas por um operador numa dada matriz (matriz representativa dos elementos gráficos de uma instalação), inicia-se com as seguintes considerações:

- A matriz é de dimensão finita e todas as sequências de células consideradas para a criação de um caminho têm de pertencer a uma lista de coordenadas internas à matriz;
- A matriz não é um “campo livre” na medida em que existem células “obstáculo”, ou seja células que não poderão fazer parte do caminho;
- As células de partida e chegada são conhecidas à priori (especificadas pelo operador);
- As sequências de células nunca terão células em posições diagonais.

Descritas as considerações iniciais necessárias, passar-se-á a expor as sete etapas adotadas durante a implementação do algoritmo. Considera-se como objetivo ligar a célula P1 (considerada origem) à célula P2 (considerada destino).

1. Inicializa-se uma lista que irá manter a identificação de células já consideradas e uma outra de potenciais pontos de passagem.
2. Coloca-se P1 na lista de células potenciais.
3. Para cada célula na lista de células potenciais avaliam-se 2 parâmetros:
  - Os custos  $c$  de progredir através de cada uma das células candidatas (custo de percurso);
  - Uma medida da distância  $d$ , de cada célula ao destino.

No caso presente ponderam-se as progressões de forma a minimizar o recurso a “joelhos”, ângulos retos, favorecendo os percursos retilíneos.

4. Identifica-se a melhor célula que irá pertencer ao caminho de ligação, célula que apresenta o menor custo de percurso e a menor distancia à célula de destino.
5. Remove-se a célula selecionada da lista de células potenciais e coloca-se esta última na lista de células visitadas. Adicionalmente, acrescenta-se todas as novas células atingíveis a seguir à célula selecionada à lista de células potenciais.
6. Repete-se o processo a partir da etapa 3 até que a célula de destino seja parte integrante da lista de células potenciais.
7. O processo conclui com a lista de células que formam o caminho de P1 a P2, constantes nas células visitadas.

## **6.5. Resultados de implementação**

Passadas as fases de descrição e especificação do sistema *SCADA*, apresentam-se os resultados de implementação da aplicação *web* e do controlador de execução de programas.

### **6.5.1. Login e *interface* inicial**

Para que um operador tenha acesso à aplicação *web* /aplicação *SCADA* tem inevitavelmente que estar registado no sistema. Todos os operadores passam por um processo de registo antes de terem permissão para operar uma instalação. Todas as vezes que um operador

quiser aceder à aplicação tem que preencher os campos descritivos das suas credenciais de acesso no menu de *login*.

Na Figura 97 apresenta-se o menu de registo de operadores e o menu de *login* usado para permitir o acesso a operadores previamente registados. Durante o registo é obrigatório o preenchimento de todos os campos existentes.



Figura 97 - Menu de *login* e menu de registo de operadores.

Após a confirmação das credenciais de acesso o operador entra efetivamente na *interface* de gestão que lhe permite ter pleno controlo sobre a aplicação SCADA. Na Figura 98 pode-se observar a *interface* de gestão da aplicação.



Figura 98 - *Interface* inicial da aplicação SCADA.

No centro da *interface* encontra-se um mapa que o operador pode manipular após pressionar sobre o botão, “posicionar mapa”, que se encontra no canto inferior esquerdo. No

canto superior direito encontram-se quatro botões com *design* de separadores, estes permitem o acesso a menus de configuração, controlo e monitorização do estado das instalações.

### 6.5.2. Caracterização das instalações de irrigação

Pressionando sobre o botão “caraterização de instalações” é possível ter acesso a um conjunto de ferramentas de trabalho. Estas ferramentas permitem desenvolver e manusear esquemas representativos de uma instalação física de irrigação. Na Figura 99 pode-se observar o menu de caraterização de instalações.

Se o operador pretender criar um esquema de uma nova instalação tem de obrigatoriamente preencher os campos “Ref. instalação” e “Localização”, estes possibilitam definir uma designação e uma localização para a instalação a representar na área de trabalho.

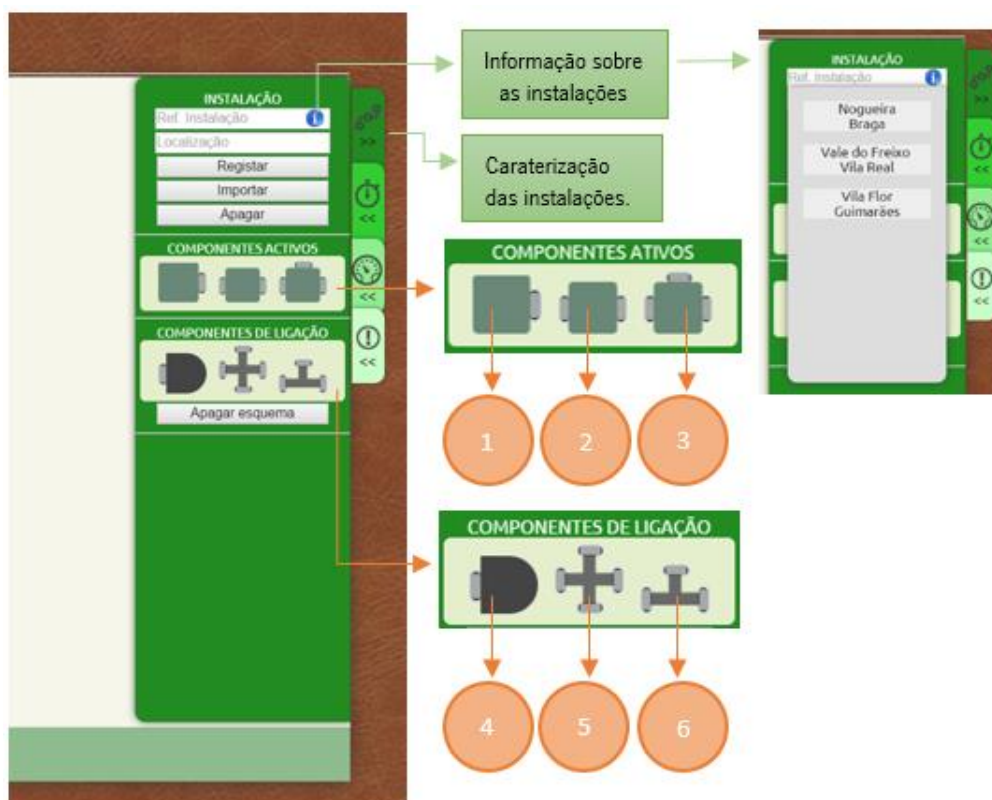


Figura 99 – Menu de caracterização de instalações.

Após a construção do esquema representativo da instalação, o operador pode registá-lo na base de dados pressionando o botão “Registrar”. Se o operador pretender visualizar informação sobre as instalações existentes na base de dados, pode fazê-lo pressionando o botão “informação sobre as instalações”. O operador pode selecionar uma das instalações existentes e importá-la para a área de trabalho, através do botão “Importar”, ou apagar a instalação selecionada através

do botão “Apagar”. Apagar uma instalação da base de dados implica a perda permanente de toda a informação pertencente a essa instalação.

Existem dois grupos distintos de componentes/módulos que o operador pode importar para a área de trabalho, para isso basta pressionar sobre o componente pretendido. O operador pode movimentar o componente selecionado dentro da área de trabalho desde que este não tenha nenhuma ligação com outro componente. Componentes com representações de ligações não podem ser movimentados. Foram considerados os seguintes grupos de componentes/módulos:

- **Componentes ativos:** Designa-se por componentes ativos todos aqueles que são passíveis de qualquer tipo de controlo ou monitorização por parte do sistema *SCADA*. Neste projeto faz-se uso da designação “componentes/Módulos ativos” de forma a possibilitar uma abstração da complexidade do sistema em questão. Um componente/módulo ativo é, na realidade, um sistema composto por um painel fotovoltaico ou fonte de energia, uma válvula motorizada ou eletrobomba, um sistema armazenador de energia, *hardware* de controlo e de comunicação. A designação de componentes ativos contempla três tipos de componentes/módulos, como se pode verificar na Figura 99:
  1. **Fonte:** Este tipo de componente representa uma fonte física num sistema de irrigação, uma eletrobomba ou mesmo uma ligação a um sistema de bombagem mais abrangente partilhado por várias instalações de irrigação;
  2. **Válvula *on/off*:** Com este tipo de componente é possível controlar a passagem de água para uma área específica do sistema de irrigação;
  3. **Válvula de três vias:** Este componente é composto por uma entrada e duas saídas. Possibilita o direcionamento do fluxo de água, individualmente, para cada uma das saídas ou para as duas saídas em simultâneo.
- **Componentes de ligação:** Os componentes de ligação não são suscetíveis de nenhum tipo de controlo ou monitorização por parte do sistema *SCADA*. Estes representam derivações na canalização da instalação física de irrigação ou representam uma determinada área física a irrigar. Os componentes de ligação encontram-se divididos em três tipos distintos:

- 4. Representação de uma zona:** Este elemento gráfico não representa nenhum componente físico, serve apenas para o operador identificar uma determinada zona a irrigar;
- 5. Derivação em “Cruzeta”:** Este tipo de componente é composto por quatro vias, uma entrada e três saídas. A água que entra no componente é repartida pelas três saídas;
- 6. Derivação em “Tê”:** Este componente é composto por uma entrada e duas saídas. Tal como no componente anterior, o fluxo de entrada é dividido pelas saídas.

