

Trabalho Final

Sistema de Gestão de Rega com uma Rede de Sensores sem Fios

PROJETO DE MESTRADO

Sérgio Duarte Ferreira Pestana

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES
E REDES DE ENERGIA



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

fevereiro | 2015

T/14
62
PES SIS
+ ED-R

Sistema de Gestão de Rega com uma Rede de Sensores sem Fios

PROJETO DE MESTRADO

UNIVERSIDADE DA MADEIRA
BIBLIOTECA

Sérgio Duarte Ferreira Pestana

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES
E REDES DE ENERGIA

ORIENTAÇÃO
Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

Sistema de Gestão de Rega com uma Rede de Sensores sem Fios

Sérgio Duarte Ferreira Pestana

Dissertação realizada sob a supervisão do

Professor Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

Professor Auxiliar do

Centro de Competência de Ciências Exatas e da Engenharia da

Universidade da Madeira

À minha mãe, irmãos e namorada

“ No meio de qualquer dificuldade encontra-se a oportunidade”

Albert Einstein

Resumo

Este projeto descreve a criação de um sistema de gestão de rega aplicado à agricultura, baseado numa rede de sensores sem fios (RSSF), e apresenta a implementação de um sistema para captação de energia, nomeadamente, um gerador hídrico segundo os modelos de pás do tipo hélice, para além da utilização de painéis solares.

O sistema de gestão de rega consiste num protótipo de monitorização que permite o controlo dos atuadores (válvulas), de modo a ligar e desligar os canais de rega conectados a um reservatório de água, com base na informação monitorizada pelos nós sensores do solo. Assim, o sistema desenvolvido otimiza a quantidade de água aplicada ao cultivo, oferecendo as condições ideais para o correto desenvolvimento dos mesmos.

Inicialmente realizou-se um estudo sobre os tipos de sensores utilizados no setor agricultura. Posteriormente verificou-se o funcionamento das RSSF, baseado no protocolo *ZigBee*, de modo a compreender o envio dos dados dos nós sensores para a estação base.

A otimização do consumo energético das RSSF foi outro dos desafios tidos em consideração neste projeto, uma vez que, atualmente, a alimentação dos nós sensores em ambientes exteriores, na sua maioria, é realizada por baterias, o que limita o nível de longevidade do sistema. Desta forma, foi necessário desenvolver um sistema que possibilite a captação da energia gerada pelo meio envolvente (ex. energia hídrica, e solar), capaz de prolongar a longevidade dos nós sensores a nível energético.

O sistema desenvolvido contém uma estação meteorológica alimentada por um painel solar fotovoltaico, dois nós sensores de monitorização dos parâmetros do solo, também alimentados por painéis solares fotovoltaicos, um nó atuador alimentado por um gerador hídrico e uma aplicação *web* para a visualização dos dados em tempo real.

O protótipo referido foi instalado em ambiente exterior, com características semelhantes às de interesse, de modo a ter em consideração os efeitos do ambiente no sistema, nomeadamente, a proteção do equipamento em situações de ocorrência de intempéries.

Palavras-Chave: Captação de energia, Energia Fotovoltaica, Energia Hídrica, Monitorização Agrícola, Rede de Sensores Sem Fios (RSSF), *ZigBee*.

Abstract

This project describes the creation of an irrigation management system applied to agriculture, based on a wireless sensor network (WSN) and presents the implementation and design of a system for energy capture, namely, a hydro generator according to the turbine models of type propeller, in addition of the use of solar panels.

The irrigation management system consists of a monitoring prototype that allows the control of the actuators (valves) in order to turn on and off the irrigation channels connected to a water reservoir, based on the information read by monitoring sensors of soil parameters. Thus, the developed system optimizes the amount of water applied to the crops providing the ideal conditions for the proper development of crops.

Initially it was carried out a study about the types of sensors used in the agricultural sector. Subsequently, it was verified the operation of WSN based on the ZigBee protocol, in order to understand the sending of data from the sensor nodes to the base station.

The optimization of energy consumption of WSN was another challenge taken into consideration in this project, since, currently the power of sensor nodes in outdoor environments, in most cases, is accomplished by batteries which limits the longevity of the system level. Thus, it was necessary develop a system that enables the capture energy generated by the surrounding environment (eg. hydro and solar energy) able to prolong the longevity of the sensor nodes at energy level.

The developed system contains a meteorological station powered by a photovoltaic solar panel, two sensors nodes monitoring of soil parameters, also powered by solar panels, one actuator node powered by a hydro generator and a web application for data visualization in time real.

The prototype referred was installed in outdoor environment, with similar characteristics of interest in order to take into account the environmental effects on the system, namely, the equipment protection in situations of occurrence to inclement weather.

Keywords: Energy Harvesting, Photovoltaic Energy, Hydro Energy, agriculture monitoring, Wireless Sensor Network (WSN), Zigbee.

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador, Professor Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo por todo o apoio, pela confiança científica, pelas críticas, sugestões, assistência na resolução dos problemas, pelo constante acompanhamento, nas ideias estratégicas, na paciência e no empenho ao longo deste projeto.

À minha família, particularmente à minha mãe e irmãos por todo o apoio, carinho e sacrifícios efetuados para eu chegar até aqui.

Um agradecimento especial para à minha namorada, Cláudia Camacho, pelo companheirismo e apoio nos momentos difíceis, pela paciência incansável e incentivo.

O meu sincero agradecimento à Doutora Maria Gabriela Oliveira por todo o auxílio, confiança e sentido de responsabilidade que depositou em mim no decorrer da minha vida académica.

Ao Eng. Filipe Santos por todo o apoio, experiência, amizade e conhecimento partilhados, no decorrer deste projeto.

Agradeço também a todos os meus amigos e colegas que tive a oportunidade de conhecer e trabalhar ao longo destes anos, em especial ao João Castro, Nuno Carreira e Victor Azevedo pela amizade, apoio, cumplicidade e pelos momentos divertidos que passamos juntos.

Índice

Resumo	vii
Abstract.....	ix
Agradecimentos.....	xi
Lista de Acrónimos.....	xxi
1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura do trabalho	2
2. Irrigação na Agricultura e redes de sensores	5
2.1. Agricultura de Precisão	5
2.1.1. Métodos de Irrigação	6
2.1.2. Evapotranspiração de referência	7
2.1.3. Coeficiente de Cultivo	8
2.2. Tecnologias sem fios.....	12
2.2.1. Norma IEEE 802.15.4.....	12
2.2.1.1. Camada física (PHY).....	13
2.2.1.2. Camada de acesso ao meio (MAC)	14
2.2.1.3. Classes de dispositivos	16
2.2.2. Protocolo <i>ZigBee</i>	16
2.2.2.1. Arquitetura da rede	17
2.2.2.2. Topologia da rede	18
2.3. Captação de energia	19
2.3.1. Energia Solar.....	19
2.3.2. Energia Hídrica	20
2.4. Aplicações existentes	22
2.4.1. Camalie Networks.....	22
2.4.2. Ranch Systems	23
2.4.3. Rain Bird ClimateMinder	25
2.4.4. SensorCloud.....	26
2.4.5. i-Farm.....	28
2.4.6. Projeto Apollo.....	29

2.4.7. Análise das aplicações	29
3. Dispositivos da rede.....	31
3.1. Dispositivos de uma RSSF.....	31
3.2. Plataforma de processamento e dispositivo de comunicação	31
3.2.1. Arduino fio.....	32
3.2.2. XBee Serie 2 (XB24-Z7WIT).....	32
3.2.3. Antenas	34
3.2.3.1. Antena monopolo.....	34
3.2.3.2. Antena Grelha.....	34
3.2.4. Fonte de energia	35
3.2.4.1. Baterias	35
3.2.4.2. Painel Solar	36
3.2.4.3. Modelo de carregamento de baterias ON-OFF.....	37
3.3. Sensores e Atuadores	38
3.3.1. Sensores	38
3.3.1.1. Sensor de temperatura e humidade relativa	38
3.3.1.2. Anemómetro	40
3.3.1.3. Piranómetro.....	41
3.3.1.4. Pluviómetro.....	42
3.3.1.5. Sensor de humidade da folha.....	43
3.3.1.6. Sensor de humidade do solo	44
3.3.1.7. Sensor de temperatura do solo.....	44
3.3.1.8. Sensor de humidade <i>Watermark</i>	45
3.3.1.9. Sensor de Corrente MAX9929F	46
3.3.2. Atuadores	47
3.3.2.1. Válvula principal	47
3.3.2.2. Válvula de controlo de rega	48
3.4. Características dos cultivos seleccionados	48
3.4.1. Bananeira	48
3.4.1.1. Clima.....	49
3.4.1.2. Solo	49
3.4.1.3. Irrigação.....	50
3.4.2. Morangueiro (<i>Fragaria vesca</i>).....	50

3.4.2.1.	Clima.....	51
3.4.2.2.	Solo	52
3.4.2.3.	Irrigação	52
4.	Implementação do Sistema	53
4.1.	Requisitos do sistema de irrigação.....	53
4.2.	Arquitetura do sistema	54
4.2.1.	Alimentação da rede <i>Zigbee</i>	55
4.3.	Estação Meteorológica.....	55
4.3.1.	Calibração dos sensores	56
4.3.1.1.	Calibração do anemómetro 7911 da <i>Davis Instruments</i>	56
4.3.1.2.	Calibração do pluviómetro 7852 da <i>Davis Instruments</i>	57
4.3.1.3.	Calibração do piranómetro 6450 da <i>Davis Instruments</i>	57
4.3.1.4.	Calibração do Sensor de temperatura e humidade relativa (SHT11)	57
4.3.2.	Consumo da estação meteorológica.....	57
4.3.3.	Arquitetura da estação meteorológica.....	59
4.3.4.	Circuito interno da estação meteorológica.....	61
4.3.5.	Construção do nó sensor	61
4.3.6.	Programação do nó sensor	63
4.4.	Nó atuador.....	64
4.4.1.	Arquitetura do nó atuador	65
4.4.2.	Consumo do nó atuador	67
4.4.3.	Circuito interno do nó atuador	68
4.4.4.	Construção do nó atuador	68
4.4.5.	Programação do nó atuador	69
4.5.	Gerador Hídrico	70
4.5.1.	Geradores trifásicos	70
4.5.2.	Construção do gerador hídrico.....	72
4.5.3.	Testes do gerador hídrico.....	75
4.6.	Nó sensor para monitorização dos parâmetros do solo.....	77
4.6.1.	Calibração dos sensores do solo	77
4.6.2.	Arquitetura do nó sensor do solo	78
4.6.3.	Consumo do nó sensor	78
4.6.4.	Circuito interno do nó sensor.....	79

4.6.5. Construção do nó sensor do solo	79
4.6.6. Programação do nó sensor	80
4.7. Rede de comunicação.....	81
4.7.1. Configuração dos módulos XBee	81
4.8. Base de dados e Aplicação <i>web</i>	84
5. Testes e Resultados.....	87
5.1. Localização do Sistema.....	87
5.2. Modelo de carregamento ON-OFF	88
5.3. Estação meteorológica	90
5.4. Nó sensor do solo.....	92
5.5. Sistema de irrigação	94
5.5.1. Gerador Hídrico	94
5.5.2. Sensor de deteção de água	96
5.5.3. Sensores do solo.....	96
5.6. Estado da rede	97
6. Conclusões e trabalhos futuros	99
6.1. Conclusão.....	99
6.2. Trabalhos futuros	100
Referências	101
Anexo A - Circuito de carregamento do nó <i>router</i>	107
Anexo B - Calibração da velocidade do vento	108
Anexo C - Comparação dos valores obtidos entre o sensor de temperatura <i>Center 315</i> com o SHT11.....	113
Anexo D - Potência produzida por dois painéis ligados em série sem controlo de carga (modelo ON-OFF).	114
Anexo E - Circuitos desenhados no <i>Ultiboard 12</i> referentes à construção do sistema de irrigação.	115
Anexo F - Testes do gerador hídrico como modelo de pás do tipo hélice.	118
Anexo G - Análise financeira dos componentes do protótipo.....	120
Anexo H - Código implementado no Arduino Fio.....	124

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Percentagem do consumo de água por setor a nível global [2].	5
Figura 2.2 - Evapotranspiração de referência [8].	8
Figura 2.3 - Coeficiente de cultivo durante as várias fases do desenvolvimento do cultivo [9].	9
Figura 2.4 - Pilha protocolar do padrão IEEE 802.15.4 [10].	12
Figura 2.5 - Espectro utilizado pelas Bandas ISM [11].	14
Figura 2.6 - Estrutura da supertrama [11].	15
Figura 2.7 - Arquitetura de uma RSSF [14].	18
Figura 2.8 - Principais topologias: a) estrela, b) árvore e c) malha [14].	19
Figura 2.9 - Modelo simples de uma célula fotovoltaica [15].	19
Figura 2.10 - Ponto de máxima potência do painel solar.	20
Figura 2.11 - Tabela gráfica que indica a relação entre os três parâmetros para cada tipo de turbina.	21
Figura 2.12 - Turbina em Hélice.	22
Figura 2.13 - <i>Software</i> fornecido pela empresa <i>Crossbow</i> [19].	23
Figura 2.14 - Nós sensores: a) RS100 e b) RS200 [21].	24
Figura 2.15 - Estação base RM210 [21].	24
Figura 2.16 - Aplicação <i>web</i> disponibilizada pela empresa <i>Ranch Systems</i> [21].	25
Figura 2.17 - Nó sensor <i>Rain Bird ClimateMinder</i> [22].	26
Figura 2.18 - <i>Software ClimateMinder</i> [22].	26
Figura 2.19 - Nó sensor do sistema <i>SensorCloud</i> [23].	27
Figura 2.20 - Interface disponibilizada pela <i>SensorCloud</i> [23].	27
Figura 2.21 - Interface <i>web</i> do sistema <i>i-Farm</i> [25].	28
Figura 2.22 - Interior de uma unidade das sete unidades presentes na estufa [27].	29
Figura 3.1 - Arquitetura do nó sensor.	31
Figura 3.2 - Arduino fio: a) parte superior e b) parte inferior [28].	32
Figura 3.3 - Módulos XBee: a) antena <i>whip</i> b) antena <i>chip</i> e c) conector RPSMA.	33
Figura 3.4 - Estrutura da trama no modo de operação API [29].	34
Figura 3.5 - Antena monopolo.	34
Figura 3.6 - Antena grelha.	35
Figura 3.7 - Bateria recarregável <i>Energizer</i> do tipo AA.	35
Figura 3.8 - Curva característica da descarga da bateria <i>Energizer</i> [31].	35
Figura 3.9 - Painel <i>BP SOLAR MSX-005F</i> de 0,5 W.	36
Figura 3.10 - Curvas características do painel solar <i>MSX-005F</i> de 0,5 W: Curva I/V e b) Curva P/V.	36
Figura 3.11 - Diagrama de Blocos do modelo de carregamento ON-OFF.	37
Figura 3.12 - <i>Omeron latching relay G6-JU-2FS-Y</i> : a) relé e b) circuito interno [33].	37
Figura 3.13 - Sensor SHT11 da <i>Sensirion</i> [34].	38
Figura 3.14 - Gama de valores do SHT11: a) RH-tolerância máxima a 25 ° C no sensor de humidade e b) T tolerância máxima no sensor de temperatura [34].	39
Figura 3.15 - Ligação física do sensor SHT11 com o microcontrolador [34].	39
Figura 3.16 - Anemómetro 7911 da <i>Davis Instruments</i> [36].	40
Figura 3.17 - Circuito de condicionamento do anemómetro [36].	41