Existem componentes de ligação que são automaticamente gerados pela aplicação *SCADA* quando o operador pretende unir dois componentes. Os elementos gráficos gerados automaticamente representam as ligações físicas (canalização) existente numa instalação de irrigação. Na Figura 100 apresentam-se os componentes gerados automaticamente pela aplicação. Estes componentes são gerados pelo algoritmo de definições de conexões.

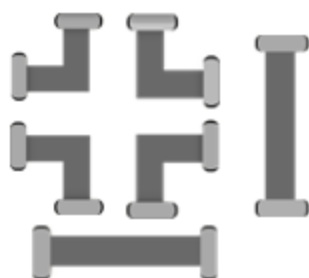


Figura 100 – componentes de ligação gerados automaticamente pela aplicação *SCADA*.

Qualquer componente que esteja presente na área de trabalho e suscetível de ser eliminado pelo operador (inclusive os componentes gerados automaticamente pela aplicação). Os componentes ativos só podem ser eliminados se não possuírem qualquer ligação a outro componente. A eliminação deste tipo de componentes exige a eliminação prévia das suas ligações. O operador pode eliminar todos os componentes existentes na área de trabalho e as suas ligações de uma só vez, basta para isso pressionar o botão “Apagar esquema”. Após esta operação não é possível, de forma alguma, recuperar o que se encontrava na área de trabalho.

Os componentes ativos e os componentes de ligação que representam uma zona a irrigar têm de passar por um estágio de parametrização. Não é possível guardar na base de dados instalações de irrigação enquanto os seus componentes não estiverem devidamente

parametrizados. Na Figura 101 pode-se observar os botões que o operador pode pressionar para apagar ou parametrizar um componente.

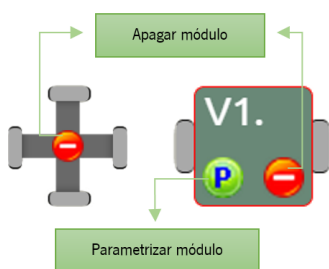


Figura 101 – Botões que permitem eliminar ou parametrizar um componente.

Para parametrizar os componentes/módulos ativos o operador tem obrigatoriamente que preencher três campos. O primeiro campo, “ID. MODULO”, permite ao operador definir um nome para o componente. O segundo campo, “ID. PARTE.”, permite ao operador introduzir um identificador particular (único) para o componente, nesta situação é usado como identificador único o endereço de 64 bits do módulo de radiofrequência *XBee*, uma vez que não existem dois módulos *XBee* com o mesmo endereço dentro da mesma série. No terceiro campo, “Selec. Element. Arm”, o operador pode definir o tipo de elemento armazenador de energia usado pelo componente/módulo. Existem dois tipos de elementos armazenadores, módulos de ultracondensadores ou baterias.

Para parametrizar as zonas, o operador apenas tem que definir um nome que a identifique. Não é possível definir duas zonas ou dois componentes com a mesma identificação para a mesma instalação de irrigação. Não é possível gerar a criação automática de canalização entre componentes suscetíveis de parametrização, se estes não se encontrarem devidamente parametrizados. Isto deve-se ao facto de as relações entre módulos guardadas na base de dados usarem alguns dos campos preenchidos durante a parametrização. Na Figura 102 apresentam-se os menus que permitem parametrizar os módulos ativos e as representações de zonas de irrigação.

#### Parametrização dos componentes/módulos ativos

MODULO:	<input type="text" value="ID. MODULO"/>	<input type="text" value="ID. PARTE"/>	Selec. Element. Arm. ▾	<input type="button" value="Validar"/>	<input type="button" value="Cancelar"/>
---------	---	--	------------------------	--	---

#### Parametrização das zonas

MODULO:	<input type="text" value="ID. MODULO"/>	<input type="button" value="Validar"/>	<input type="button" value="Cancelar"/>
---------	---	--	---

Figura 102 – Menus de parametrização.



A geração de ligações automáticas entre módulos é executada em três fases. Na primeira fase o operador seleciona o primeiro módulo, na segunda fase seleciona o segundo. Selecionados ambos os módulos o sistema *SCADA* inicia a terceira fase e cria automaticamente a representação gráfica da ligação entre módulos. As três fases descritas podem ser observadas na Figura 103.



Figura 103 – Fases da geração automática de canalização entre dois módulos.

Utilizando os recursos existentes no menu de caracterização de instalações, o operador consegue criar representações gráficas de instalações físicas de irrigação. Este conceito de representação gráfica de uma instalação torna o sistema mais “amigo” do utilizador. Na Figura 104 podem ser observados exemplos de algumas representações gráficas de instalações que poderiam de facto existir fisicamente.

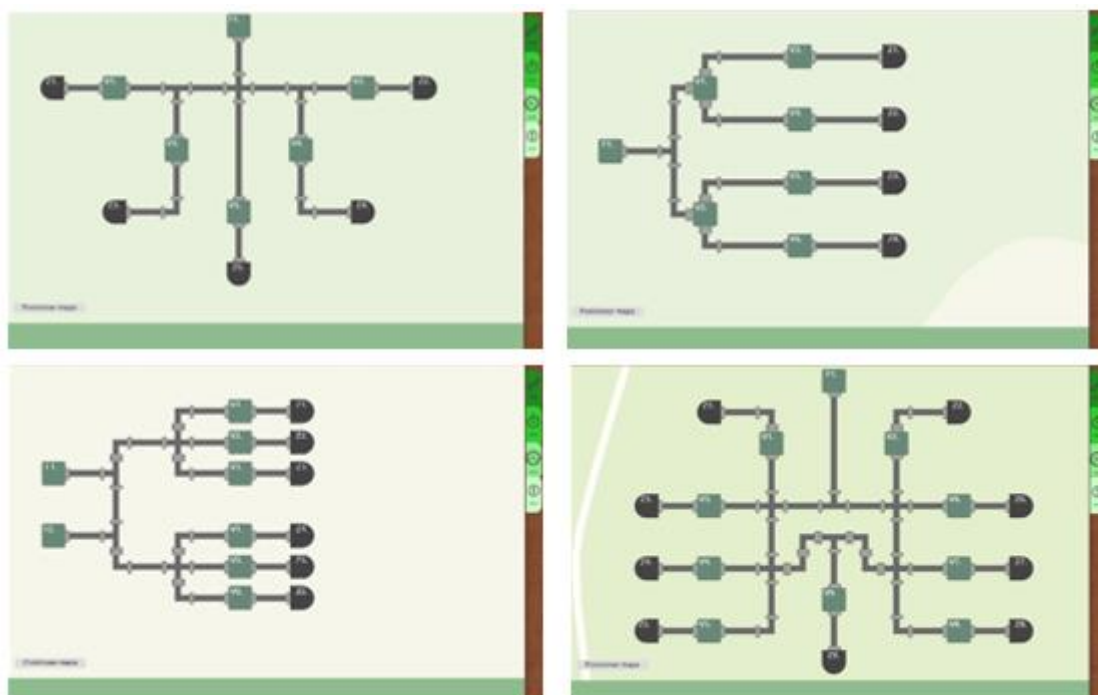


Figura 104 – Exemplos de representações gráficas de possíveis instalações de irrigação.

### 6.5.3. Programação das instalações de irrigação

Passada a fase de implementação e parametrização de uma instalação, inicia-se a fase de criação de programas de irrigação. Só é possível criar programas para instalações presentes

na área de trabalho e que tenham sido previamente gravadas na base de dados. Na Figura 105 apresenta-se um esquema das possibilidades existentes no menu de programação de instalações.

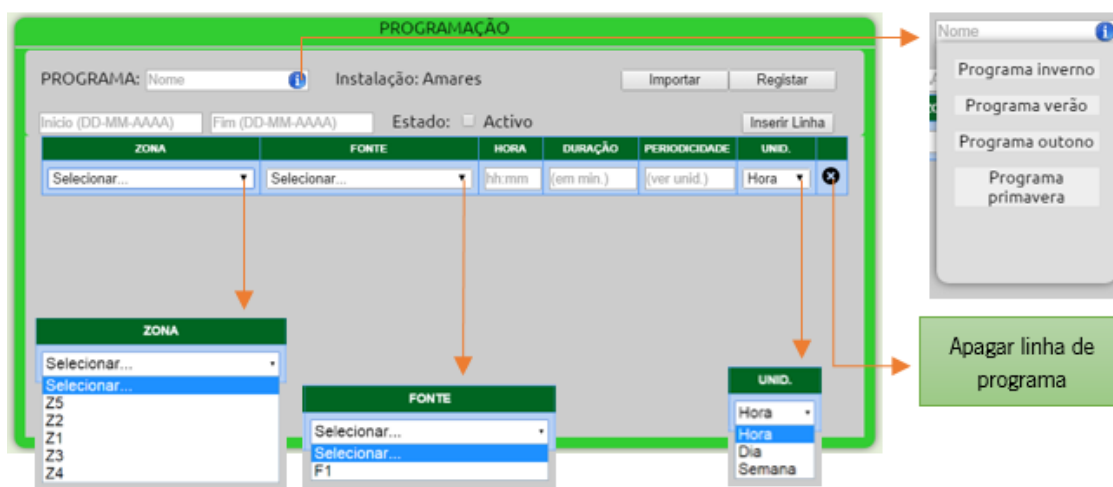


Figura 105 – Possibilidades existentes no menu de programação de instalações.