Figura 3.18 - Piranómetro: a) sensor 6450 da <i>Davis Instruments</i> e b) resposta em função do ângulo de incidência [37].	41
Figura 3.19 - Esquema de ligações do sensor 6450 [37].	42
Figura 3.20 - Sensor 7852 da <i>Davis Instruments</i> (pluviómetro).	42
Figura 3.21 - Circuito de condicionamento do pluviómetro [39].	43
Figura 3.22 - Sensor de humidade da folha [40].	43
Figura 3.23 - Conector <i>jack</i> macho de 2,5 mm.	44
Figura 3.24 - Sensor de humidade do solo <i>Waterscout</i> [41].	44
Figura 3.25 - Sensor de temperatura do solo termístor NTCASCWE3.	45
Figura 3.26 - Sensor de humidade <i>Watermark</i> .	45
Figura 3.27 - Circuito de dimensionamento do sensor <i>Watermark</i> .	46
Figura 3.28 - Sensor de corrente MAX9929F: a) imagem do sensor e b) circuito de operação.	47
Figura 3.29 - Eletroválvula principal J3-L55.	47
Figura 3.30 - Eletroválvula <i>Rain Bird DV-075</i> .	48
Figura 3.31 - Bananeira.	49
Figura 3.32 - Métodos de irrigação: a) Microaspersão e b) rega gota-a-gota.	50
Figura 3.33 - Morangueiro.	51
Figura 4.1 - Arquitetura do sistema.	54
Figura 4.2 - Túnel de vento.	56
Figura 4.3 - Arquitetura da estação meteorológica.	60
Figura 4.4 - Circuito do sensor de corrente.	60
Figura 4.5 - Circuito elétrico da estação meteorológica.	61
Figura 4.6 - Nó sensor: a) Sensores e Arduino na placa e b) Equipamento no interior de uma caixa com IP65.	62
Figura 4.7 - Estação meteorológica.	63
Figura 4.8 - Fluxograma do código implementado no Arduino referente à estação	64
Figura 4.9 - Arquitetura do nó atuador.	65
Figura 4.10 - Relé NEC EP2-3N1S: a) relé e b) circuito interno [58].	65
Figura 4.11 - Circuito para ativar a válvula.	66
Figura 4.12 - Circuito do sensor de deteção de água.	66
Figura 4.13 - Circuito elétrico do nó atuador.	68
Figura 4.14 - Nó atuador: a) perspetiva interior e b) perspetiva exterior	68
Figura 4.15 - Fluxograma do código implementado no Arduino referente ao nó atuador.	69
Figura 4.16 - Ondas sinusoidais geradas por um sistema trifásico [58].	71
Figura 4.17 - Ligação das bobinas em triângulo (ou delta) [60].	72
Figura 4.18 - Retificador trifásico de onda completa [61].	72
Figura 4.19 - Bobinas: a) Bobinas construídas e b) distribuição das bobinas em triângulo (estator).	73
Figura 4.20 - Gerador hídrico: a) Perfil interior e b) ondas produzidas pelo gerador desfasadas de 120°.	74
Figura 4.21 - Retificador: a) circuito de retificação e b) onda após retificação trifásica	74
Figura 4.22 - Turbina em hélice de quatro lâminas: a) vista frontal e b) vista superior.	75
Figura 4.23 - Gerador hídrico construído.	75

Figura 4.24 - Potência em função da resistência de carga.....	76
Figura 4.25 - Diagrama de blocos referente ao protótipo do gerador.....	76
Figura 4.26 - Arquitetura do nó atuador.....	78
Figura 4.27 - Circuito elétrico do nó atuador.....	79
Figura 4.28 - Nó sensor do solo: a) perspectiva interior e b) perspectiva exterior.....	80
Figura 4.29 - Fluxograma do código implementado no Arduino referente ao nó sensor do solo.....	81
Figura 4.30 - Janela principal do programa X-CTU.....	82
Figura 4.31 - Configuração do módulo XBee: a) Cordenador e b) nó sensor.....	83
Figura 4.32 - Nós presentes na rede.....	83
Figura 4.33 - Diagrama de fluxo dos dados.....	84
Figura 4.34 - Interface da página <i>web</i> do sistema de irrigação.....	85
Figura 5.1 - Posição geográfica do sistema de irrigação: a) perfil aéreo e b) perfil local.....	88
Figura 5.2 - Corrente produzida pelo painel solar num dia com pouca intensidade solar.....	88
Figura 5.3 - Comportamento das baterias ao longo de um dia da estação meteorológica.....	89
Figura 5.4 - Índice de radiação solar ao longo de 10 dias durante o inverno.....	89
Figura 5.5 - Produção do painel ao longo de 10 dias durante o inverno.....	90
Figura 5.6 - Comportamento das baterias ao longo de 10 dias durante o inverno.....	90
Figura 5.7 - Valores da velocidade do vento.....	91
Figura 5.8 - Comparação dos valores da temperatura do ar.....	91
Figura 5.9 - Comparação dos valores da humidade relativa do ar.....	91
Figura 5.10 - Comparação dos valores da velocidade do vento.....	92
Figura 5.11 - Valores da humidade do solo do cultivo dos morangueiros.....	92
Figura 5.12 - Valores da medição do teor de água presente no solo do cultivo dos morangueiros.....	93
Figura 5.13 - Valores da temperatura do solo do cultivo dos morangueiros.....	93
Figura 5.14 - Valores da humidade da folhagem do cultivo dos morangueiros.....	93
Figura 5.15 - Corrente máxima produzida pelo gerador.....	95
Figura 5.16 - Resultados do teste do gerador hídrico: a) corrente fornecida ao nó atuador e b) comportamento da tensão das baterias do nó atuador.....	95
Figura 5.17 - Resultados do teste do sensor de deteção de água: a) <i>acknowledgement</i> restituído pela válvula e b) estado do sensor de deteção de água.....	96
Figura 5.18 - Resultados dos sensores do solo após uma irrigação: a) sensor de humidade do solo (<i>ECHO-10 Dielectric Aquameter</i>), b) sensor do teor de água no solo (<i>Watermark</i>), c) temperatura do solo e d) humidade da folhagem.....	97
Figura 5.19 - RSSI: a) estação meteorológica, b) <i>router</i> , c) nó das bananeiras e d) nó atuador.....	98
Figura 5.20 - RSSI do nó sensor dos morangueiros.....	98

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores do coeficiente de cultivo K_c e alturas máximas das plantas para um cultivo sem <i>stress</i> hídrico, considerando uma rega bem gerida. A humidade relativa considerada é de aproximadamente 45% e a velocidade do vento a 2 m de altura é de 2 m.s^{-1} [5][6].	10
Tabela 2.2 - Valores comuns da fração f_h humedecida pelo sistema de rega ou chuva [5][6].	11
Tabela 2.3 - Frequências livres das bandas ISM com respetivos números de canais e taxas de bits [11].	13
Tabela 2.4 - Características dos nós <i>eKo Pro Series</i> , EN2100 e EN2120 [20].	23
Tabela 2.5 - Vantagens e limitações da cada aplicação.	30
Tabela 3.1 - Tensões limite para os vários tipos de solo numa cultura de morangos [53].	52
Tabela 4.1 - Valores referentes ao consumo de cada componente da estação meteorológica.	58
Tabela 4.2 - Valores referentes ao consumo de cada componente do nó atuador.	67
Tabela 4.3 - Valores referentes ao consumo de cada componente do nó sensor do solo.	78

Lista de Acrónimos

AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
AT	<i>Transparent mode</i>
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
CAP	<i>Contension Access Period</i>
CCA	<i>Clear Channel Assesment</i>
CCTV	<i>Closed-Circuit Television</i>
CFP	<i>Contension Free Period</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Sprend Spectrum</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slot</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IPMA	<i>Instituto Português do Mar e Atmosfera</i>
ISM	<i>Industrial Scientifical and Medical</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LQ	<i>Link Quality</i>
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NiMH-HR6	<i>Nickel-Metal Hydride</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>

O-QPSK	<i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PAN ID	<i>Personal Area Network identifier</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
PV	Painel Solar Fotovoltaico
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	Região Autónoma da Madeira
RFD	<i>Reduce Function Device</i>
RSF	Rede Sem Fios
RSSI	<i>Received Signal Strenght Indicator</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fios
SAP	<i>Service Access Point</i>
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UV	Ultravioleta
VWC	<i>Volumetric Water Content</i>
WSDA	<i>Wireless Sensor Data Aggregator</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>
ZDO	<i>ZigBee Device Object</i>

1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas as principais motivações na concretização deste projeto, os objetivos a alcançar no âmbito da proposta apresentada e a estrutura que será desenvolvida ao longo deste trabalho.

Nos últimos anos, as condições climáticas, modificadas pelo aquecimento global e pelo consumo de água exigido pelas atividades humanas, têm vindo a alertar as autoridades internacionais no abastecimento de água potável, visto que muitas regiões têm grandes dificuldades de encontrar água potável em quantidade suficiente para atender às suas necessidades, principalmente, no setor agrícola.

Na área de eletrónica, as redes de sensores sem fios (RSSF) introduzem novas possibilidades de interação com o meio físico, permitindo uma melhor monitorização e controlo dos inventos de interesse. Na atualidade, o custo de implementação de uma rede de sensores para fins de monitorização requer um investimento elevado, uma vez que a rede necessita de uma infraestrutura complexa. Porém, com o desenvolvimento tecnológico na área das RSSF, é possível construir uma rede de monitorização com baixa potência de consumo, baixas taxas de transmissão, baixa complexidade de implementação e baixo custo. Nesse sentido, esta diversificação de fatores contribui para o desenvolvimento de novas RSSF, que permitem uma interação em tempo real com o meio físico, com a possibilidade de conexão à internet.

Este projeto visa a implementação de um protótipo de um sistema de gestão de rega aplicado à agricultura, baseado numa RSSF com utilização do protocolo de comunicação *ZigBee*.

O sistema de gestão de rega desenvolvido será instalado em ambiente exterior e tem por solução a poupança do consumo de água no setor agrícola e oferece as condições ideais para o correto desenvolvimento dos cultivos.

1.1. Motivação

Nas últimas décadas o consumo de água potável a nível mundial tem sofrido um aumento significativo, sendo que uma grande proporção deriva da agricultura.

Segundo o Relatório da Agência Europeia do Ambiente, o setor agrícola detém de uma percentagem de consumo de água potável em torno dos 70%.

Na Região Autónoma da Madeira (RAM), uma parte considerável da água também tem esse objetivo. Com isto, a gestão dos recursos hídricos torna-se cada vez mais fundamental para uma produção agrícola sustentável, minimizando assim o impacto da utilização da água neste setor.

Este projeto pretende realizar um sistema de gestão de rega, por uma rede de sensores sem fios (RSSF), capaz de otimizar o consumo de água na agricultura e proporcionar as condições necessárias ao correto desenvolvimento do cultivo. Deste modo, o sistema irá monitorizar em tempo real os parâmetros ambientais de interesse do cultivo, e atuar os sistemas de rega de forma automática, para responder às necessidades fisiológicas dos cultivos.

Para tal, é necessário estudar as tecnologias mais apropriadas no sector agrícola e implementar uma RSSF autónoma a nível energético, que responda aos requisitos da aplicação.

1.2. Objetivos

As RSSF introduzem novas possibilidades de interação com o meio físico, permitindo uma melhor monitorização em tempo real dos eventos de interesse.

Nesse sentido, o primeiro objetivo deste trabalho consiste na realização de um estudo, com a finalidade de selecionar os sensores mais apropriados a utilizar no setor agrícola, para a monitorização dos respetivos cultivos, bem como o tipo de topologia de comunicação da RSSF.

A otimização do consumo energético das RSSF será outro dos objetivos a ser estudado, uma vez que, atualmente, a alimentação dos nós sensores em ambientes exteriores provém de baterias. Como as baterias possuem uma autonomia limitada, o que reduz o funcionamento de uma RSSF a nível energético. Logo, é necessário utilizar formas de alimentação que possibilitam a captação da energia gerada pelo meio envolvente, nomeadamente energia eólica, hídrica e/ou solar, aumentam assim a longevidade da rede a nível energético.

Posteriormente à realização do estudo, é objetivo implementar um protótipo de um sistema de monitorização através de uma RSSF, tendo em consideração o controlo dos atuadores de modo a atuar os canais de rega ligados a um reservatório de água. Também é objetivo deste trabalho a implementação de um sistema hídrico para a captação de energia.

Por último, os dados provenientes da RSSF deverão ser enviados para uma estação base, onde serão processados e disponibilizados numa aplicação *web*. A visualização dos dados será realizada por uma interface gráfica, com possibilidade de interação do utilizador na rede e de acesso *on-line*.

1.3. Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, onde será descrito o processo de construção e desenvolvimento do protótipo do sistema de irrigação.

O primeiro capítulo introduz ao leitor a contextualização sobre a agricultura de precisão, onde são expostas as necessidades fisiológicas dos cultivos. Neste capítulo também consta a ligação do protocolo de comunicação *Zigbee*, com o padrão 802.15.4, sendo descrita a arquitetura e a topologia da rede, assim como os componentes que constituem na íntegra uma RSSF. Por último, será efetuado um levantamento de alguns sistemas de gestão de rega que já foram desenvolvidos em diversos pontos do globo.

No que diz respeito ao segundo capítulo, este contextualiza a arquitetura do sistema de irrigação, nomeadamente os requisitos do sistema, os dispositivos que constituem o sistema e a seleção dos cultivos. Assim, é efetuada uma abordagem da

plataforma de processamento, dos dispositivos de comunicação e das tecnologias dos nós sensores utilizados no projeto.

A abordagem efetuada no terceiro capítulo, refere-se aos processos de desenvolvimento e construção do protótipo e do *software*, nomeadamente, a configuração da rede *ZigBee*, a organização e construção dos vários módulos que constituem o protótipo e as ferramentas de *software* utilizadas durante a realização deste trabalho.

O quarto capítulo expõe os testes e resultados alcançados ao longo deste trabalho após o funcionamento global do sistema.

O quinto e último capítulo contém as conclusões efetuadas durante e após a construção do sistema e as indicações de perspectivas futuras.

Por último, este trabalho engloba uma secção de anexos, onde constam informações relevantes na concretização do protótipo.

2. Irrigação na Agricultura e redes de sensores

No presente capítulo é efetuada uma introdução sobre a agricultura de precisão. Inicialmente são abordados os métodos de irrigação aplicados na agricultura, as necessidades dos cultivos e os sistemas de irrigação implementados.

De seguida, faz-se a contextualização das tecnologias sem fios existentes na atualidade, evidenciando a tecnologia *ZigBee*, uma vez que, esta será utilizada neste projeto. Neste ponto do trabalho, são indicadas as respetivas topologias de rede de sensores sem fios, a arquitetura da rede, os modelos de comunicação, as aplicações, as ferramentas utilizadas neste projeto e as tecnologias inovadoras,

Por último, são referidos alguns projetos no âmbito do tema do trabalho que foram e estão a ser desenvolvidos a nível nacional e internacional.

2.1. Agricultura de Precisão

O aquecimento global tem implicado fortes impactos ambientais, provocando condições climáticas adversas em alguns países, nomeadamente, o aumento da temperatura média bem como a escassez de água. Com isto, a atividade agrícola depara-se com um grande problema, a produtividade.

Recentemente, estudos efetuados revelaram que nas últimas décadas ocorreu um crescimento acentuado do consumo de água a nível mundial [1], sendo que uma percentagem importante desse consumo deriva da agricultura. Na figura 2.1 é possível observar uma previsão da percentagem de água utilizada por região nos diversos setores (agrícola, industrial e doméstico).

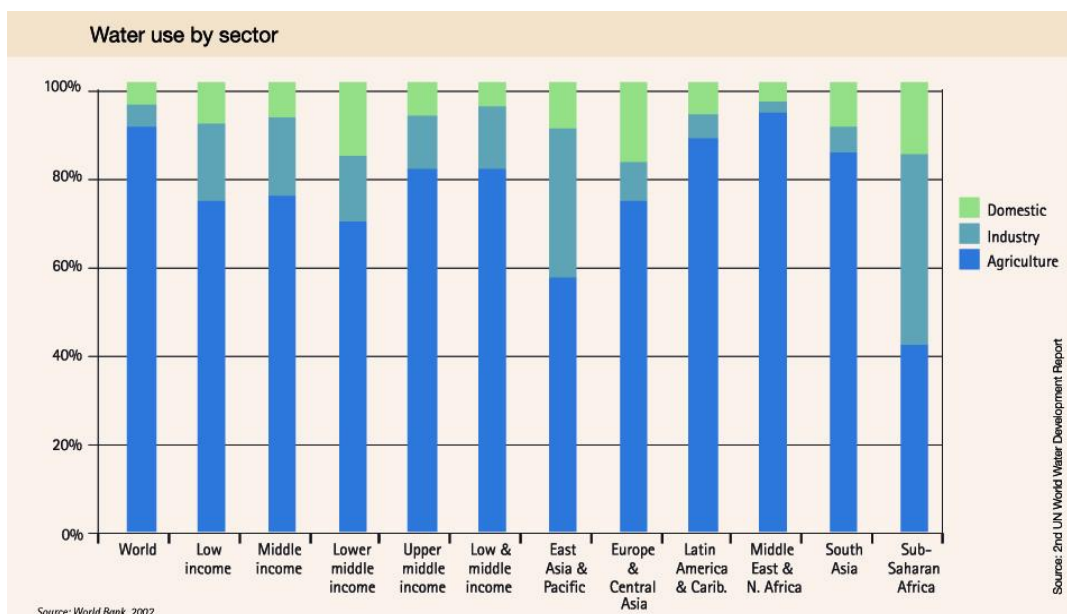


Figura 2.1 - Percentagem do consumo de água por setor a nível global [2].

A partir dos dados observados na figura 2.1 pode-se constatar que o setor da agricultura, em termos médios, detém uma percentagem de utilização de água superior aos 70%. Contudo, estima-se que parte da água utilizada na agricultura é desperdiçada

devido ao fenómeno da evapotranspiração (evaporação + transpiração). De modo a colmatar este problema, a agricultura de precisão traz uma nova solução para a gestão eficiente da água, possibilitando a rentabilização da produtividade agrícola [1][2].

A agricultura de precisão consiste na utilização de um sistema de equipamentos eletrónicos (sensores) capazes de monitorizar e avaliar as condições de uma parcela de terreno cultivado. Assim, os sistemas de rega são apenas ativados aquando das necessidades de água do cultivo, o que permite uma maior rentabilidade do consumo de água.

2.1.1. Métodos de Irrigação

A irrigação consiste no processo de fornecimento de água de forma controlada a um determinado cultivo, sendo uma técnica muito utilizada na agricultura. Deste modo, a irrigação em simultâneo com a precipitação natural possibilitam o desenvolvimento do cultivo.

Atualmente, existem diversos sistemas de irrigação, nomeadamente:

- Gota-a-gota: este sistema permite uma rega seletiva, onde distribui uniformemente a água de rega de modo a evitar a heterogeneidade no crescimento e desenvolvimento do cultivo. O sistema tem uma eficiência acima dos 90%, uma vez que as perdas de água por evaporação são minimizadas através do posicionamento do gotejador no solo. O posicionamento correto do gotejador no solo reduz a área molhada ou a área de evaporação de água [3][4].
- Aspersão: permite uma rega por pulverização em pequenas gotículas de água análoga à chuva, sendo a água distribuída ao cultivo por meio de tubagem e sob pressão. A irrigação por aspersão apresenta uma eficiência entre 60 e 75%, para sistemas de baixa e média pressão [3][4].
- Microaspersão: trata-se de um sistema de rega localizada, onde a água é borrifada através de microaspersores próximos do cultivo. Este sistema é muito semelhante ao anterior, mas com uma maior eficiência (próximo de 90%) [3][4].
- Pivô central: este sistema faz uso de uma estrutura suspensa (torres metálicas triangulares montadas sobre rodas), que no seu centro possui uma tomada central de água giratória, sendo a água respingada por cima do cultivo, com uma eficiência compreendida entre os 80 e 85% [3][4].
- Canhão hidráulico: trata-se de um aspersor de grande porte (denominado por canhão) que é manobrado manualmente, tendo como principal aplicação a distribuição de água a grandes distâncias. Contudo, a eficiência deste sistema é prejudicada pelo vento e encontra-se na ordem dos 50 a 60% [3][4].
- Sulcos: consiste num método de rega por gravidade, sendo a água canalizada para o cultivo através de pequenos canais de terra previamente adaptados, designados por sulcos. Este sistema possui uma implementação de baixo custo bem como uma baixa eficiência (entre 30 a 40%) comparativamente aos métodos anteriores [3][4].

Analisando os diversos métodos de irrigação verifica-se que os métodos gota-a-gota e microaspersão são os mais eficientes, uma vez que proporcionam uma poupança elevada de água [4].

Em suma, no processo de irrigação é necessário ter em consideração dois fatores relativamente importantes, que são a quantidade de água a ser aplicada ao cultivo e a sua ocorrência [3]. Assim, a irrigação do cultivo deverá ser realizada com a quantidade de água necessária para o desenvolvimento do cultivo e em horas de menos calor (preferencialmente horário noturno).

2.1.2. Evapotranspiração de referência

O fenómeno da evapotranspiração refere-se a dois processos simultâneos, a perda de água do solo através da evaporação e a perda de água da planta pela transpiração [5][6]. A evapotranspiração, normalmente, é expressa em mm/dia.

No fenómeno da evapotranspiração considera-se o vapor de água de forma conjunta, uma vez que não é possível diferenciar o vapor de água gerado pela evaporação do solo e pela transpiração das plantas de forma distinta [5][6].

O processo de evaporação provoca um desperdício elevado de água num cultivo, visto que uma fração dessa água é evaporada, não chegando a ser utilizada no cultivo.

Por outro lado, o processo da transpiração consiste na evaporação da água líquida contida nos tecidos das plantas, constituindo, assim, o retorno da água à atmosfera.

As plantas (cultivos) absorvem a água pelas suas raízes. No entanto, parte desta é dissipada pelo processo da evaporação, sendo apenas uma pequena porção utilizada nos vários processos fisiológicos das plantas. Todavia, as plantas perdem predominantemente água através de pequenos orifícios localizados nas folhas, designados por estomas. Quando a água torna-se escassa no cultivo, o processo de transpiração ocorre com maior dificuldade nas plantas, podendo provocar a morte da mesma, numa situação extrema.

Nesse sentido, o processo de transpiração depende diretamente de vários fatores físicos e químicos, entre os quais [5][7]:

- Energia recebida: A radiação solar direta e a temperatura ambiente do ar proporcionam energia suficiente para que a água evapore.
- Variação da pressão de vapor: A pressão de vapor influencia o ambiente húmido em torno da planta.
- Velocidade do vento: À medida que o processo de evaporação ocorre, o ar em torno da planta torna-se mais denso, até saturar (humidade de 100%). Apenas o vento permite a diminuição da concentração de humidade do ar em torno da planta.

Deste modo, foram desenvolvidos vários procedimentos para calcular o processo da evapotranspiração [5]. Nestes procedimentos constatou-se que a evapotranspiração depende da estrutura física da planta (altura, índice de área foliar, forma da folha, entre outros), da forma como a planta se encontra exposta ao ambiente (temperatura do ar, humidade atmosférica, velocidade do vento) e das características do solo (quantidade de água do solo, capacidade deste encaminhar a água até às raízes, bem como a salinidade

de água do solo e da água utilizada para a rega). Assim, a capacidade de evaporação da atmosfera pode ser expressa pela evapotranspiração de referência (ET_0) [5]. A evapotranspiração de referência representa a perda de água de uma superfície cultivada sob normas padrão. A figura 2.2 ilustra o processo da evapotranspiração de referência.

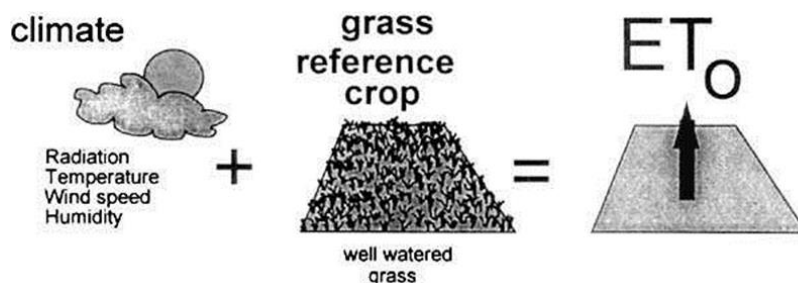


Figura 2.2 - Evapotranspiração de referência [8].

No cálculo da evapotranspiração dos cultivos em grandes áreas, o tipo de cultivo e a fase de desenvolvimento devem, também, ser considerados na avaliação. Na realidade, existem diversos métodos para determinar a evapotranspiração de referência. No entanto, o método recomendado é o *FAO Penman-Monteith*, que concebe resultados relativamente exatos em ambientes climáticos adversos (climas áridos e húmidos), sendo este método referenciado por diversas equipas de investigação desta área [5]. A evapotranspiração diária numa superfície presumível de referência pode ser determinada a partir da seguinte expressão:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2.1)$$

sendo ET_0 a evapotranspiração diária (mm.dia^{-1}), Δ o declive da curva de vapor ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$), R_n a radiação solar na superfície de referência ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{hora}^{-1}$), G a densidade do fluxo do calor do solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{hora}^{-1}$), γ a constante psicrométrica ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$), T a temperatura média do ar a 2 metros de altura ($^\circ\text{C}$), u_2 a velocidade do vento a 2 m de altura (m.s^{-1}), e_s a pressão de saturação (kPa) e e_a a pressão real de vapor (kPa).

Porém, a caracterização de um cultivo em particular é definido com base num fator K_c , denominado por coeficiente de cultivo, que será descrito na próxima secção.

2.1.3. Coeficiente de Cultivo

O coeficiente de cultivo (K_c) caracteriza as propriedades do cultivo, bem como as respetivas fases de desenvolvimento do mesmo [5][6]. Assim, o coeficiente de cultivo multiplicado pela evapotranspiração de referência (ET_c) determina o valor do coeficiente de evapotranspiração do cultivo (ET_c),

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2.2)$$

Como o coeficiente de cultivo assume diferentes valores para cada fase de desenvolvimento do cultivo, então o coeficiente de evapotranspiração do cultivo também detém diferentes valores ao longo do desenvolvimento do cultivo. Na figura 2.3

encontra-se representada a curva generalizada para o coeficiente de cultivo durante as várias fases do desenvolvimento do cultivo.

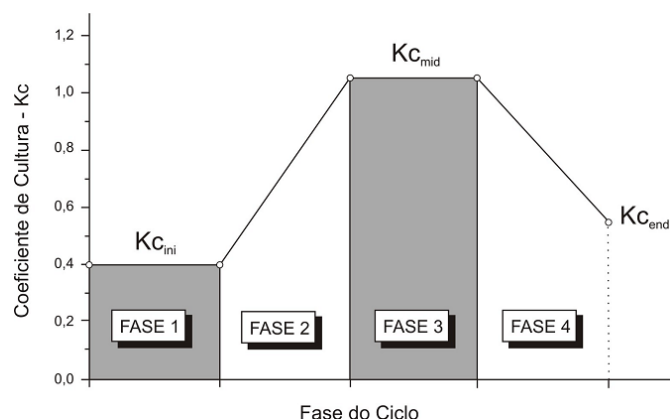


Figura 2.3 - Coeficiente de cultivo durante as várias fases do desenvolvimento do cultivo [9].

Observando a figura 2.3 verifica-se que existem 4 fases atribuídas ao coeficiente de cultivo. Na primeira fase o coeficiente de cultivo, $K_{c_{ini}}$, é constante e é influenciado pela frequência de irrigação. Outro coeficiente de cultivo constante é o da terceira fase, $K_{c_{mid}}$, que é influenciado pelo efeito da evaporação. Por último, os coeficientes de cultivo da segunda e última fases variam linearmente entre os valores das fases 1 e 3, respetivamente. Portanto, o coeficiente de evapotranspiração do cultivo representa a quantidade diária de água necessária a irrigar para se obter um bom desenvolvimento do cultivo e pode ser determinado para diversos períodos de tempo [5][6], sendo o período normalmente considerado de um dia.