Quando o operador abre o menu de programação de instalações o campo “instalação” já se encontra preenchido com o nome da instalação corrente na área de trabalho. O operador pode verificar a existência de programas associados à instalação através do botão que se encontra no campo “PROGRAMA”. Caso os programas existam, estes podem ser importados fazendo uso do botão “Importar”, os programas importados podem ser alterados. Caso o operador pretenda criar um novo programa, este tem obrigatoriamente de preencher o campo “PROGRAMA” com o nome de um programa não existente na base de dados.

Um programa pode ou não ter associado uma data de início e uma data de fim. Se estas datas não forem especificadas, o programa é colocado em funcionamento assim que o operador o registar como ativo, recorrendo ao campo “Activo” e ao campo “Registrar”. O programa permanecerá em funcionamento até que o operador o desative. Se se pretender enquadrar o programa num determinado intervalo de tempo basta clicar sobre o campo “Início” ou “Fim”. Esta ação desencadeia o aparecimento de um calendário onde o operador pode escolher a data para o campo definido. Este calendário é obtido recorrendo ao *plugin Zebra datepicker* [64]. Na Figura 106 pode-se observar o calendário gerado.

Um programa é composto por linhas de programação, estas representam necessidades de irrigação. As fontes e as zonas existentes na instalação presente na área de trabalho já se encontram disponíveis nos campos associados, o operador só tem de as seleccionar. O campo “HORA” representa a hora de início da irrigação, o campo “DURAÇÃO” é preenchido em minutos

e representa o tempo efetivo de irrigação. Os campos “PERIODICIDADE” e “UNID.” (unidades), encontram-se relacionados. No primeiro campo define-se um valor numérico representativo de um período e no segundo campo as unidades associadas ao valor definido no primeiro campo.

O operador pode inserir quantas linhas de programação achar necessárias através do botão “Inserir linha”. Caso haja necessidade de apagar uma linha basta pressionar o botão que permite apagar a linha correspondente.



Figura 106 – Calendário gerado quando o operador pretende determinar datas para um programa.

Na Figura 107 pode-se observar um programa definido para a instalação Amares. O programa é denominado de “Programa outubro”. Este encontra-se ativo durante todo o mês de outubro e tem duas linhas de programação. Na primeira linha de programação, a zona Z1 vai ser irrigada a partir da fonte F1, a irrigação começa às 10 horas e dura 20 minutos. Esta linha de programação vai ser executada de três em três dias. Na segunda linha, a zona Z3 vai ser irrigada pela fonte F1, a irrigação começa às 16 horas e 30 minutos e dura 60 minutos. Esta linha de programação vai repetir-se uma vez por semana.

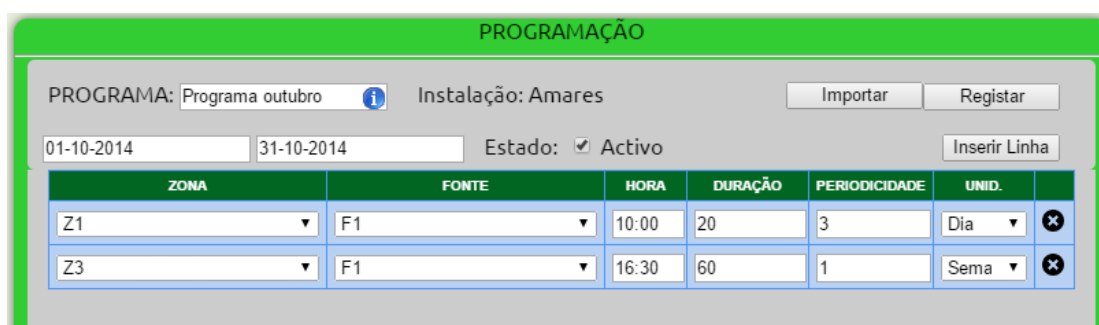


Figura 107 – Exemplo de um programa definido como ativo.

#### 6.5.4. Monitorização do estado da instalação

O sistema SCADA permite efetuar a monitorização do estado dos componentes ativos da instalação de irrigação de dois modos distintos. O primeiro modo permite monitorizar o estado de

carga do elemento armazenador de energia e a energia fornecida por unidade de tempo pelo painel fotovoltaico. Esta informação pode ser obtida individualmente para cada componente da instalação ou pode ser visualizada de forma a verificar de uma só vez a informação relativa a todos os equipamentos. Para o operador aceder à informação individual de cada componente da instalação, este tem de passar o cursor do rato por cima do componente em questão. Se o operador quiser verificar a informação relativa a todos os componentes da instalação tem de pressionar o botão “Monitorização da instalação”. O campo “C.” representa a carga no elemento armazenador de energia e o campo “P.” representa a extração de energia por unidade de tempo no painel. A informação relativa a estes dois campos é atualizada de um em um minuto.

Na Figura 108 apresentam-se as duas maneiras possíveis de verificar a informação relativa à carga no elemento armazenador de energia e à energia extraída por unidade de tempo pelo painel fotovoltaico. Devido à inexistência de componentes físicos capazes de fornecer esta informação à aplicação SCADA foi necessário alimentar manualmente os campos da base de dados onde esta informação é armazenada.

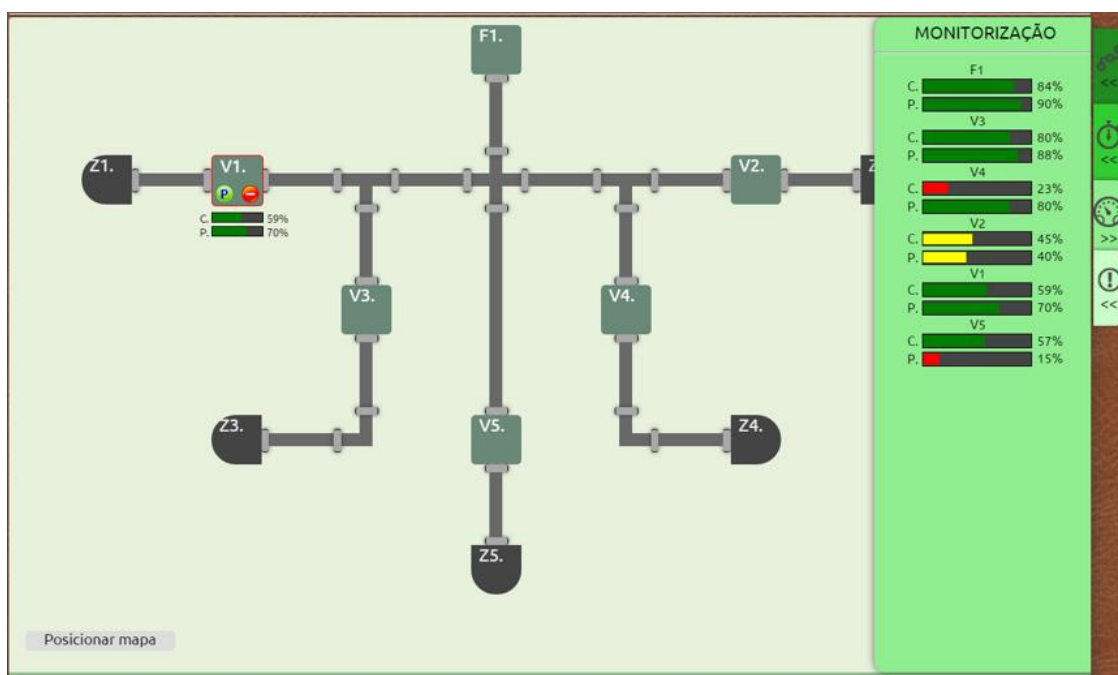


Figura 108 – Informação relativa, à carga nos elementos armazenadores de energia e à energia extraída por unidade de tempo a partir do painel fotovoltaico.