É, ainda, de salientar que o coeficiente de cultivo varia de cultura para cultura, sendo alguns coeficientes representados na tabela 2.1. Os valores de K_c , presentes na tabela 2.1, constituem apenas valores médios e deverão ser utilizados como referências em estimativas da evapotranspiração de referência ou durante estudos preliminares ou estudos de planeamento [5][6].

Tabela 2.1 - Valores do coeficiente de cultivo K_c e alturas máximas das plantas para um cultivo sem stress hídrico, considerando uma rega bem gerida. A humidade relativa considerada é de aproximadamente 45% e a velocidade do vento a 2 m de altura é de 2 m.s^{-1} [5][6].

Cultivo	$K_{c\text{inicial}}^1$	$K_{c\text{médio}}$	$K_{c\text{final}}$	Altura máxima cultivo (m)
Banana–1ºano	0,5	1,1	1	3
Banana–2ºano	1	1,2	1,1	4
Batata	-	1,15	0,75	0,4
Batata–doce	-	1,15	0,65	0,4
Cana-de-açúcar	0,4	1,25	0,75	3
Cebola	0,7	1,05	0,75	0,4
Couve-de-bruxelas	0,7	1,05	0,95	0,4
Repolho	-	1,05	0,95	0,4
Feijão-frade	0,4	1,15	0,35	1,5-2,0
Feijão-verde	0,5	1,15	0,9	1,5-2,0
Macieira				
Sem cobertura do solo, com fortes geadas	0,45	0,95	$0,70^2$	4
Sem cobertura do solo, sem geadas	0,6	0,95	$0,75^2$	4
Solos com cobertura ativa, com fortes geadas	0,5	1,2	$0,95^2$	4
Solos com cobertura ativa, sem geadas	0,8	1,2	$0,85^2$	4
Morango	0,4	0,85	0,75	0,2
Repolho	-	1,05	0,95	0,4
Tomate	0,6	1,15	0,8	0,6
Uva				
Mesa	0,3	0,85	0,45	1,5
Vinho	0,3	0,7	0,45	1,50-2,0

¹Os valores de $K_{c\text{inicial}}$ apresentados correspondem a valores médios considerando uma gestão de rega e humedecimento do solo típico.

²Estes valores de $K_{c\text{final}}$ são representativos de K_c antes da queda das folhas. Depois das folhas terem caído, o valor do $K_{c\text{final}}$ é de aproximadamente 0,20 para um solo descoberto e seco. Para um solo com cobertura vegetal morta o $K_{c\text{final}}$ varia entre os 0,50 a 0,80.

Para climas em que a humidade relativa seja aproximadamente 45% e com uma velocidade do vento média de $2,0 \text{ m/s}$, o valor de $K_{c\text{médio}}$ adaptado deverá ser ajustado de acordo com a seguinte equação [5][6]:

$$K_{c\text{médio}} = K_{c\text{médio}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (2.3)$$

onde $K_{c\text{médio}}$ é obtido a partir da tabela 2.1, u_2 é o valor médio diário da velocidade do vento a 2 metros de altura sobre o cultivo durante o período de desenvolvimento com $1 \text{ m.s}^{-1} \leq u_2 \leq 6 \text{ m.s}^{-1}$, HR_{min} é o valor médio diário da humidade relativa durante o período de desenvolvimento compreendido no intervalo $20\% \leq HR_{\text{min}} \leq 80\%$ e h é a altura média do cultivo durante o período de desenvolvimento, com $0,1 \text{ m} \leq h \leq 10 \text{ m}$. Contudo, a frequência da ocorrência de eventos de humedecimento tem um menor impacto sobre $K_{c\text{médio}}$, com a particularidade de, no caso desta frequência ser superior a 3 dias, os valores de $K_{c\text{médio}}$ presentes na tabela 2.1 serem inferiores a 1,0. O valor de

$K_{c\text{ médio}}$ poderá ser aproximado pelo intervalo 1,1-1,3. Esta aproximação é necessária para que seja tido em consideração o efeito combinado do solo continuamente humedecido.

Relativamente ao $K_{c\text{ final}}$, os valores apresentados na tabela 2.1 representam valores típicos sob condições climáticas bem definidas. Para as zonas onde o clima seja distinto do considerado na tabela 2.1, o valor de $K_{c\text{ final}}$ deve ser ajustado de acordo com a seguinte equação [5][6]:

$$K_{c\text{ final}} = K_{c\text{ final}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (2.4)$$

onde $K_{c\text{ final}}$ é obtido a partir da tabela 2.1, u_2 é o valor médio diário da velocidade do vento a 2 metros de altura sobre o cultivo, durante o período de desenvolvimento, com $1 \text{ m. s}^{-1} \leq u_2 \leq 6 \text{ m. s}^{-1}$, HR_{min} é o valor médio diário da humidade relativa durante o período de desenvolvimento compreendido no intervalo $20\% \leq HR_{\text{min}} \leq 80\%$ e h é a altura média do cultivo durante o período de desenvolvimento, com $0,1 \text{ m} \leq h \leq 10 \text{ m}$ [5][6].

O ajuste anterior é apenas válido para as situações em que $K_{c\text{ final}}$, obtido a partir da tabela 2.1, seja superior a 0,45, sendo que nas restantes situações não é necessário efetuar o respetivo ajuste [5][6].

No entanto, alguns sistemas de irrigação humedecem apenas uma fração da superfície do solo, economizando assim uma grande percentagem de água na rega do cultivo. Nestas situações, é necessário multiplicar o fator $K_{c\text{ inicial}}$, obtido a partir de tabela 2.1, pela fração de superfície humedecida de acordo com o sistema de rega implementado. A tabela 2.2 mostra as frações humedecidas de acordo com o sistema de irrigação implementado.

Tabela 2.2 - Valores comuns da fração f_h humedecida pelo sistema de rega ou chuva [5][6].

Designação do sistema de rega	Fração humedecida (f_h)
Precipitação	1,0
Aspersão	1,0
Inundação	1,0
Sulcos estreitos	0,6 a 0,8
Sulcos Largos	0,4 a 0,6
Sulcos alternativos	0,3 a 0,5
Gota-a-gota	0,3 a 0,4

De modo a determinar o $K_{c\text{ inicial}}$, tendo em consideração a fração humedecida, deverá ser utilizada a seguinte equação [5][6]:

$$K_{c\text{ inicial}} = f_h K_{c\text{ inicial}} \quad (2.5)$$

onde f_h corresponde à fração humedecida pelo sistema de rega aplicado e $K_{c\text{ inicial}}$ é obtido a partir da Tabela 2.1.

2.2. Tecnologias sem fios

Nesta secção é apresentada a tecnologia *ZigBee*, que é utilizada nos rádios de comunicação deste trabalho. Primeiramente é realizado um estudo sobre a norma IEEE 802.15.4, particularmente a camada física, a camada de ligação de dados e as classes dos dispositivos. Por último, é descrita a arquitetura da rede *ZigBee* e as respetivas topologias de rede.

2.2.1. Norma IEEE 802.15.4

A norma IEEE 802.15.4 foi desenvolvida em outubro de 2003 pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) tendo como principal objetivo a comunicação entre dois dispositivos de baixo consumo de energia. A mesma é suportada pelo grupo de trabalho do IEEE 802.15 e tem como base de funcionamento as seguintes tecnologias: *ZigBee*, *ISA100.11a*, *WirelessHART* e *MiWi* [10].

Esta norma tem em consideração as baixas taxas de transferência de dados, o baixo consumo de energia, o baixo *duty cycle*, o baixo grau de mobilidade, a baixa complexidade de implementação, o baixo custo, entre outros.

O IEEE 802.15.4 consiste num protocolo de comunicação *standard*, que define apenas as duas camadas básicas provenientes do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) da ISO (*International Organization for Standardization*) que são a camada física (*Physical Layer - PHY*) e a camada de dados (*Medium Access Control - MAC*). A camada física especifica os componentes de interface de rede, os seus parâmetros e modos de operação. Relativamente à camada MAC, esta controla o acesso ao meio, que pode ser efetuado por dois modos de operação: *beacon* e *non-beacon*.

A figura 2.4 ilustra a pilha protocolar alusiva ao padrão IEEE 802.15.4/*ZigBee*.

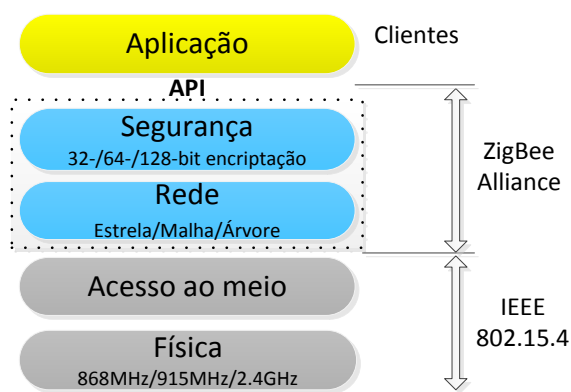


Figura 2.4 - Pilha protocolar do padrão IEEE 802.15.4 [10].

Na pilha protocolar (figura 2.4), a camada de rede proporciona as funcionalidades essenciais no suporte à configuração da rede. A camada de segurança utiliza os serviços do padrão IEEE 802.15.4 para dar suporte aos dados de aplicação e à infraestrutura de segurança. Por último, a camada de aplicação é responsável por fornecer os serviços para as aplicações.

A norma IEEE 802.15.4 oferece uma comunicação universal de baixa velocidade e baixo custo entre dispositivos, não necessitando de uma infraestrutura subjacente

complexa, tornando-se numa norma ideal para as redes de área pessoal (*LR-WPAN - Low-Rate Wireless Personal Area Network*), o que possibilita um aumento substancial de novas aplicações, bem como a adição de novos valores em aplicações já existentes [10].

2.2.1.1. Camada física (PHY)

A camada física possibilita a operação numa de três bandas de frequência ISM (*Industrial Scientific and Medical*), sendo as mesmas, 868 MHz na Europa, 915 MHz nos Estados Unidos da América (USA) e na Austrália e, por último, 2,4 GHz em todo o mundo [10][11][12].

As bandas ISM são consideradas bandas de frequências livres. A tabela 2.3 apresenta as bandas livres utilizadas pela norma 802.15.4, onde são descritos o número de canais, taxas de transmissão e sistemas de modulação.

Tabela 2.3 - Frequências livres das bandas ISM com respetivos números de canais e taxas de bits [11].

Banda ISM	Áreas	Nº de canais	Taxas de bits (Kbps)	Modulação
868,0 – 868,6MHz	Europa	1 canal	20/100/250	BPSK
902,0-928,0MHz	USA e Austrália	10 canais	40/250	BPSK
2,40-2,48GHz	Mundial	16 canais	250	O-QPSK

Por exemplo, a banda ISM 2,4 GHz encontra-se compreendida entre os 2400 e 2483,5 MHz e suporta uma taxa de transmissão de 250 kbps, com 16 canais.

A camada física é responsável pela transmissão das PDU (*Protocol Data Unit*), ou seja, a unidade de dados, através de ondas de rádio. Para tal, a camada física faz uso da banda larga e aplica a técnica da modulação DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) que agrega, em cada 6 bits de dados, um padrão de redundância e os espalha pela largura de banda utilizada. O uso da redundância permite a identificação dos dados pertencentes a um determinado nó, o que identifica o nó, bem como facilita a deteção de erros [10][11][12].

Após a manipulação dos dados na camada física, a trama da PDU é constituída, essencialmente, por um sinal de sincronismo, um bloco de informação e um bloco de mensagem (*payload*).

Quanto ao espectro utilizado pelos diferentes canais das bandas 868/915 MHz e 2,4 GHz, este encontra-se ilustrado na figura 2.5. Na frequência dos 2,4 GHz o tipo de modulação utilizado, com base nos métodos DSSS, é o O-QPSK (*Offset Quadrature Phase-Shift Keying*).

As bandas ISM de 868 e 915 MHz também utilizam a técnica de espalhamento espectral por sequência direta, mas com a modulação BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), com impulsos do tipo cosseno elevado, em que cada bit transmitido é representado por uma sequência com comprimento máximo de 15 registos (sequência-m) [10][11][12].

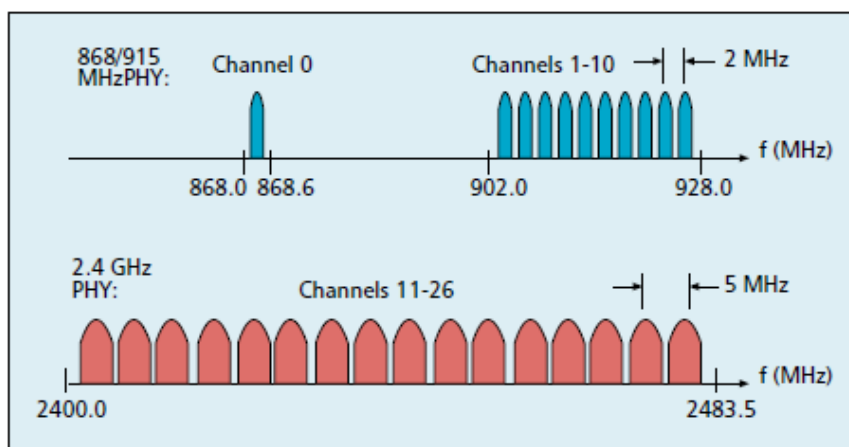


Figura 2.5 - Espectro utilizado pelas Bandas ISM [11].

Na figura 2.5 é possível verificar que a banda dos 915 MHz possui um espaçamento de canal de 2 MHz e a banda dos 2,4 GHz um espaçamento mais amplo de 5 MHz, o que facilita a transmissão e recepção dos dados, quando múltiplos tipos de redes sem fios disputam a mesma banda de frequência. A banda dos 868 MHz só contempla um único canal.

As frequências centrais dos canais são definidas da seguinte forma [13]:

$$F_c = 868,3 \text{ MHz}, \quad \text{para } k = 0 \quad (2.6)$$

$$F_c = 906 + 2(k - 1)\text{MHz}, \quad \text{para } k = 1,2, \dots, 10 \quad (2.7)$$

$$F_c = 2405 + 5(k - 1)\text{MHz}, \quad \text{para } k = 11,12, \dots, 26 \quad (2.8)$$

onde k corresponde ao número do canal.