O outro modo de monitorizar o estado dos componentes ativos de uma instalação passa por verificar os erros provocados por anomalias ocorridas com os mesmos. Nesta aplicação são levados em consideração quatro tipos de erros:

- **Erro reportado pelo módulo perante uma ordem de abertura:** O operador é notificado da ocorrência deste erro quando o controlador da válvula transmite ao controlador de execução de programas que não conseguiu efetivar a ordem de abertura da válvula;
- **Erro reportado pelo módulo perante uma ordem de fecho:** Este erro segue as mesmas linhas do erro anterior mas para quando ocorre uma anomalia com uma ordem de fecho de uma válvula;
- **Timeout de confirmação na sequência de uma ordem de envio:** Todas as ordens de fecho ou de abertura para uma determinada válvula, enviadas pelo controlador de execução de programas, têm de ser confirmadas pelo controlador da válvula num prazo de cinco segundo. Caso tal não aconteça ocorre uma notificação de erro por *timeout*;
- **Carga demasiado baixa no elemento armazenador:** Este tipo de erro ocorre quando a carga nos elementos armazenadores de energia se encontra no limite de conseguir alimentar convenientemente os controladores das válvulas. Caso o elemento armazenador de energia seja um módulo de ultracondensadores, a notificação do erro ocorre quando a diferença de potencial aos terminais do módulo atinge um valor igual ou inferior a 1 V. Se o elemento armazenador for uma bateria, a notificação do erro ocorre quando a diferença de potencial aos seus terminais atinge valores iguais ou inferiores a 6.6 V.

O operador é notificado sempre que ocorre uma anomalia numa estação através de uma janela igual à que se pode observar na Figura 109. O utilizador pode escolher se deseja continuar a ser notificado ou não. Caso a operador pressione “OK”, a aplicação *SCADA* vai notificá-lo de um em um minuto. Caso pressione “Cancelar”, a aplicação vai passar a notificá-lo de cinco em cinco minutos. Esta abordagem impede que o operador se esqueça da ocorrência da anomalia.

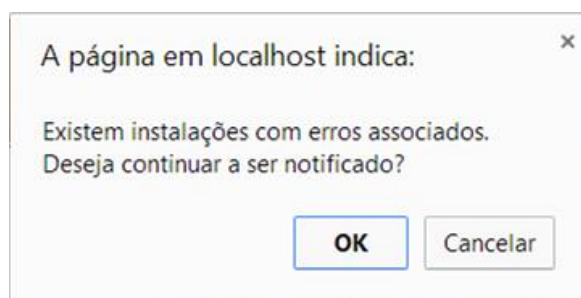
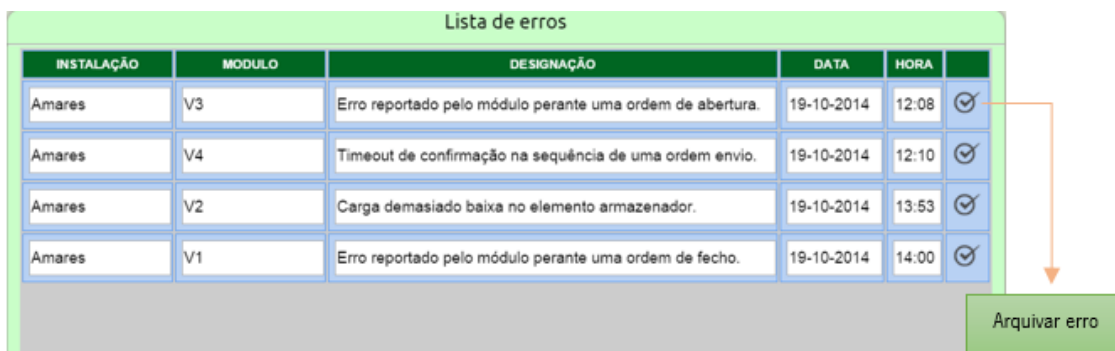


Figura 109 – Janela de notificação de anomalia.

A única forma de um operador deixar de ser notificado sobre a ocorrência de uma anomalia é arquivar o erro na janela de lista de erros. O operador acede à lista de erros pressionando o botão “Monitorizar anomalias”. O operador deve arquivar um erro reportado pelo sistema apenas se a anomalia que criou esse erro se encontrar efetivamente resolvida. Na Figura 110 apresenta-se a janela “Lista de erros”. Nesta janela o operador pode verificar todos os erros provocados por anomalias no sistema.



The screenshot shows a window titled "Lista de erros" with a table containing four rows of error data. Each row has a checkmark icon in the last column. An orange arrow points from the checkmark in the first row to a green button labeled "Arquivar erro" located below the table.

INSTALAÇÃO	MODULO	DESIGNAÇÃO	DATA	HORA	
Amares	V3	Erro reportado pelo módulo perante uma ordem de abertura.	19-10-2014	12:08	☑
Amares	V4	Timeout de confirmação na sequência de uma ordem envio.	19-10-2014	12:10	☑
Amares	V2	Carga demasiado baixa no elemento armazenador.	19-10-2014	13:53	☑
Amares	V1	Erro reportado pelo módulo perante uma ordem de fecho.	19-10-2014	14:00	☑

Figura 110 – Exemplo de lista de erros.

### 6.5.5. Execução de programas ativos

A execução de programas de irrigação ativos fica a cargo de um programa desenvolvido em C# denominado de controlador de execução de programas. O programa segue uma arquitetura cliente/servidor. De cinco em cinco segundos o controlador (servidor) verifica a existência de programas de irrigação ativos na base de dados. Se algum se encontrar ativo o controlador lança um processo (cliente) para esse programa. O processo começa por criar uma conexão cliente com o controlador num dado endereço e numa dada porta. A partir deste momento o processo lançado fica responsável pelas linhas de programação pertencentes ao programa ativo. Assim que uma linha de programação se encontre pronta a ser executada, o processo importa da base de dados as relações de ligações entre módulo de forma a criar uma lista de dispositivos físicos a controlar, ou seja, uma lista de dispositivos associados a válvulas que é necessário atuar por forma a permitir que a água de uma dada fonte chegue a uma dada zona de irrigação.

O processo envia para o controlador de execução de programas as mensagens a transmitir aos dispositivos físicos que compõem a instalação de irrigação. O controlador envia as mensagens pela porta série e inicia o processo de confirmação de mensagens enviadas. Se nos cinco segundos seguintes o controlador não receber todas as confirmações de receção de mensagens, por parte dos dispositivos físicos da instalação de irrigação, o programa é abortado e é enviado para a base

de dados uma notificação de erro. Caso todos os dispositivos respondam mas alguma confirmação de receção seja negativa (um controlador de uma válvula não conseguiu atuar) é igualmente enviado para a base de dados uma notificação de erro e o programa é abortado. Abortar um programa significa no contexto deste projeto passar um programa existente na base de dados do estado ativo para o estado pendente. Um processo também tem a capacidade de abortar o programa pelo qual é responsável, basta para isso que o programa se encontre fora do período de funcionamento (intervalo entre a data de início e data de fim especificado pelo operador). O processo passa o programa para o estado pendente na base de dados e termina.

Para evitar a criação de pressões hidráulicas na canalização das instalações de irrigação, as ordens de abertura e de fecho das válvulas seguem uma sequência organizada. As ordens de abertura são efetuadas de modo a que primeiro se abram as válvulas e só depois a fonte. As ordens de fecho seguem uma sequência inversa.

Um servidor não tem capacidade de solicitar informação a um cliente, deste modo o processo cliente faz pedidos de informação ao controlador de execução de programas, de cinco em cinco segundos. O conteúdo da informação recebida determina o estado de funcionamento do processo cliente. Se a informação for de caráter positivo, o processo cliente continua em funcionamento, caso contrário, o processo torna iniciativa de terminar.

O controlador de execução de programas cria tantos processos cliente quantos programas ativos existirem na base de dados. Deste modo é possível controlar várias instalações de irrigação em simultâneo.

# 7. Conclusões e trabalho futuro

A falta de sistemas de controlo eficientes no setor agrícola resulta normalmente na destruição de parte da canalização e na conseqüente perda de um recurso. Este tipo de situação dá-se quando ocorrem anomalias com as válvulas, basta uma falha numa válvula para que se gere pressão suficientemente para destruir parte da canalização. A energia necessária para alimentar alguns tipos de válvulas elétricas provém diretamente da rede elétrica. Este tipo de situação traz alguns inconvenientes, uma vez que origina a passagem de cablagem elétrica em vários pontos da plantação agrícola.

Pretendeu-se com este trabalho de dissertação desenvolver uma válvula motorizada, um controlador e um sistema de monitorização e controlo do tipo *SCADA* para o setor agrícola. O controlador e a válvula devem ser energeticamente autónomos da rede elétrica para evitar a passagem de cablagem pela plantação agrícola.

O trabalho realizado durante esta dissertação passou por três fases. Na primeira fase desenvolveu-se uma válvula motorizada capaz de atuar um passador de água. A mecânica da válvula é composta por:

- **Uma estrutura de suporte:** A estrutura de suporte foi desenvolvida para sustentar os componentes da válvula. O material escolhido foi o compensado naval, o qual é fácil de trabalhar e apresenta bastante robustez quando colocado sobre pressões mecânicas;
- **Um passador de esfera:** O passador de esfera permite controlar a passagem do fluxo de água na instalação de irrigação. Neste projeto foi usado um passador de uma polegada e meia;
- **Um motor de corrente contínua:** Optou-se por se usar um motor de corrente contínua como atuador porque este tipo de atuador só consome energia durante o ato de abertura ou fecho da válvula.