Em suma, a camada física é responsável pela ativação e desativação do rádio transceptor. O rádio transceptor pode operar em três estados diferentes: transmissão, recepção e adormecimento. A camada física ainda pode detetar a potência dos canais, indicar a qualidade de conexão e informar os canais livres (*Clear Channel Assesment - CCA*). A qualidade de conexão pode ser verificada na recepção de um pacote de dados, uma vez que o nó recetor envia de volta um pacote LQ (*Link Quality*) que determina a qualidade do sinal de conexão [10][11][12].

2.2.1.2. Camada de acesso ao meio (MAC)

A camada MAC da norma 802.15.4, assente na camada física do modelo OSI, é responsável pelo processo de encapsulamento dos dados provenientes das camadas superiores, organizando-os de modo a serem transmitidos. Para tal, a camada MAC permite dois modos de operação que podem ser selecionados pelo coordenador: modo *beacon* e modo *non-beacon*.

Os modos de operação definem as principais características de uma rede *ZigBee*, tais como [10][11][12]:

- Baixo consumo de potência,
- Baixa taxa de transmissão,
- Capacidade de redução do *duty cycle*.

A redução do *duty cycle* permite ao dispositivo permanecer inativo (modo adormecido) durante um determinado período de tempo, permitindo a otimização do consumo e uma gestão eficiente da energia. No entanto, esta característica só pode ser estendida aos nós terminais de uma rede sem fios ou com recurso ao modo *beacon*.

A camada MAC trabalha apenas com uma das bandas ISM de cada vez, pois o 802.15.4 não é uma norma com protocolo multicanal. Esta camada tem como funções estabelecer e manter as ligações de comunicação entre nós vizinhos e realizar a transferência de informação através dessas ligações de forma segura e eficiente. Outras funções desta camada são o controlo de erros e o controlo de fluxo. Todavia, os protocolos MAC são influenciados pelas propriedades da camada física, uma vez que são os primeiros acima desta. Assim, a camada MAC proporciona uma interface entre a camada física e os protocolos de camada superior e lida com todo o acesso ao canal de rádio físico, tendo como principal objetivo a redução das colisões de pacotes.

Desta forma, a camada MAC determina o instante em que um determinado nó pode aceder ao meio para transmitir os pacotes de dados, de controlo ou de gestão para outro nó (*unicast*) ou para um conjunto de nós (*multicast, broadcast*).

Modo *beacon*

O modo *beacon* consiste num modo em que os nós da rede enviam periodicamente sinais sinalizadores, *beacons*, para o coordenador PAN (*Personal Area Network*), a fim de identificar e confirmar a sua presença na rede. Este modo de operação possui a vantagem de poder economizar a energia da rede. Para tal, é necessário implementar um sincronismo nos nós da rede (exceto no nó coordenador) para que estes permaneçam inativos durante um período de tempo [10][11][12].

No funcionamento deste modo é aplicado o mecanismo CSMA-CA (*Carrie Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) para evitar colisões e uma estrutura de supertrama como mostra a figura 2.6.

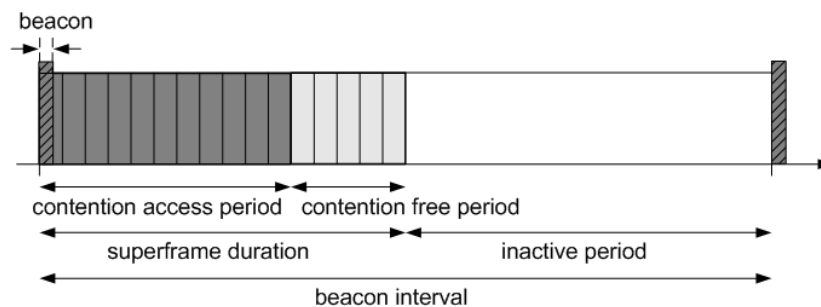


Figura 2.6 - Estrutura da supertrama [11].

Após o envio do sinalizador *beacon*, ocorre o período de acesso CAP (*Contention Access Period*), na qual todos os dispositivos competem entre si pelo mecanismo CSMA-CA. De seguida, tem-se o período CFP (*Contention Free Period*) ou GTS (*Guaranteed Time Slot*), que reserva um intervalo de tempo para ser utilizado por cada dispositivo. No CFP também é possível utilizar mecanismos que garantem qualidade de serviço e baixa latência. Após este período, o dispositivo entra em modo inativo poupando assim energia.

O uso da supertrama possibilita controlar o acesso ao canal e disponibilizar as bandas livres em determinadas situações, bem como oferecer baixa latência nas transmissões. Este modo só opera numa topologia em estrela.

Modo *non-beacon*

No modo *non-beacon* a maior parte dos dispositivos mantêm os recetores permanentemente ativos, o que implica a necessidade de assegurar fontes de alimentação mais potentes ou troca constantes de baterias.

Neste modo, o mecanismo *unslotted* CSMA-CA é usado para fornecer controlo de acesso ao meio. Assim, os períodos ativos (*backoff*) de um dispositivo não necessitam de ser sincronizados com os períodos ativos de outro dispositivo, visto que os dispositivos encontram-se no estado ativo.

Outro protocolo utilizado no modo *non-beacon* é o ALOHA em que o envio dos pacotes é imediato e a ausência de um *acknowledgment* corresponde à ocorrência de colisão, o que faz com que o nó espere um tempo aleatório e volte a enviar [10]. O protocolo ALOHA consiste num protocolo de acesso aleatório em que os nós, não são coordenados e operam de uma forma completamente distribuída.

Apesar do modo *non-beacon* apoiar o serviço garantido para aplicações sensíveis a atrasos na rede centralizada, o IEEE 802.15.4 define uma rede descentralizada ou rede ponto a ponto (*peer-to-peer*) que permite aos sensores sem fios comunicarem uns com os outros dentro da sua faixa de transmissão. Para uma comunicação ponto a ponto entre os sensores sem fios é necessário implementar o mecanismo de acesso CSMA-CA, para que os sensores sem fios possam competir uns com os outros pelo acesso justo ao canal de transmissão [10][11][12]. Este modo pode operar numa topologia em malha.

2.2.1.3. Classes de dispositivos

O padrão 802.15.4 define duas classes de dispositivos: *Full Function Device* (FFD) e *Reduce Function Device* (RFD).

As classes RFD apresentam uma maior simplicidade a nível de *hardware*, sendo estes compatíveis com microcontroladores de 8 bits e comunicam somente com dispositivos físicos FFD, ou seja, os dispositivos RFD estão limitados a uma configuração em estrela, não podendo atuar como coordenador da rede ou *router*. Relativamente às classes FFD, os dispositivos pertencentes a esta classe podem funcionar em qualquer topologia de rede, são mais robustos a nível de *hardware* e mais sofisticados, pois suportam mais funcionalidades e características do protocolo. Contudo, as FFD têm um consumo energético superior, uma vez que normalmente, estão no modo ativo quando a operar como coordenador PAN ou *router* [13].

2.2.2. Protocolo ZigBee

O protocolo *ZigBee* é baseado na norma 802.15.4, que corresponde ao padrão físico global de rádio. Este protocolo dedicou-se ao desenvolvimento das camadas superiores do padrão IEEE 802.15.4, nomeadamente a camada de rede (*Network*) e a camada da segurança (*Security*) (consultar figura 2.4).

A camada de rede proporciona as funcionalidades necessárias no suporte à configuração da rede, descoberta de novos dispositivos, associação e desassociação, manutenção da topologia, encaminhamento, gestão de camada MAC e gestão de segurança. Esta camada tem como principais características: inicializar uma rede, capacidade de ingressar e abandonar uma rede, configuração de novos dispositivos, segurança dos dados de saída, sincronização com a rede, encaminhamento de tramas para o destino correto, entre outras.

Quanto à camada de segurança, esta usufrui dos serviços caracterizados pelo padrão IEEE.802.15.4 para oferecer suporte à infraestrutura de segurança e aos dados da aplicação. Para tal, a segurança é baseada em algoritmos simétricos de encriptação, o 32/64/128-AES (*Advanced Encryption Standard*), que utiliza uma chave de 32/64/128 bits para encriptar a mensagem. No entanto, a segurança não está ativa, sendo a mesma ativada pela camada de aplicação.

Por último, a subcamada API (*Application Programming Interface*) presta auxílio à camada de aplicação, na *ZigBee Device Object (ZDO)* e nos objetivos da aplicação delimitados pelos fabricantes. O ZDO é responsável pela administração dos dispositivos na rede (coordenador, *router* e nó terminal), e de estabelecer fiabilidade na segurança entre os vários dispositivos [13].

A API tem como encargo a inclusão e manutenção das tabelas de encaminhamento, de modo a conservar os vários dispositivos interligados de acordo com as suas necessidades e serviços e redirecionar as mensagens entre dispositivos [13].

2.2.2.1. Arquitetura da rede

A arquitetura básica de uma RSSF (Rede de Sensores Sem Fios) baseada no protocolo *ZigBee* consiste, nomeadamente, em três dispositivos distintos [13][14]:

- Nó terminal (*end-device*): estes nós têm a particularidade de poderem estar integrados nas duas classes de dispositivos FFD e RFD, mas, todavia, são considerados como RFD. Os nós terminais comunicam diretamente com o nó *router* ou com o nó *coordenador*. Contudo, estes nós não têm a capacidade de reencaminhar as mensagens provenientes de outros nós terminais. Por outro lado, estes nós podem entrar em modo de adormecimento, prologando assim a sua longevidade em termos energéticos.
- Nó *router*: é considerado como dispositivo da classe FFD e tem como principal função o encaminhamento dos dados provenientes dos nós terminais para o *coordenador*, atuando, assim, como dispositivos intermediários, onde reencaminham as mensagens pela rede por vários saltos (*multihop*). Estes dispositivos não podem entrar em modo de adormecimento, dado que a percentagem de perdas de pacotes (dados) do nó terminal para o coordenador seria excessiva, inviabilizando, deste modo, o funcionamento da rede.
- Coordenador: consiste num dispositivo físico FFD responsável pela gestão de atividades da rede, tais como: atribuição de endereços de rede, adição de novos nós na rede (*routers* e *end-devices*), a seleção do canal e do

identificador de rede PAN ID (*Personal Area Network identifier*) de modo a inicializar e conceber uma rede. Outra função do nó coordenador consiste na recolha dos dados, de modo a serem entregues para posterior processamento na *gateway*. De igual modo ao caso dos nós *routers*, o nó coordenador também não pode entrar em modo de adormecimento.

A arquitetura de uma RSSF baseada no protocolo *ZigBee* encontra-se representada na figura 2.7, sendo composta por diversos nós terminais, alguns nós *routers* e um nó coordenador. Outro elemento presente nesta arquitetura é o servidor.

O servidor realiza o processamento dos dados oriundos dos nós terminais e apresenta-os numa aplicação *web*.

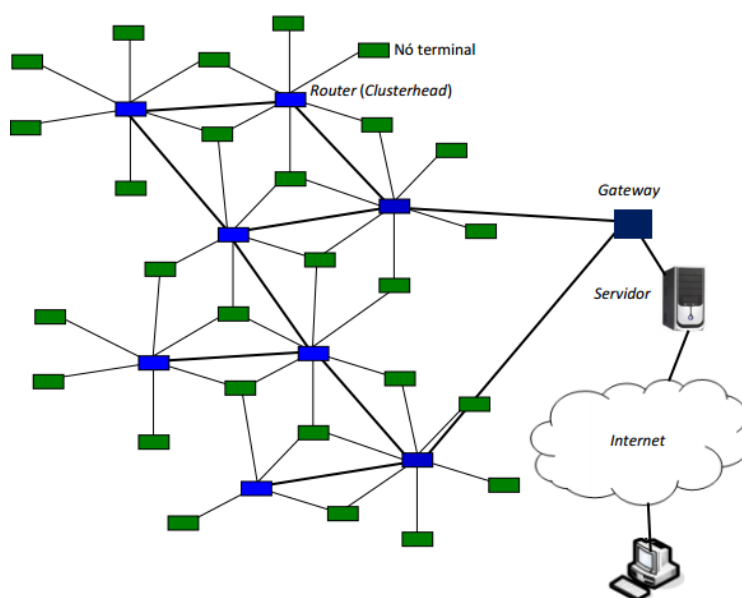


Figura 2.7 - Arquitetura de uma RSSF [14].

Observando a figura 2.7, os blocos de cor verde correspondem aos nós sensores (ou nós terminais), os de cor azul aos nós de comunicação (ou nós *routers*) e o bloco de cor azul-escuro à *gateway* (onde permanece o coordenador).

2.2.2.2. Topologia da rede

A topologia da rede refere-se à forma como os dados são enviados para o coordenador, sendo que as principais topologias utilizadas numa RSSF são:

- Topologia em estrela: Todos os nós terminais comunicam diretamente com a *gateway*, sendo esta a responsável pela rede (figura 2.8a). Esta topologia é considerada a mais simples numa rede *ZigBee*, estando limitada à distância a que o nó terminal pode estar da *gateway* [13][14].
- Topologia em árvore: Topologia mais complexa que a anterior, com cada nó a manter o percurso até à *gateway* e a utilizar outros nós nesse percurso (figura 2.8b). Esta topologia é apropriada para aplicações tolerantes a latência. Como desvantagem tem-se a perda de informação dos nós terminais associados ao nó intermédio, caso este deixe de funcionar, porque esta topologia não usufrui de percursos alternativos (*links*) [13][14].

- Topologia em malha: Esta topologia resolve o problema da perda de ligação do nó intermédio, pois permite a formação de múltiplos caminhos (*links*) desde o nó terminal até ao coordenador, garantindo, assim, a fiabilidade do sistema (figura 2.8c). Com isto, a topologia em malha torna-se mais tolerante em caso de ruturas da rede, sendo a mais utilizada nas RSSF. A formação de múltiplos caminhos é efetuada tendo em consideração o protocolo de encaminhamento [13][14].

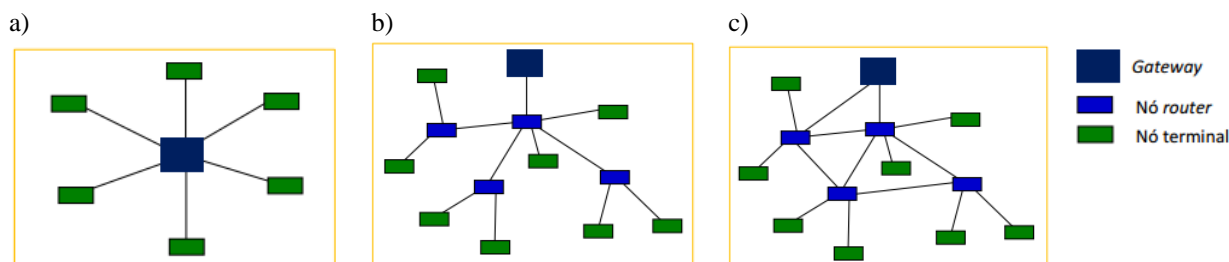


Figura 2.8 - Principais topologias: a) estrela, b) árvore e c) malha [14].

A topologia em malha apresenta maior fiabilidade comparativamente às restantes, uma vez que esta permite redundância de ligações para a transferência de informação dos nós sensores para o nó coordenador.

2.3. Captação de energia

Atualmente, as RSSF são suportadas a nível energético por baterias, o que limita o seu nível de longevidade e operacionalidade, podendo ser inviável a substituição de baterias numa rede de grande dimensão.

Nesse sentido, as energias renováveis, nomeadamente, a energia solar e a energia hídrica, surgem como boas fontes alternativas de alimentação para as RSSF.

2.3.1. Energia Solar

A conversão da energia solar em energia elétrica é efetuada através de células solares, sendo que a operação destas rege-se pelo efeito fotovoltaico. Um método simples de representar uma célula fotovoltaica consiste numa fonte de corrente ideal em paralelo com um diodo ideal, como ilustra a figura 2.9.

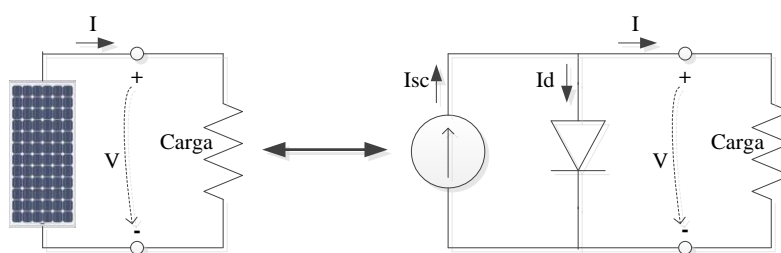


Figura 2.9 - Modelo simples de uma célula fotovoltaica [15].

Na figura 2.9, a fonte de corrente representa a corrente elétrica gerada pelo feixe de radiação luminosa. Esta corrente, I_{sc} , é unidirecional e constante para uma dada radiação solar incidente.

No painel solar fotovoltaico (PV), a associação de células fotovoltaicas em série permite aumentar o valor de tensão, mantendo o valor da corrente constante. Por outro lado, a configuração em paralelo permite aumentar o valor da corrente, mantendo a tensão constante.

Devido à não linearidade da característica entre a corrente e a tensão, no comportamento dos painéis pode-se caracterizar duas regiões distintas: comportamento de uma fonte de tensão e comportamento de uma fonte de corrente [15]. A figura 2.10 mostra o ponto de máxima potência.

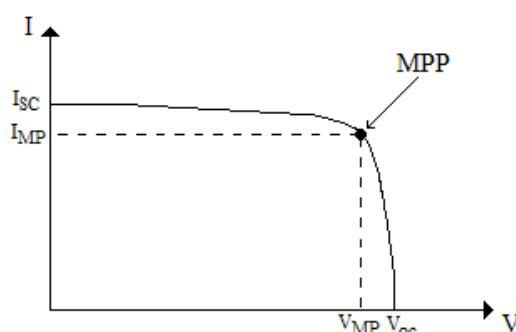


Figura 2.10 - Ponto de máxima potência do painel solar.

Observando a figura 2.10 verifica-se que, quando a tensão aumenta, a corrente diminui ou vice-versa. Existe um ponto em que a relação entre a tensão e a corrente corresponde à máxima potência. Pode-se recorrer a circuitos adequados de conversão de energia de modo a permitir operar neste ponto, MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Nesta figura, o parâmetro V_{oc} corresponde ao valor de tensão máximo obtido pelo painel em circuito aberto. V_{MP} e I_{MP} consistem no valor de tensão e de corrente que maximiza a potência disponível do painel. Por último, o parâmetro I_{sc} traduz na corrente máxima produzida pelo painel em modo de curto-circuito.

2.3.2. Energia Hídrica

A captação de energia a partir da água surgiu há muitos séculos com a moagem de cereais. Nos séculos XIX e XX, a energia hídrica assumiu outro papel após a invenção do gerador elétrico e das turbinas, da qual se iniciou a produção de energia elétrica através da água [16].

A energia hídrica resulta do aproveitamento da ação mecânica que a água exerce sobre as pás de uma turbina. A produção de energia a partir de um sistema hídrico requer zonas onde exista a presença de água, como é o caso do sistema do presente trabalho.

A principal característica da energia hídrica consiste na queda efetiva de água, isto é, a altura da queda de água (H) em metros e o caudal (Q) em metros cúbicos por segundo.

A potência disponível de um sistema hidrelétrico é dada por [17]:

$$P_{in} = \eta \rho g H Q \quad (2.9)$$

em que η corresponde à eficiência do sistema hídrico, ρ à densidade da água (1000 kg/m^3) e o g o valor da força gravítica ($g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$).

Relativamente à eficiência (η) do sistema hídrico, esta pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.10)$$

onde P_{out} corresponde à potência de saída do gerador.

As turbinas hídricas podem ser agrupadas em quatro modelos: *Pelton*, *Francis*, *Kaplan* e *Bulbo*.

A seleção do modelo de turbina resulta da interação de três parâmetros fundamentais do sistema que são: o caudal, a altura da queda de água e a potência gerada [15]. A Figura 2.11 ilustra uma tabela gráfica que indica a relação entre os três parâmetros para cada tipo de turbina em sistemas de produção de larga escala.

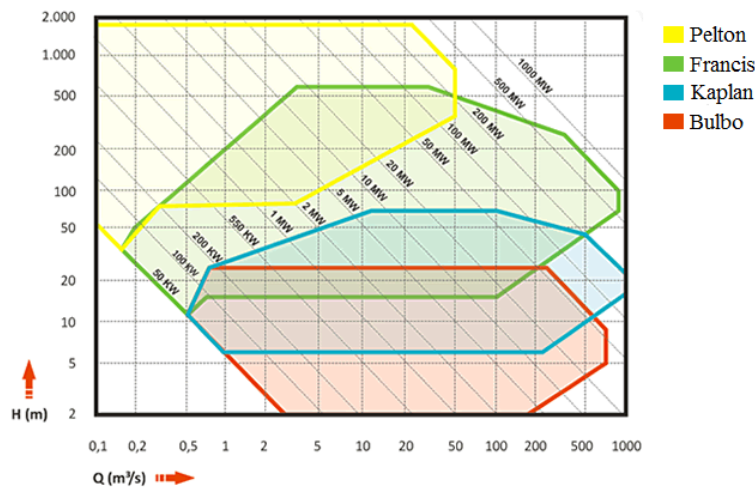


Figura 2.11 - Tabela gráfica que indica a relação entre os três parâmetros para cada tipo de turbina.

Na figura 2.11, para uma altura superior a 500 metros e para um o caudal que poderá ir até aos 20 metros cúbicos por segundo o modelo de turbinas mais apropriado consiste no modelo *Pelton*.

Para sistemas que utilizam a turbina *Pelton*, o caudal pode ser determinado pela velocidade do jato,

$$v_1 = \sqrt{2gH} \quad (2.11)$$

O caudal de água é dado por:

$$Q = A v_1 = \frac{\pi d_s^2}{4} v_1 \quad (2.12)$$

onde A é a área de secção transversal do jato e d_s o seu diâmetro.

Na elaboração do protótipo do sistema de rega, como o reservatório de água encontra-se a uma altura pouco acentuada do solo, foi utilizada uma turbina segundo o modelo de *Kaplan*, mais precisamente o modelo *Kaplan-propeller* (ou hélice) no interior da tubagem do sistema de rega.

As turbinas em hélice são recomendadas para funcionar em locais com baixa queda e caudais de água elevados. Nestas turbinas, para pequena escala de produção, as pás não são reguláveis, o que significa que as pás mantêm-se fixas, não podendo ser ajustadas em relação ao ângulo de inclinação. As turbinas de pás fixas possuem a vantagem de serem mais simples e robustas, mais económicas e requerem menor manutenção. Por outro lado, este modelo de turbina não permite o ajustamento das pás consoante o caudal existente [15]. A figura 2.12 ilustra um exemplo de pás em hélice.



Figura 2.12 - Turbina em Hélice.

Nas turbinas hídricas o movimento de rotação das pás é diretamente proporcional à velocidade do fluxo de água (caudal) que percorre na turbina.

2.4. Aplicações existentes

Nesta secção serão abordadas algumas das aplicações existentes sobre a monitorização e controlo de um sistema de rega por uma rede de sensores sem fios.

2.4.1. Camalie Networks

O sistema produzido pela empresa *Camalie Networks* utiliza uma rede de sensores sem fios suportada pela *Crossbow* [19]. Este sistema permite a monitorização dos parâmetros temperatura e humidade do solo, radiação solar e humidade das folhas. O sistema é constituído por três equipamentos: nós sensores, coordenador e uma estação base. Os nós sensores comercializados pela *Crossbow*, de referência *eKo Pro Series*, têm a particularidade de apenas oferecer suporte até 4 sensores, sendo que estes sensores devem ser da marca *Crossbow* [19].

Comercialmente, existem dois tipos de nós *eKo Pro Series*, o EN2100 e o EN2120, que, segundo a folha de características do fabricante, possuem as características presentes na tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Características dos nós *eKo Pro Series*, EN2100 e EN2120 [20].

<i>eKo Pro Series</i>	EN2100	EN2120
Potência de transmissão típica	3 dBm	15 dBm
Sensibilidade	-101 dBm	
Distância máxima de operação	≈457 m	≈3218 m
Frequência de operação	2,405 até 2,480 GHz	
Protocolo de comunicação	DSS, 802.15.4	

Este sistema utiliza uma tipologia em malha, combinada com um protocolo de baixo consumo (DSS, 802.15.4), desenvolvido pela *Crossbow*.

A alimentação dos nós sensores é efetuada por baterias do tipo AA de NiMH (chumbo), recarregadas por um painel solar de pequena dimensão (3,2 cm x 6,3 cm). Em termos de consumo médio de corrente a uma taxa de amostragem de 15 minutos, o nó *eKo Pro Series* EN2100 tem um consumo de 0,4 mA (sem sensores) e o EN2120 de 0,5 mA (sem sensores) [20].

Os dados monitorizados pelos sensores são exibidos, em tempo real, numa aplicação *web* designada por *eKoview*, como mostra a figura 2.13.



Figura 2.13 - Software fornecido pela empresa *Crossbow* [19].

A aplicação *web* contém a informação recolhida por cada nó sensor, nomeadamente, tensão das baterias, temperatura e humidade do solo, entre outros, ao longo do tempo.

Esta aplicação pode ser acedida a partir de um dispositivo com *browser* e ligação à internet [19].

2.4.2. Ranch Systems

A *Ranch Systems* comercializa sistemas para monitorização de microclimas, explorações agrícolas e vinícolas, aplicações solares, sistemas de controlo da irrigação e sistemas de controlo dos parâmetros ambientais por uma rede de sensores sem fios. Estes sistemas são constituídos por nós sensores e uma estação base. Os nós sensores possibilitam o suporte a vários tipos de sensores, desde, temperatura, humidade e luminosidade, bem como anemómetros e pluviómetros [21].

A empresa *Ranch Systems* comercializa dois tipos de nós sensores, o RS100 e o RS200, ilustrados na figura 2.14.

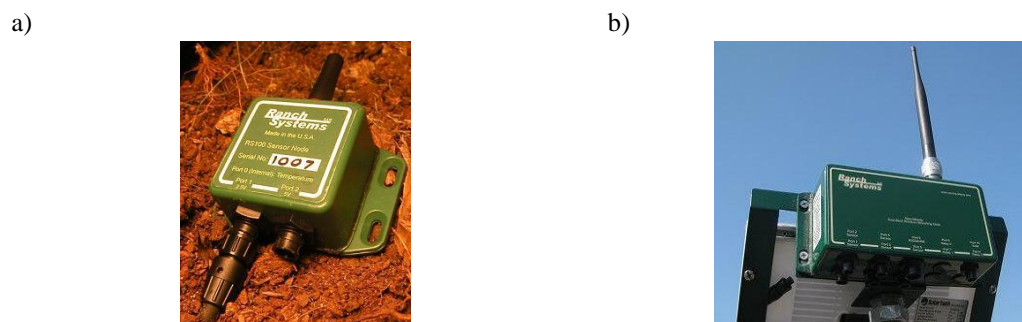


Figura 2.14 - Nós sensores: a) RS100 e b) RS200 [21].

O modelo RS100 (figura 2.14a), segundo a folha de características do fabricante, opera na gama de frequência dos 433 MHz e oferece apenas suporte a dois sensores digitais ou analógicos, com comunicação unidirecional para a estação base. Com isto, os nós sensores não têm permissão para receber qualquer transmissão, tornando-se assim uma desvantagem deste sistema.

A nível de alimentação, este é alimentado por uma bateria de lítio de 3,6 V com 1 Ah de capacidade. O sistema conduz a informação para a estação base a cada 5 minutos, mas apenas no caso de esta informação ter sofrido alguma alteração significativa.

Outro parâmetro descrito pelo fabricante consiste no alcance máximo do nó sensor em relação à estação base, que pode ir até aos 500 metros [21].

O sensor RS200 (figura 2.14b) pode trabalhar com duas gamas de frequências, 900 MHz (Estados Unidos da América) e 2,4 GHz (resto do globo).

Este modelo dispõe de três atuadores e suporta 5 sensores analógicos ou digitais e dois sensores com comunicação série através das duas portas série disponíveis, a rs485 e a rs432. A alimentação do nó sensor é realizada por uma bateria recarregável de 9,6 V com capacidade de 2,4 Ah. O carregamento da bateria é efetuado por um painel solar de 2 W acoplado ao sistema. A autonomia da bateria do RS200, segundo o fabricante, sem a presença de sol poderá ir até uma ou duas semanas.

A estação base, comercializada pela empresa, tem como referência RM210 e encontra-se representada na figura 2.15. Esta estação consiste no núcleo do sistema e é responsável por alocar toda a informação proveniente dos nós sensores da rede e encaminhá-la através de um *modem* GSM (*Global System for Mobile*) para o *datacenter* da empresa *Ranch Systems*. O RM210 suporta 6 sensores analógicos ou digitais, 2 portas séries (RS232 e RS485) e 4 atuadores [21].



Figura 2.15 - Estação base RM210 [21].

A alimentação da estação base é realizada por uma bateria de 12 V de chumbo de 12 Ah. A bateria é carregada por um painel solar com uma potência máxima de 80 W [21].