A potência em jogo e os tempos de atuação da válvula motorizada dependem diretamente do estado de carga dos elementos armazenadores de energia. A potência em jogo varia entre



os 10.24 W e os 27 W. Quando se usa a bateria como elemento armazenador de energia o tempo que a válvula demora a passar de um estado para outro é inferior a um segundo, caso se use o módulo de ultracondensadores os tempos variam entre um e três segundos.

Na segunda fase foi desenvolvido um controlador, denominado nesta dissertação de controlador energeticamente autónomo. O controlador desenvolvido apresenta quatro competências:

**Carregamento e balanceamento dos elementos armazenadores de energia:** O controlador apresenta a capacidade de extrair a energia de um painel fotovoltaico de 20 W e controlar o fluxo de energia de modo a possibilitar o carregamento de um dos dois elementos de armazenamento de energia. Optou-se por se usar como elementos armazenadores de energia, uma bateria Li-Po de 7.4 Wh e um módulo de ultracondensadores composto por dois ultracondensadores de 3000 F em série. O módulo apresenta uma capacidade de armazenamento de 6 Wh. O controlador monitoriza individualmente cada célula dos elementos armazenadores de energia de forma a garantir um carregamento uniforme. Para o carregamento da bateria optou-se pela utilização de um algoritmo PI. Durante o carregamento do módulo de ultracondensadores é utilizado um algoritmo *MPPT*.

O controlador mostrou-se capaz de extrair do painel fotovoltaico valores de energia por unidade de tempo compreendidos entre os 2 e os 17 W. Durante o carregamento do módulo de ultracondensadores, o controlador apresentou um rendimento médio de 76 % e foi possível carregar o módulo até 94 % da sua carga máxima. Foi possível carregar o módulo em 34 minutos e o desequilíbrio máximo entre células verificado foi de 0.07 V. O módulo de ultracondensadores conseguiu manter o controlador plenamente alimentado durante 11 horas e 50 minutos.

Durante o carregamento da bateria, o controlador apresentou um rendimento médio de 78 % e foi possível carregá-la até 85 % da sua carga máxima. O tempo de carga da bateria foi de 58 minutos e o desequilíbrio máximo entre células mensurado foi de 0.05 V. A bateria conseguiu manter o controlador em pleno funcionamento durante 14 horas e 2 minutos.

**Sistema de alimentação do controlador:** O controlador pode ser alimentado pelo painel fotovoltaico ou por um dos elementos armazenadores de energia. Se a energia for proveniente do painel ou da bateria, a tensão é regulada recorrendo ao conversor *Traco Power* TSR 1-2450. Se o controlador for alimentado pelo módulo de ultracondensadores, a tensão é regulada através do

*step-up* U1V10F5 da *Pololu*. Este *step-up* conseguiu extrair a energia do módulo até a tensão aos seus terminais atingir 1 V, ficando ainda aproximadamente 3.6 % da energia do módulo de ultracondensadores por extrair. O conversor *Traco Power* conseguiu extrair energia da bateria e do painel fotovoltaico enquanto a diferença de potencial aos terminais destes não foi inferior a 6.6 V.

**Controlo e alimentação da válvula motorizada:** O controlo sobre o estado da válvula motorizada é conseguido recorrendo a dois sensores óticos TCST 1000 e um *MOSFET* P60NF06. O *MOSFET* permite controlar a alimentação da válvula e os sensores dão ao controlador *feedback* do seu estado.

**Sistema de comunicação:** Apesar de só se ter desenvolvido um controlador energeticamente autónomo, o sistema de comunicação foi idealizado e configurado para funcionar como uma rede *mesh*. A comunicação entre o controlador e o sistema *SCADA* é efetuada recorrendo a módulos de radiofrequência *XBee PRO S2B* configurados no modo *API*. A distância máxima conseguida entre dois módulos foi de 386 metros.

Na terceira fase desenvolveu-se um sistema *SCADA* que permite que um operador controle e monitorize remotamente instalações de irrigação. O sistema é composto por duas componentes de *software*. A primeira componente, designada de aplicação *web*, cria uma *interface* amigável do utilizador onde um operador pode efetivamente monitorizar e controlar as instalações através da criação de programas de irrigação. Esta parte do sistema foi desenvolvida recorrendo às seguintes tecnologias de programação:

- *HTML + CSS*: Usadas na estruturação da camada de apresentação;
- *Javascript*: Linguagem de *script* a executar em *interfaces* clientes;
- *PHP*: Linguagem de *script* a executar do lado servidor.

Durante a implementação foi usada a ferramenta de desenvolvimento *web WampServer version 2.5*, esta é composta por um servidor *Apache* e por base de dados *MySQL*. A base de dados serve de *interface* entre a aplicação *web* e o *software* desenvolvido na segunda componente do sistema *SCADA*.

A segunda componente, designada de controlador de execução de programas, cria uma *interface* entre a base de dados e a instalação física de irrigação. As ordens de controlo passadas pelo operador ao sistema *SCADA* através da aplicação *web* refletem-se na base de dados. O controlador de execução de programas monitoriza constantemente a base de dados à procura de

programas de irrigação ativos. As ordens de controlo existentes nos programas são passadas aos elementos físicos da instalação de irrigação através de um módulo de radiofrequência *XBee PRO S2B*. O controlador de execução de programas segue uma arquitetura cliente/servidor e foi desenvolvido em C# recorrendo ao *.NET Framework 4* da *Microsoft*.

A aplicação *web* permite que um operador crie esquemas gráficos representativos de instalações físicas de irrigação. Isto é conseguido através do manuseamento de módulos que representam os elementos existentes numa instalação. Após criar uma instalação, o operador pode criar programas de irrigação nos quais pode definir períodos e especificações de irrigação. A qualquer momento pode-se verificar a informação referente aos equipamentos pertencentes a uma instalação, pode-se verificar, a carga nos elementos armazenadores de energia e a potência em jogo nos painéis fotovoltaicos. O sistema cria notificações de erro quando são verificados problemas com os equipamentos da instalação. O controlador de execução de programas mostrou ser capaz de gerir mais do que uma instalação de irrigação simultaneamente.

O trabalho futuro passa pelo desenvolvimento de melhorias e adição de novas funcionalidades ao projeto desenvolvido durante esta dissertação. Em relação à válvula motorizada, a principal melhoria passa pela criação de uma estrutura de suporte estanque que proteja a parte elétrica das diferentes condições ambientais. O controlador também pode sofrer melhorias por forma a aumentar o seu rendimento durante o carregamento dos sistemas armazenadores de energia.

Sugerem-se a adição de duas novas funcionalidades ao sistema *SCADA*. A primeira passa pela implementação de um controlo de acessos por perfil de utilizador, restringindo ou permitindo o acesso a dadas funcionalidades da aplicação *web*. A segunda funcionalidade passa pela criação de um programa que possibilite a simulação de instalações de irrigação virtuais de modo a facilitar a prevenção de ocorrências de anomalias em sistemas reais.

# Referências

- [1] M. Rijo, "Modernização de canais de rega," em *II Congresso Nacional de Rega e Drenagem*, Fundão.
- [2] ABB, "Power and productivity for a better world," [Online]. Available: <http://www.abb.pt/cawp/seitp202/ff40458785321593c12579a0003f0a05.aspx>. [Acedido em 22 Novembro 2013].
- [3] I. R. Fontes, "Sistema de Supervisão e Controle para Casas de Vegetação Empregando Rede Wireless de Sensores," Brasil.
- [4] Rain Bird corporation, "ClimateMinder," [Online]. Available: <http://rainbird.com/ag/products/ClimateMinder/>. [Acedido em 22 Novembro 2013].
- [5] ESA, "Integrated & telecommunications applications," 17 Agosto 2012. [Online]. Available: <http://iap.esa.int/projects/water/grapelook>. [Acedido em 24 Novembro 2013].
- [6] CTS-CentraTechSystems, "Water and Energy Management Specialists," [Online]. Available: <http://www.centratech.com.au/water/agriculture>. [Acedido em 25 Novembro 2013].
- [7] Paineis Fotovoltaicos, "Funcionamento de painéis fotovoltaicos," [Online]. Available: <http://www.paineisfotovoltaicos.com/funcionamento.php>. [Acedido em 4 Dezembro 2013].
- [8] Y. Chu, Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies, Global Energy Network Institute (GENI), 2011.
- [9] R. A. O. Barros, *Interface entre Painéis Solares Fotovoltaicos e uma Carga Monofásica, Dissertação de Mestrado*, Guimarães: Universidade do Minho, 2012.
- [10] Energy Market Authority, Handbook for Solar Photovoltaic (PV) Systems, Singapore, 2011.
- [11] Humdinger wind energy, "WINDBELT INNOVATION," 2010. [Online]. Available: [http://www.humdingerwind.com/#/wi\\_overview/](http://www.humdingerwind.com/#/wi_overview/). [Acedido em 4 Dezembro 2013].
- [12] A. Faraz, S. Shazia e N. Kehkeshan, "Powering-Up Charging Stations for the Hybrid Electrical Vehicles by Harvesting Wind Energy Using Modified Wind Belt System," em *Advance in Electronic and Electric Engineering*, India, Research India Publications, 2013, pp. 881-892.
- [13] M. R. Patel, Wind and Solar Power Systems, CRC Press, ISBN 0-8493-1570-0, 2006.
- [14] Dr.P.Balaguru, B. Raj e B.E.Vignesh, "Low Cost Energy Production Using Wind Belt Technology," *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 2, pp. 252-255, 2013.
- [15] G. Tibola, *Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência*, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