O *datacenter* consiste num servidor com a finalidade de armazenar os dados das estações base e disponibilizá-los ao utilizador através de uma aplicação *web*. A figura 2.16 mostra a aplicação *web* disponibilizada pela empresa *Ranch Systems*.

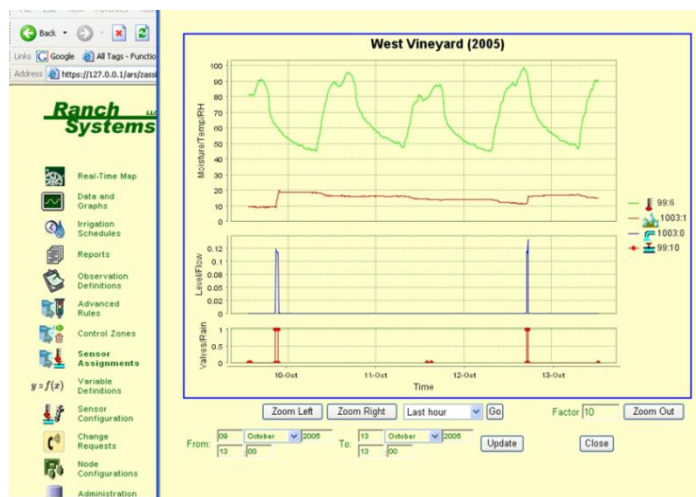


Figura 2.16 - Aplicação *web* disponibilizada pela empresa *Ranch Systems* [21].

A aplicação *web* recolhe a informação, em tempo real, e armazena-a, de modo a realizar os cálculos referentes à evapotranspiração de referência, temperaturas médias e ponto de orvalho (irrigação).

Por último, o sistema *Ranch Systems* permite ao utilizador receber avisos ou alertas (por mensagens de telemóvel ou por correio eletrónico) sobre possíveis previsões de condições meteorológicas adversas (como, por exemplo, geada, temperaturas extremas, ventos fortes, entre outras), tornando-se assim uma grande vantagem.

2.4.3. Rain Bird ClimateMinder

A *Rain Bird ClimateMinder* comercializa um produto de monitorização e controlo para a agricultura. O produto consiste numa rede de sensores sem fios de baixo custo, que permite efetuar uma avaliação do cultivo. A avaliação é efetuada pela leitura em tempo real dos parâmetros do solo (humidade, temperatura e salinidade), clima, condições das plantas, entre outros e pelo controlo de irrigação [22].

O sistema *ClimateMinder*, segundo o fabricante, permite o controlo de irrigação mesmo em pequenas áreas de cultivo. Outra característica deste sistema consiste no controlo das bombas de irrigação, válvulas e injetores de fertilizantes a partir do telemóvel, computador ou *tablet*. O produto também possui um sistema de avisos ou alertas, que possibilita ao utilizador receber em tempo real, notificações sobre alterações climáticas e relatórios diários ou semanais relativamente ao estado do cultivo [22].

Este sistema é constituído por um coordenador e um conjunto de nós sensores e controladores, onde cada nó é capaz de comunicar com os outros nós através de um módulo de rádio, formando assim uma topologia de rede em malha.

Os nós sensores (figura 2.17) podem conter até 4 sensores e operam na gama de frequências dos 2,4 GHz (IEEE 802.15.4) e utilizam o protocolo de comunicação *Growflex*. A alimentação dos nós é realizada por baterias de ácido-chumbo carregadas por um painel solar de 5 W [22].

Os nós controladores detêm 8 relés de controlo para ativar os dispositivos de irrigação, sendo a alimentação realizada de igual modo que os nós sensores.



Figura 2.17 - Nó sensor *Rain Bird ClimateMinder* [22].

A comunicação do coordenador com o servidor é efetuada com recurso a um *modem* GSM. A alimentação do coordenador é realizada por baterias de ácido-chumbo carregadas por um painel solar de 20 W [22].

No sistema *ClimateMinder* o servidor encontra-se conectado à internet e contém o *software* que controla todas as operações do sistema *ClimateMinder*.

A figura 2.18 apresenta a aplicação *web* disponibilizada pelo sistema *ClimateMinder*.



Figura 2.18 - *Software ClimateMinder* [22].

O *software* possibilita a consulta por um computador, telemóvel ou *tablet* dos dados em tempo real, bem como dos dados armazenados.

2.4.4. SensorCloud

O *SensorCloud* baseia-se numa rede de sensores sem fios que monitoriza, em tempo real, as explorações vinícolas. Este sistema foi desenvolvido pela *MicroStrain* e foi implementado na exploração *Shelburne Vinetar*, no estado Norte-Americano do Vermont.

O sistema é constituído por nós sensores e uma estação base. Cada nó sensor contém sete sensores, entre os quais, temperatura ambiente, humidade relativa, humidade do solo, humidade da folha e radiação solar. Relativamente aos restantes dois sensores, estes monitorizam a cobertura da rede e a temperatura interna do sistema [23]. A figura 2.19 apresenta o nó sensor comercializado pela *SensorCloud*.



Figura 2.19 - Nó sensor do sistema *SensorCloud* [23].

No sistema *SensorCloud* os nós sensores operam na gama dos 2,4 GHz e foram concebidos tendo em consideração a norma IEEE 802.15.4. A potência de transmissão segundo o fabricante pode ser regulada desde os 0 dBm (≈ 1 mW) até os 16 dBm (≈ 39 mW). Contudo, é importante realçar que em Portugal a autoridade nacional de comunicações (ANACOM) impõe limites máximos na potência de transmissão (10 dBm ≈ 10 mW).

A alimentação do nó sensor pode ser efetuada por uma bateria de iões de lítio de 3,7 V com capacidade de 650 mAh ou por uma alimentação externa com uma tensão contínua que pode variar entre os 3,2 e 9 Volts.

Neste sistema, a estação base WSDA (*Wireless Sensor Data Aggregator*) poderá estar a uma distância máxima de 1 km dos nós sensores. Esta recebe a informação de cada nó sensor e envia a essa informação para a aplicação *web* através de um *modem* GSM de GPRS (*General Packet Radio Service*).

A aplicação *web*, representada na figura 2.20, consiste numa interface onde os utilizadores podem visualizar e controlar os parâmetros de interesse em vários pontos distribuídos pelo cultivo.

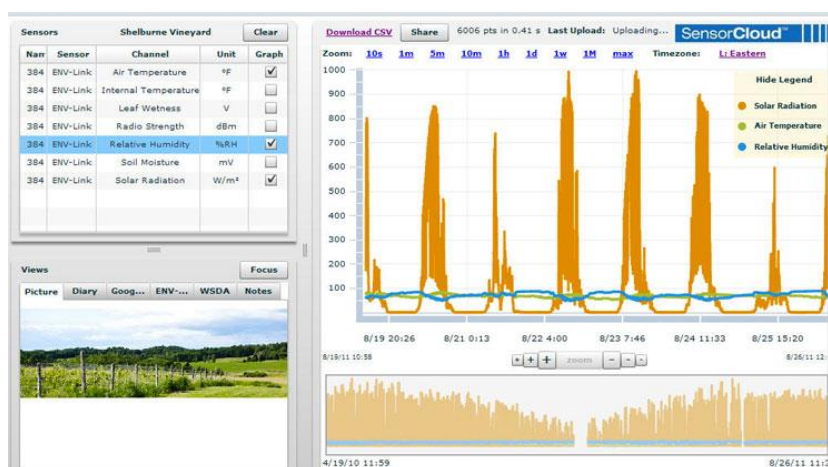


Figura 2.20 - Interface disponibilizada pela *SensorCloud* [23].

A interface *SensorCloud* alerta os utilizadores, caso os parâmetros de interesse atinjam os valores previamente estabelecidos.

2.4.5. i-Farm

O projeto *i-Farm* consiste num sistema de exploração vitícola desenvolvido em Portugal no Instituto Superior de Agronomia de Lisboa, sendo financiado pelo programa DEMTEC da Agência de Inovação.

Esta solução utiliza um *software* para a recolha e análise dinâmica dos dados, provenientes dos sensores distribuídos ao longo do campo de cultivo.

A arquitetura da rede *i-Farm* proporciona o suporte, a recolha e a transmissão em tempo real, dos dados que estão a ser monitorizados e o acesso à Intranet e Internet a partir do cultivo. O acesso à Internet possibilita a recolha de informação do cultivo, bem como o acesso direto [24][25].

O sistema *i-Farm* é composto por nós sensores de monitorização (Fito-sensores e Estação Meteorológica), nós de comunicação (Pontos de acesso sem fios) e um nó coordenador.

Os sensores de monitorização possibilitam a recolha dos diversos tipos de dados, nomeadamente [24][25]:

- Contexto ambiental (edáfica e climática) – temperatura e humidade relativa do ar, temperatura à superfície do solo, humidade do solo, radiação solar, velocidade do vento, precipitação, entre outros.
- Informação da planta (Fito-sensores) – humectação, fluxo de seiva, variação do diâmetro do tronco, temperatura da folha, dimensão do fruto, entre outros.

A recolha de imagens (vídeo/fotográficas) permite a realização de visitas virtuais à exploração. Esta é realizada com recurso a câmaras de vídeo vigilância instaladas em alguns pontos do cultivo.

Os nós sensores utilizados no sistema *i-Farm* consistem nos nós *eKo Pro Series* descritos no sistema *Camalie Networks*.

Os dados monitorizados podem ser consultados numa interface *web*. A figura 2.21 mostra a interface *web* criada para a visualização dos dados oriundos dos sensores de monitorização [24][25].

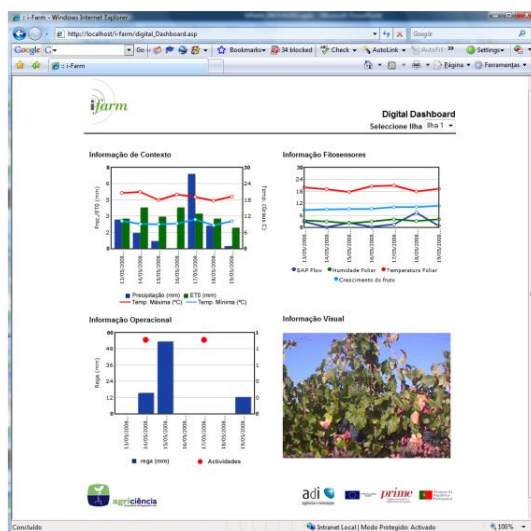


Figura 2.21 - Interface *web* do sistema *i-Farm* [25].

O sistema *i-Farm* permite a recolha, o armazenamento e o tratamento de informação ao longo do tempo.

2.4.6. Projeto Apollo

O projeto Apollo resulta de uma parceria entre o Instituto de Telecomunicações de Aveiro e a PT Inovação e Sistemas, em colaboração com a Escola Superior Agrária de Coimbra e a autarquia local. Este projeto encontra-se em fase de desenvolvimento e tem como principal objetivo a integração e articulação dos dados a partir de sensores que mensuram os vários parâmetros agrícolas.

Esta solução é composta por sete unidades, cada uma contendo vários sensores específicos: temperatura do ar, humidade relativa, temperatura do solo, humidade no solo, radiação solar, humidade ao nível da folha e quantidade de CO₂ [26].

A aplicação permite identificar parâmetros cujos valores estejam fora da gama normal como, por exemplo, falha no sistema de rega, desvios excessivos nos valores de pH da água ou identificar a presença de condições ambientais extremas. Assim, pela comparação dos valores medidos com as regras pré-definidas pelo sistema ou pelo utilizador, o sistema pode emitir alertas, avisando o utilizador de possíveis ocorrências de situações menos favoráveis [26]. A figura 2.22 apresenta o interior de uma das sete unidades colocadas no interior de uma estufa.



Figura 2.22 - Interior de uma unidade das sete unidades presentes na estufa [27].

Os testes têm estado a decorrer na estufa de propagação vegetal da Escola Superior Agrária de Coimbra (ESAC), com apoio de alunos, docentes e investigadores da ESAC que também colaboram no projeto.

2.4.7. Análise das aplicações

Após a abordagem de algumas das aplicações existentes sobre a monitorização e controlo de um sistema de rega por uma rede de sensores sem fios, a tabela 2.5 resume as vantagens e limitações de cada aplicação descrita precedentemente.

Tabela 2.5 - Vantagens e limitações da cada aplicação.

Aplicações	Vantagens	Limitações
<i>Camalie Networks</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização de um protocolo de baixo consumo (DSS, 802.15.4). • Alimentação realizada por baterias do tipo AA de NiMH recarregadas por um painel solar. • Frequência de operação do sistema na gama dos 2,4 GHz. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os nós sensores suportam apenas 4 sensores, dos quais têm de ser da marca <i>Crossbow</i>. • O sistema não permite o controlo de irrigação dos cultivos.
<i>Ranch Systems</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de inserção de vários tipos de sensores. • Calendarização da irrigação do cultivo de forma programada e automatizada e sistema de aviso ou de alertas em tempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os nós sensores não têm permissão para receber qualquer transmissão. • Alimentação realizada por baterias de lítio de baixa capacidade. • O nó sensor RS 100 opera na gama de frequência dos 433 MHz e apenas suporta no máximo dois sensores.
<i>Rain Bird ClimateMider</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Permite o controlo de irrigação (bombas de irrigação, válvulas e injetores de fertilizantes). • Comunicação do coordenador com o servidor por GSM. • O sistema funciona na gama do 2,4 GHz tem em consideração a norma IEEE 802.15.4. • Baterias recarregadas por painel solar. • Sistema de aviso ou de alertas em tempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os nós sensores suportam no máximo 4 sensores.
<i>SensorCloud</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Os nós sensores suportam no máximo 7 sensores. • Monitorização da cobertura da rede do sistema. • O sistema funciona na gama do 2.4 GHz tem em consideração a norma IEEE 802.15.4. • Potência de transmissão regulada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentação realizada por baterias de lítio de baixa capacidade ou por alimentação externa.
<i>i-Farm</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de inserção de vários tipos de sensores. • Recolha de imagens (vídeos/fotografias). • Acesso à Intranet e Internet a partir do cultivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • O sistema suporta apenas quatro sensores pois este utiliza os nós sensores da <i>Camalie Networks</i>. • O sistema não permite o controlo de irrigação.
Projeto Apollo	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de inserção de vários tipos de sensores. • Sistema de aviso ou de alertas em tempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorização em ambientes de estufa.