## Referências

---

- [16] G. Eberspacher, "Atitude Sustentável," 24 Outubro 2012. [Online]. Available: <http://atitudesustentavel.com.br/blog/2012/10/24/veja-como-gerar-energia-na-sua-casa/>. [Acedido em 8 Dezembro 2013].
- [17] G. Silva, "5. Documentação de apoio-Válvulas de controlo," Instituto Politécnico de Setúbal, [Online]. Available: <http://lodi.est.ips.pt/gsilva/instrumentacao2/conteudo-2.htm>. [Acedido em 10 Dezembro 2013].
- [18] J. K. Adolf Goetzberger, *Crystalline Silicon Solar Cells*, Germany: John Wiley & Sons, 1998.
- [19] Universidade do Minho, "Células fotovoltaicas," Universidade do Minho, [Online]. Available: <http://alv.fisica.uminho.pt/simulacoes/efoto/paineis.html>. [Acedido em 22 Maio 2014].
- [20] gstriatum, "As Energias Renováveis," gstriatum, [Online]. Available: <http://www.gstriatum.com/pt/introducao-aos-paineis-solares-fotovoltaicos/>. [Acedido em 22 Maio 2014].
- [21] F. M. Ciprian Nemes, "An Analysis of a Photovoltaic Panel Model," em *2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2012)*, asi, Romania, 2012.
- [22] A. Cheknane, H. S. Hilal, F. Djefal, B. Benyoucef e J. P. Charles, "An equivalent circuit approach to organic solar cell modelling," *Microelectronics Journal* 39, p. 1173–1180, 2008.
- [23] V. Quaschnig e R. Hanitsch, "NUMERICAL SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC GENERATORS WITH SHADED CELLS," em *30th Universities Power Engineering Conference, Sept. 5-7, pp. 583-586*, Greenwich, 1995.
- [24] M. G. Villalva, J. R. Gazoli e E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," em *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 2009.
- [25] E. Skoplaki e J. Palyvos, "Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations," *Renewable Energy*, vol. 34, nº Operating temperature of photovoltaic, p. 23–29, 2009.
- [26] Astronergy, *Datasheet: Crystalline PV Module-CHSM6612P Series*, Zhejiang: Chint Solar, 2012.
- [27] HK RE Net, "HK RE Net," Electrical and Mechanical Services Department, [Online]. Available: [http://re.emsd.gov.hk/english/solar/solar\\_ph/solar\\_ph\\_to.html](http://re.emsd.gov.hk/english/solar/solar_ph/solar_ph_to.html). [Acedido em 29 Maio 2014].
- [28] J. d. J. Fiorentino e O. J. Seraphim, "Análise da eficiência de módulos fotovoltaicos instalados em condições normais de operação," *Energ. Agric.*, vol. 20, nº Energia solar, pp. 89-112, 2005.
- [29] SOLARABF CO., "Painel fotovoltaico," itpac, [Online]. Available: <http://pv-solar-panel.org/pt/photovoltaic-panels.html>. [Acedido em 2 Junho 2014].
- [30] M. K. Kazimierzczuk, *Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters*, Dayton, Ohio, USA: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [31] T. Eram e P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 22, pp. 439-449, 2007.

## Referências

---

- [32] S.-I. Go, S.-J. Ahn, J.-H. Choi, W.-W. Jung, S.-Y. Yun e I.-K. Song, "Simulation and Analysis of Existing MPPT Control Methods in a PV Generation System," *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 1, pp. 446-451, 2011.
- [33] S. Jain e V. Agarwal, "Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, p. 753–762, September 2007.
- [34] Movelaria Boá, "Tipos de madeiras para Móveis," Movelaria Boá, [Online]. Available: <http://www.movelariaboa.com.br/materia-prima/madeiras/madeira-moveis/>. [Acedido em 9 Julho 2014].
- [35] Meber, "Válvula Esfera 1.1/2 1510," Meber Metais S/A, [Online]. Available: <http://meber.com.br/produtos/produto/valvula-esfera-1-1-2-1510/>. [Acedido em 9 Julho 2014].
- [36] Autodesk, "AutoCAD," Autodesk Inc., [Online]. Available: <http://www.autodesk.com/products/autocad/overview>. [Acedido em 16 09 2014].
- [37] Trimble Buildings, "sketchup," Trimble Navigation Limited, [Online]. Available: <http://www.sketchup.com/>. [Acedido em 16 09 2014].
- [38] Mercado Livre, "Placa De Fibra De Vidro Cobreada 20x20 Pci Circuito Virgem," MercadoLivre, [Online]. Available: [http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-563709402-placa-de-fibra-de-vidro-cobreada-20x20-pci-circuito-virgem-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-563709402-placa-de-fibra-de-vidro-cobreada-20x20-pci-circuito-virgem-_JM). [Acedido em 9 Julho 2014].
- [39] Maxwell, *K2 SERIES ULTRACAPACITORS - BCAP3000 Datasheet*, San Diego, U.S.A.: Maxwell Technologies, 2013.
- [40] TME Electronic Components, "MF-20W," TME Electronic Components, [Online]. Available: <http://www.tme.eu/en/details/mf-20w/photovoltaic-modules/#>. [Acedido em 16 09 2014].
- [41] Digi, XBee/XBee-PRO ZB RF Modules, Minnetonka, U.S.A.: Digi International, 2014.
- [42] Powersim, "PSIM," Powersim Inc., [Online]. Available: <http://powersimtech.com/products/psim/>. [Acedido em 16 09 2014].
- [43] Bourns JW Miller, *High Current Toroid Inductors 2100 Series - Datasheet*, California: Bourns, REV. 07/09.
- [44] Fairchild, *MBR1035 - MBR1060 Schottky Rectifiers - Datasheet*, San Jose, U.S.A.: Fairchild Semiconductor Corporation, 2013.
- [45] Allegro MicroSystems, *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor-ACS712 Datasheet*, Massachusetts, U.S.A: Allegro MicroSystems, 2007.
- [46] Texas Instruments, *LOW POWER, SINGLE-SUPPLY, RAIL-TO-RAIL OPERATIONAL AMPLIFIERS-OPA344 Datasheet*, Texas, U.S.A.: Texas Instruments, 2008.
- [47] Sparkfun, "Low Current Sensor Breakout - ACS712," Sparkfun, [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/8883>. [Acedido em 26 Junho 2014].

## Referências

---

- [48] Atmel, "ATmega328P," Atmel Corporation, [Online]. Available: <http://www.atmel.com/devices/atmega328p.aspx>. [Acedido em 16 09 2014].
- [49] STMicroelectronics, *P-channel 55 V, 0.016  $\Omega$ , 80 A TO-220 - STP80PF55 Datasheet*, Geneva, Switzerland: STMicroelectronics, 2010.
- [50] Vishay Intertechnology, *Schottky Barrier Rectifier MBR1660 - Datasheet*, Malvern, U.S.A.: Vishay Intertechnology, 2012.
- [51] Bourns JW Miller, *High Current Toroid Inductors 2300 - Series Datasheet*, California: Bourns, REV. 07/09.
- [52] Battery University, "BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries," Coalescent Design, [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_prolong\\_lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries). [Acedido em 21 09 2014].
- [53] L. RANA, *Battery Performance Measurement And Prediction For A Lithium Polymer Power Source In Electrically Driven UAV*, Hertfordshire: School of Engineering and Technology - University of Hertfordshire, 17/04/2013.
- [54] ON Semiconductor, *Plastic Medium-Power Silicon NPN Darlingtons - BD675 Datasheet*, Colorado, U.S.A.: ON Semiconductor, 2013.
- [55] ON Semiconductor, *Plastic Medium-Power Silicon PNP Darlingtons - BD676 Datasheet*, Colorado U.S.A.: ON Semiconductor, 2013.
- [56] Traco Power, *DC/DC Converters - Traco Power TRS 1-2450 Datasheet*, Zurich, Switzerland: Traco electronic AG, 2012.
- [57] Altigator, "Altigator Aerial View Aircrafts," Altigator, [Online]. Available: <http://mikrokoetter.altigator.com/traco-dcdc-voltage-regulator-tsr12450-5v1a-p-78.html>. [Acedido em 1 Julho 2014].
- [58] Pololu, "Pololu 5V Step-Up Voltage Regulator U1V10F5," Pololu Corporation, [Online]. Available: <http://www.pololu.com/product/2564>. [Acedido em 1 Junho 2014].
- [59] Vishay, *Transmissive Optical Sensor without Aperture - TCST 1000 Datasheet*, Heilbronn, Germany: Vishay Semiconductor GmbH, 1999.
- [60] STMicroelectronics, *N-channel 60 V, 0.014  $\Omega$ , 60 A TO-220 - STP60NF06 Datasheet*, Geneva, Switzerland: STMicroelectronics, 2002.
- [61] CadSoft, "CadSoft EAGLE PCB Design Software," CadSoft, [Online]. Available: <http://www.cadsoftusa.com/eagle-pcb-design-software/product-overview/?language=en>. [Acedido em 16 09 2014].
- [62] WampServer, "WampServer, Windows web development environment," ALTER WAY, [Online]. Available: <http://www.wampserver.com/en/>. [Acedido em 15 10 2014].

## Referências

---

- [63] Microsoft, "Download Center - Microsoft .NET Framework 4," Microsoft, [Online]. Available: <http://www.microsoft.com/pt-pt/download/details.aspx?id=17851>. [Acedido em 15 10 2014].
- [64] S. Gabos, "Zebra\_Datepicker, a lightweight datepicker jQuery plugin," Stefan Gabos, [Online]. Available: <http://stefangabos.ro/jquery/zebra-datepicker/#download>. [Acedido em 18 10 2014].



## Referências

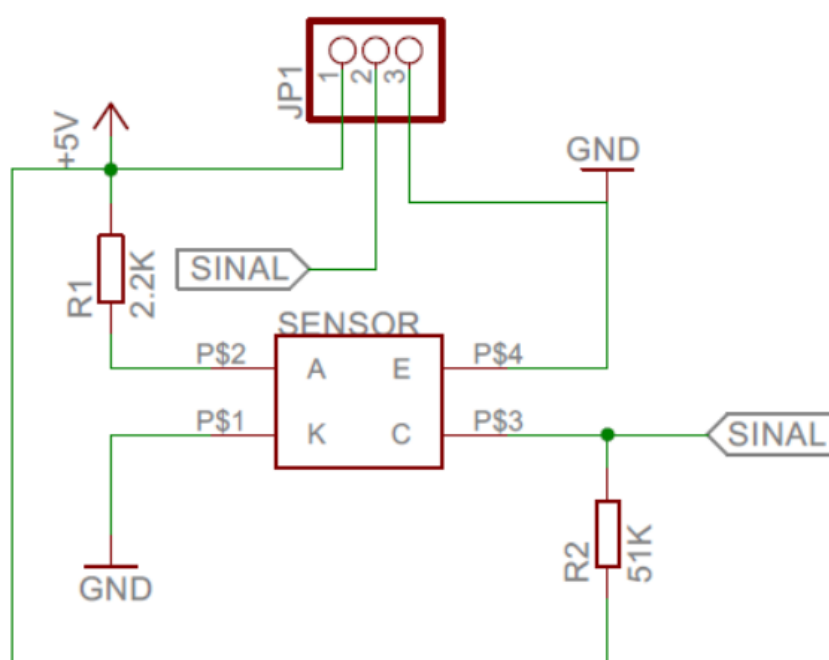
---

# Apêndices

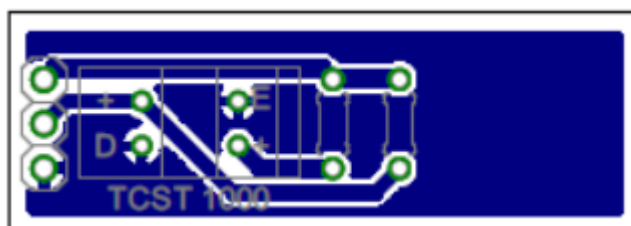
## Apêndice A

Neste apêndice encontra-se o esquemático e o *layout* da placa de circuito impresso desenvolvida no âmbito da monitorização do estado da válvula motorizada.

Esquemático:

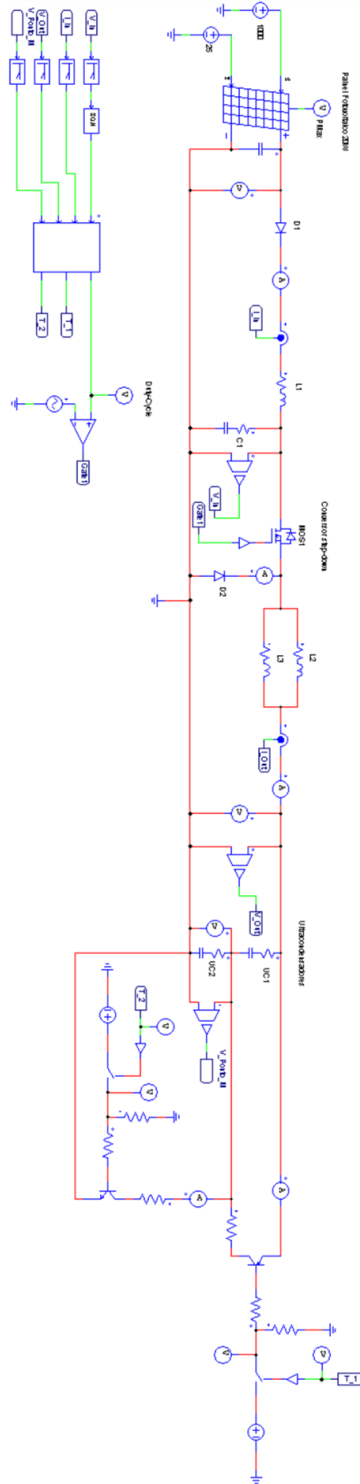


Layout:



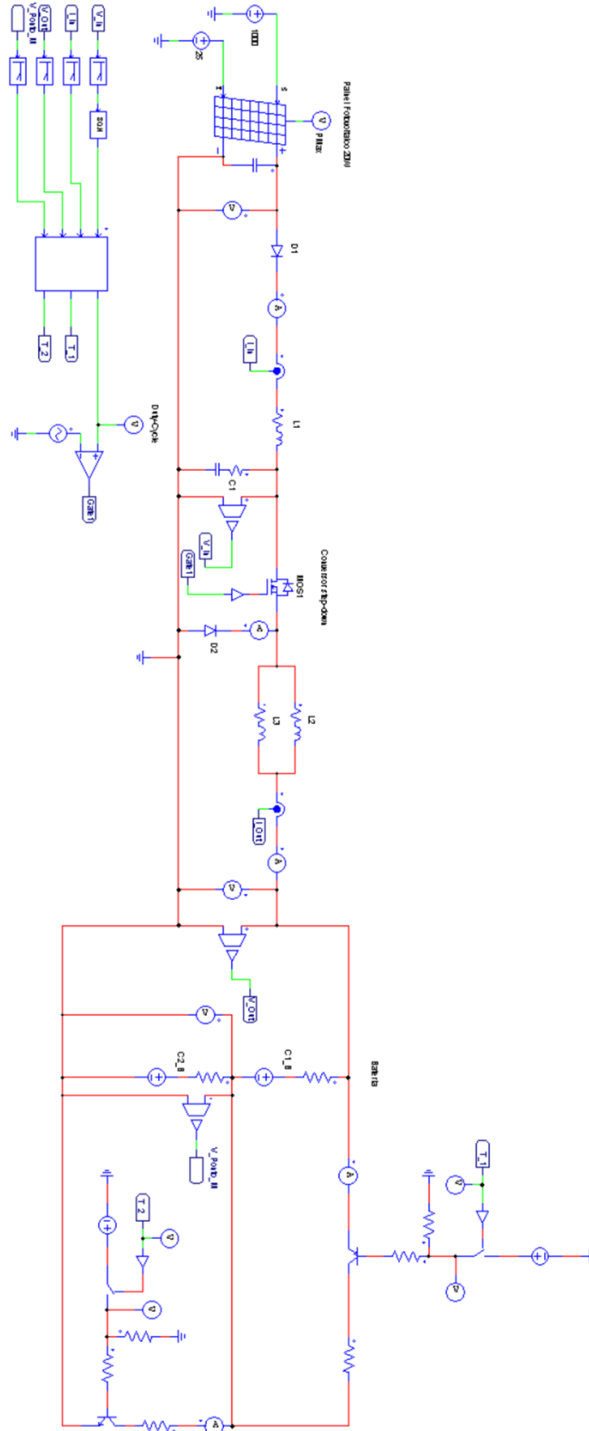
Apêndice B

Neste apêndice encontra-se o modelo simulado em *PSIM* para testar o carregamento e o balanceamento do módulo de ultracondensadores.



Apêndice C

Neste apêndice encontra-se o modelo simulado em *PSIM* para testar o carregamento e o balanceamento da bateria.



## Apêndice D

Neste apêndice encontra-se o código desenvolvido em linguagem C usado para simular em *PSIM* o carregamento e o balanceamento do módulo de ultracondensadores.

```
//Declaração de variáveis
float tensao_painel = 0.0;
float corrente_painel = 0.0;
float m = 0.0;
float delta_m = 0.4;
float delta_corrente = 0.0;
float corrente_painel_anterior = 0.0;
float delta_tensao = 0.0;
float tensao_painel_anterior = 0.0;
float tensao_total = 0.0;
float tensao_celula_2 = 0.0;
float tensao_celula_1 = 0.0;
int carregamento = 0;
int discharge_state = 0;
int T_1 = 1;
int T_2 = 0;

//Código desenvolvido
tensao_painel = in[0];
corrente_painel = in[1];
tensao_total = in[2];
tensao_celula_2 = in[3];

//Balanceador dos sistemas de armazenamento
tensao_celula_1 = tensao_total - tensao_celula_2;
if (((tensao_celula_1 >= 2.6) || (tensao_celula_2 >= 2.6)) && (discharge_state == 0))
{
    if (tensao_celula_1 > tensao_celula_2)
    {
        discharge_state = 1;
    }
    else
    {
        discharge_state = 2;
    }
}

if(discharge_state != 0)
{
    if (carregamento == 1)
    {
        m = 0;
        out[0] = m;
        carregamento = 0;
    }

    if(discharge_state == 1) //Descarregar célula de cima.
    {
        T_1 = 0;
        T_2 = 0;
        if(tensao_celula_1 <= tensao_celula_2)
        {
            T_1 = 1;
            discharge_state = 0;
        }
    }
    else //Descarregar célula de baixo.
    {
        T_1 = 1;
        T_2 = 1;
    }
}
```



```
        }  
    }  
    tensao_painel_anterior = tensao_painel;  
    corrente_painel_anterior = corrente_painel;  
    out[0] = m;  
}
```

## Apêndice E

Neste apêndice encontra-se o código desenvolvido em linguagem C usado para simular em *PSIM* o carregamento e o balanceamento da bateria.

```
//Declaração de variáveis
float tensao_painel = 0.0;
float corrente_painel = 0.0;
float m = 0.0;
float power = 10.0;
float Kp = 2.5;
float Kih = 0.020; // h = 0.001 Ki = 20 Kih = Ki * h
float Erro = 0.00;
float Integral = 0.0;
float tensao_total = 0.0;
float tensao_celula_2 = 0.0;
float tensao_celula_1 = 0.0;
int carregamento = 1;
int discharge_state = 0;
int T_1 = 1;
int T_2 = 0;
//Código desenvolvido
tensao_painel = in[0];
corrente_painel = in[1];
tensao_total = in[2];
tensao_celula_2 = in[3];

//Balanceador dos sistemas de armazenamento
tensao_celula_1 = tensao_total - tensao_celula_2;

if (((tensao_celula_1 >= 4.2) || (tensao_celula_2 >= 4.2)) && (discharge_state == 0))
{
    if (tensao_celula_1 > tensao_celula_2)
    {
        discharge_state = 1;
    }
    else
    {
        discharge_state = 2;
    }
}

if(discharge_state != 0)
{
    if (carregamento == 1)
    {
        m = 0;
        out[0] = m;
        carregamento = 0;
    }

    if(discharge_state == 1) //Descarregar célula de cima.
    {
        T_1 = 0;
        T_2 = 0;
        if(tensao_celula_1 <= tensao_celula_2)
        {
            T_1 = 1;
            discharge_state = 0;
        }
    }
    else //Descarregar célula de baixo.
    {
        T_1 = 1;
        T_2 = 1;
    }
}
```

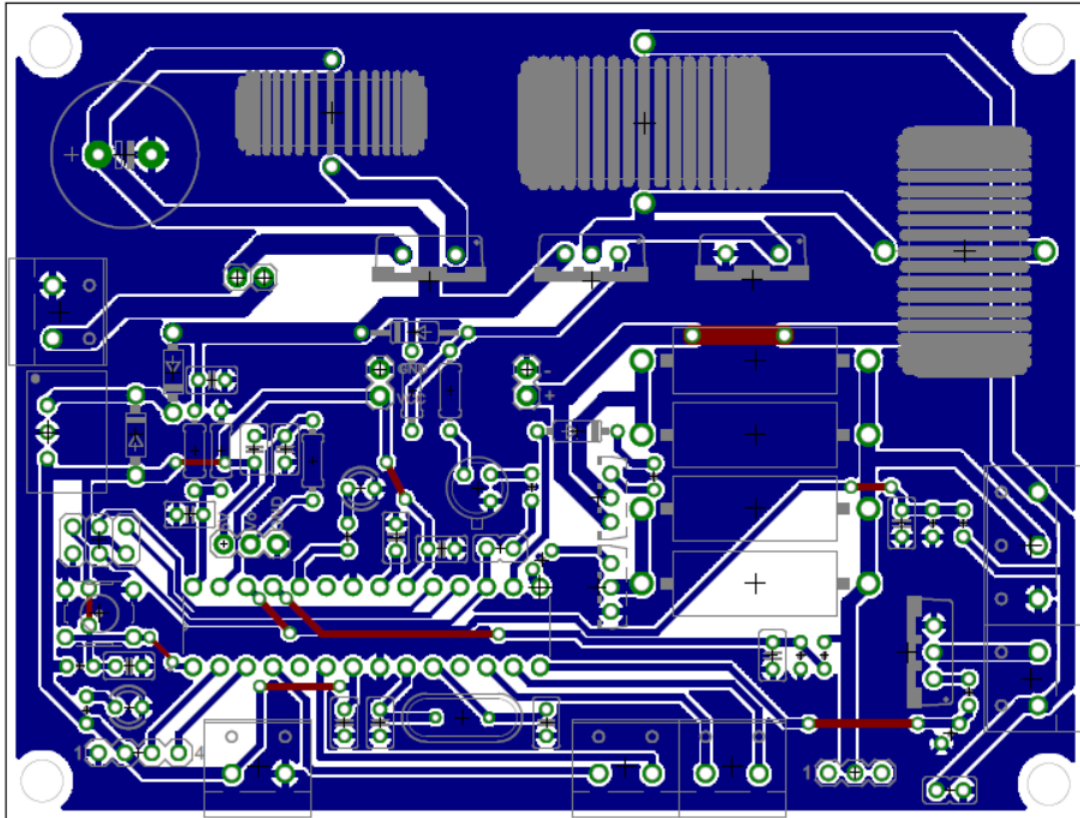


```
        if(tensao_celula_2 <= tensao_celula_1)
        {
            T_2 = 0;
            discharge_state = 0;
        }
    }
}
else
{
    if(carregamento == 0)
    {
        carregamento = 1;
    }
}

out[1] = T_1;
out[2] = T_2;
//Algoritmo PI que permite carregar a bateria
if(carregamento == 1)
{
    Erro = (power - (corrente_painel * tensao_painel));
    m= (Erro* Kp) + (Kih*Integral);
    if( m > 100)
    {
        m = 100;
    }
    else if(m < 0)
    {
        m = 0;
    }
    else
    {
        Integral += Erro;
    }
    out[0] = m;
}
}
```



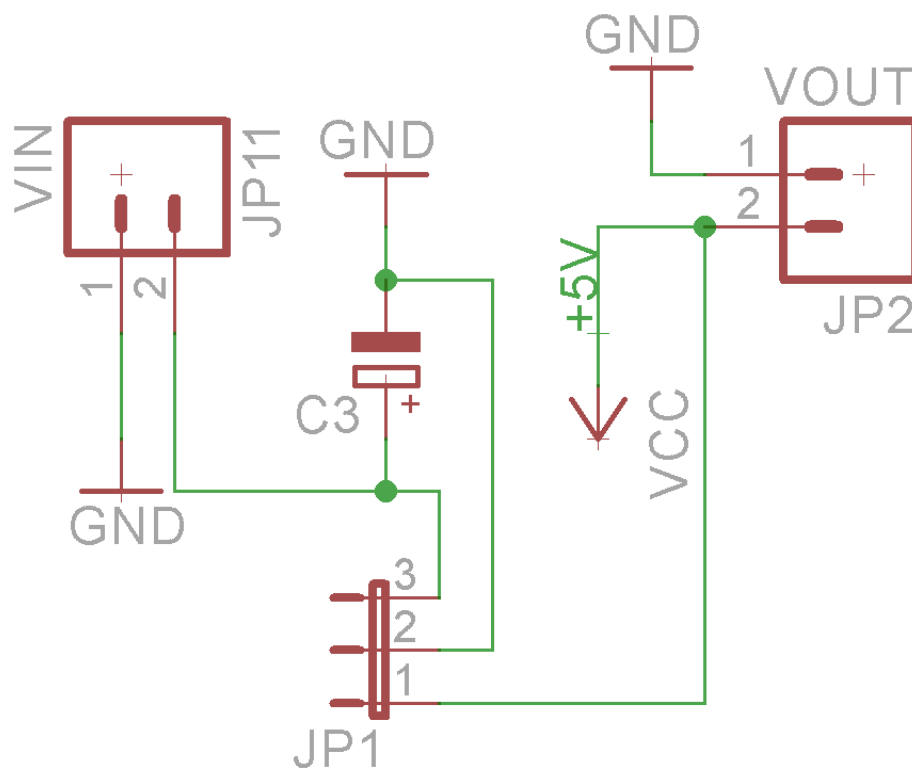
*Layout:*



**Apêndice G**

Neste apêndice encontra-se o esquemático e o *layout* da placa de circuito impresso desenvolvida para permitir alimentar o sistema de controlo a partir do módulo de ultracondensadores.

Esquemático:



*Layout:*