Tendo em consideração as vantagens e limitações presentes na tabela 2.5 para cada sistema, será desenvolvido um protótipo que realiza a gestão de irrigação dos cultivos. O sistema terá não só alimentação por painéis solares, mas também por energia hídrica, o que permite rentabilizar a quantidade água administrada num determinado tipo de cultivo. Este sistema permitirá a comunicação bidirecional entre coordenador e nó terminal, o que possibilita a intervenção em tempo real na irrigação do cultivo. Outra característica do protótipo consistirá na robustez do controlo de irrigação (válvulas), o que proporciona ao utilizador uma melhor persistência na irrigação do cultivo.

O protótipo a ser desenvolvido, além de monitorizar os parâmetros essenciais dos cultivos, possibilita também ao utilizador a monitorização da cobertura da rede a indicação do nível do sinal de radiofrequência recebido (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*), bem como a produção diária dos painéis solares, do gerador hídrico e do consumo total do sistema.

Por último, o sistema possibilita a introdução de diversos tipos de nós sensores na rede, sem limitação de colocação de sensores nos mesmos.

3. Dispositivos da rede

Neste capítulo são mencionados os requisitos necessários para a concretização do sistema de irrigação, particularmente, os dispositivos que constituem uma rede de sensores sem fios (RSSF) e a plataforma de processamento e de comunicação.

Posteriormente abordam-se as tecnologias dos nós sensores, mais especificamente os sensores e os atuadores que irão ser utilizados no sistema.

Por último, apresentam-se as características dos cultivos onde se pretende testar o sistema de gestão de irrigação.

3.1. Dispositivos de uma RSSF

Uma RSSF, baseada no protocolo *ZigBee* é, normalmente, constituída por três nós distintos: o coordenador, o nó *router* e o nó sensor.

O nó sensor é o elemento mais complexo da rede e é composto principalmente por um controlador, uma memória, um dispositivo de comunicação e uma fonte de alimentação [13]. A figura 3.1 exemplifica a arquitetura do nó sensor.

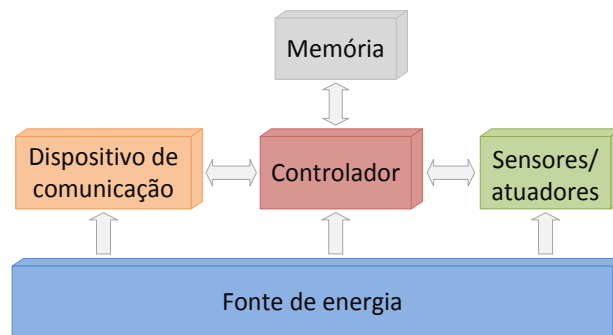


Figura 3.1 - Arquitetura do nó sensor.

No projeto foram desenvolvidos vários nós sensores (estação meteorológica, nós atuadores e nós de monitorização dos parâmetros do solo), tendo em consideração os detalhes e as características indicadas pelos fabricantes, conforme será descrito no capítulo 4 deste trabalho.

3.2. Plataforma de processamento e dispositivo de comunicação

Neste trabalho, a plataforma de processamento utilizada consiste no Arduino fio e o dispositivo de comunicação no XBee série 2 (XB24-Z7WIT) [29]. A seleção destes componentes deve-se à simplicidade de utilização, ao conhecimento adquirido nos mesmos em disciplinas e à adequação ao trabalho.

3.2.1. Arduino fio

O Arduino fio consiste numa plataforma de desenvolvimento que utiliza o microcontrolador ATmega328P, com 1024 B de EEPROM, 2 kB de SRAM e tem uma memória *flash* de 32 KB (dos quais 2 kB são utilizados pelo *bootloader*).

Esta plataforma trabalha com uma tensão de 3,3 V e uma velocidade interna de relógio de 8 MHz, definida pelo cristal presente na placa [28]. No entanto, a velocidade de relógio pode ser ampliada com recurso a um cristal externo. A figura 3.2 ilustra a composição da plataforma de desenvolvimento do Arduino Fio.

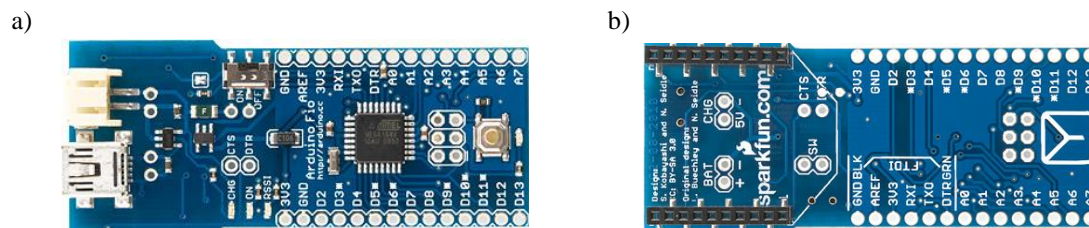


Figura 3.2 - Arduino fio: a) parte superior e b) parte inferior [28].

O Arduino fio usufrui de 14 pinos digitais de entrada/saída, dos quais 6 podem ser utilizados como saídas PWM (*Pulse Width Modulation*) e 2 como interrupções externas. Este dispositivo também possui 8 entradas analógicas e um botão de *reset*. Cada pino de entrada/saída do Arduino fornece uma corrente DC máxima de 40 mA.

A alimentação da placa pode ser efetuada por um cabo USB (*Universal Serial Bus*) conectado diretamente à placa ou por uma bateria de lítio, sendo que o valor de tensão de entrada deverá oscilar entre 3,35 e os 12 V.

A utilização da bateria de lítio possibilita a portabilidade do equipamento e pode ser carregada através do conector da placa, visto que o Arduino dispõe de um circuito de controlo de carga. A tensão de entrada para a carga da bateria deverá variar entre os 3,35 a 7 V.

O Arduino fio proporciona a colocação de um módulo XBee na fase inferior da placa, sendo este um dos fatores determinantes na seleção deste equipamento para o trabalho.

3.2.2. XBee Serie 2 (XB24-Z7WIT)

Os rádios XBee série 2 (XB24-Z7WIT) são desenvolvidos de acordo com as normas do padrão IEEE 802.15.4 [29]. A figura 3.3 apresenta alguns exemplos dos módulos XBee com e sem antenas.

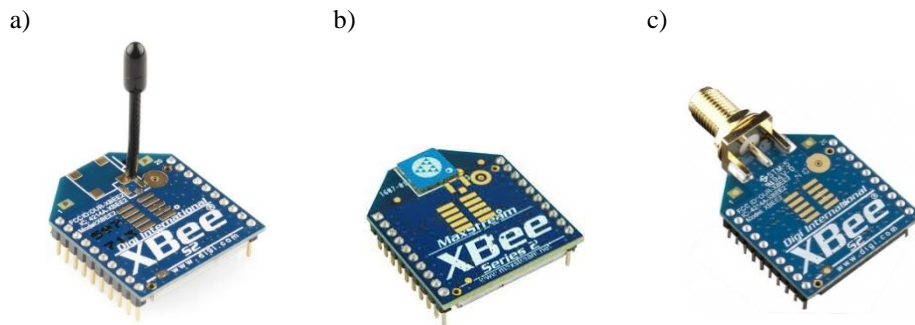


Figura 3.3 - Módulos XBee: a) antena *whip* b) antena *chip* e c) conector RPSMA.

Estes rádios têm como principais características uma frequência de operação na gama dos 2,4 GHz, uma taxa de transmissão até 250 kbps, um consumo em modo de transmissão (TX) e de recepção (RX) de 40 mA para 3,3 V de alimentação. No entanto, o XBee em modo de adormecimento tem um consumo inferior a 1 μ A para uma tensão de 3 V. A potência máxima de transmissão deste equipamento é de 2 mW (3 dBm) e a sensibilidade de -96 dBm [29]. A alimentação do XBee pode ser efetuada numa gama de valores a oscilar entre os 2,1 e 3,6 V. Por último, este módulo possui uma interface UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) para interligar com um microcontrolador, portas E/S digitais ou analógicas e, ainda, uma saída em PWM (*Pulse-Width Modulation*) [29]. No XBee, as portas E/S podem ser configuradas diretamente no módulo ou remotamente pelo *software* X-CTU, disponibilizado gratuitamente pela própria DIGI.

No projeto foi utilizado o XBee com o conector RPSMA, o qual foi atualizado com a última versão de *firmware ZigBee*. Assim, com a utilização do XBee com conector RPSMA é possível inserir na rede antenas de maior ganho, aumentando deste modo, a área de cobertura do sistema implementado.

O XBee tem dois modos de funcionamento: o modo AT (*Transparent mode*) e o modo API (*Application Programming Interface*).

No modo AT os dados recebidos na UART pelo pino RX são colocados numa fila para serem transmitidos por rádio frequência. Estes módulos têm *buffers* para a transmissão e recepção, garantindo, assim, um melhor desempenho na comunicação. A forma de recepção e transmissão de informação é a mesma que numa comunicação série padrão RS232 [29].

Relativamente ao modo API, este utiliza tramas onde se encontram os dados a serem transmitidos, permitindo obter alguns parâmetros de rede e uma comunicação dinâmica. O modo API possibilita a configuração e identificação da fonte e a identificação do destino, sendo este último um dos fatores determinantes na seleção deste tipo de operação nos nós desenvolvidos neste trabalho. A figura 3.4 ilustra os campos integrados de uma trama em modo API.

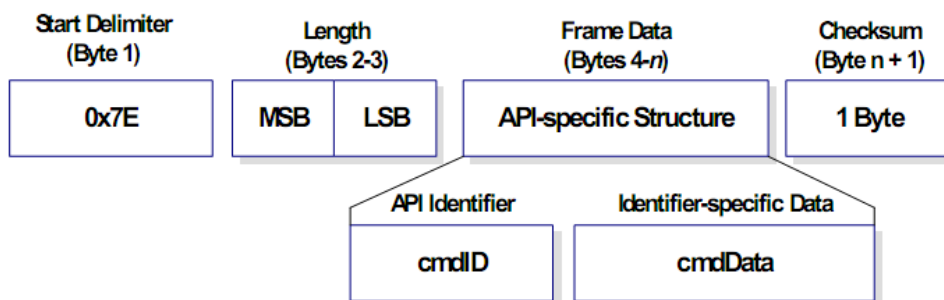


Figura 3.4 - Estrutura da trama no modo de operação API [29].

A trama em modo API é constituída por 4 campos, como mostra a figura 3.4. O primeiro campo *Start Delimiter* define o início da mensagem. O segundo campo, *Length*, especifica o comprimento da mensagem, pelo bit mais significativo (MSB) e pelo bit menos significativo (LSB). O terceiro campo, *Frame Data*, é constituído por um *API Identifier* e o *Identifier-specific Data*. O campo *Identifier-specific Data* pode distinguir o tipo de comando atribuído em *API Identifier*. O quarto e último campo, *Checksum*, é o byte responsável pela deteção/verificação dos erros da mensagem [29].

No presente trabalho foi colocado no campo *API Identifier* o valor de identificação 10, que corresponde somente ao envio de mensagem para a rede, podendo ser enviados 72 bytes por pacote.

3.2.3. Antenas

Neste projeto, e de forma a responder às necessidades de comunicação do sistema (alcance do rádio XBee), foram utilizadas dois tipos de antenas disponíveis em laboratório, a antena monopolo e a antena grelha.

3.2.3.1. Antena monopolo

A antena monopolo, apresentada na figura 3.5, é uma antena omnidirecional que funciona na gama de frequência dos 2,4 GHz.



Figura 3.5 - Antena monopolo.

Esta antena segundo o fabricante tem um ganho de 4,9 dBi e a sua terminação é RP-SMA [30].

3.2.3.2. Antena Grelha

A antena grelha, mostrada na figura 3.6, foi implementada na Universidade da Madeira no âmbito de uma tese de mestrado [13].

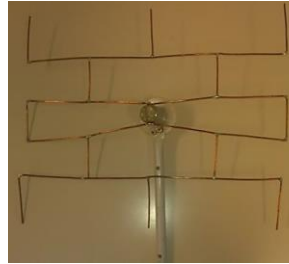


Figura 3.6 - Antena grelha.

Esta antena consiste numa antena diretiva, com um ganho de 9 dBi.

3.2.4. Fonte de energia

A fonte de energia consiste num parâmetro essencial dos nós sensores. Esta pode ser realizada por várias formas, como baterias, utilização de fontes renováveis ou ligado diretamente à rede de energia elétrica.

Neste projeto, foram utilizadas baterias recarregáveis em conformidade com as fontes de energia renovável.

3.2.4.1. Baterias

As baterias utilizadas nos nós sensores são baterias recarregáveis do tipo AA, com uma composição NiMH-HR6 (*Nickel-Metal Hydride*), da marca *Energizer* (ver figura 3.7). Estas baterias têm uma capacidade máxima de 2300 mAh e fornecem uma tensão de 1.2 V [31].



Figura 3.7 - Bateria recarregável *Energizer* do tipo AA.

Estas baterias, segundo o fabricante, podem ser carregadas até a um nível de tensão máximo de 1,4 V. No caso da descarga da bateria, o nível de tensão decresce, podendo atingir o valor de 1,1 V como é possível observar na figura 3.8.

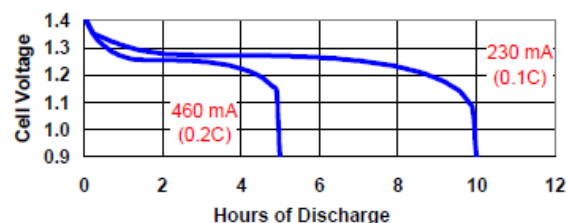


Figura 3.8 - Curva característica da descarga da bateria *Energizer* [31].

No protótipo, a alimentação dos nós sensores foi realizada por um conjunto de quatro baterias ligadas em série, juntamente com dois painéis solares fotovoltaicos também ligados em série. A utilização de um *pack* de quatro baterias ligadas em série deve-se ao facto de o Arduino fio apenas trabalhar com um valor mínimo de tensão de 3,35 V.

3.2.4.2. Painel Solar

O painel solar de baixa potência, disponível em laboratório e utilizado no trabalho, consiste no modelo MSX-005F de 0,5 W, fabricado pela *BP Solar*, ilustrado na figura 3.9.



Figura 3.9 - Painel *BP SOLAR* MSX-005F de 0,5 W.

Este painel apresenta as seguintes características [32]:

- Tensão em circuito aberto: 4,6 V;
- Corrente em curto-circuito: 160 mA;
- Tensão típica em carga: 3,3 V;
- Corrente típica em carga: 150 mA.

No trabalho foi necessário ter em consideração as curvas características do painel solar de 0,5 W, para encontrar o ponto de máxima transferência (MPP - *Maximum Power Point*). As curvas características do painel solar encontram-se representados na figura 3.10.

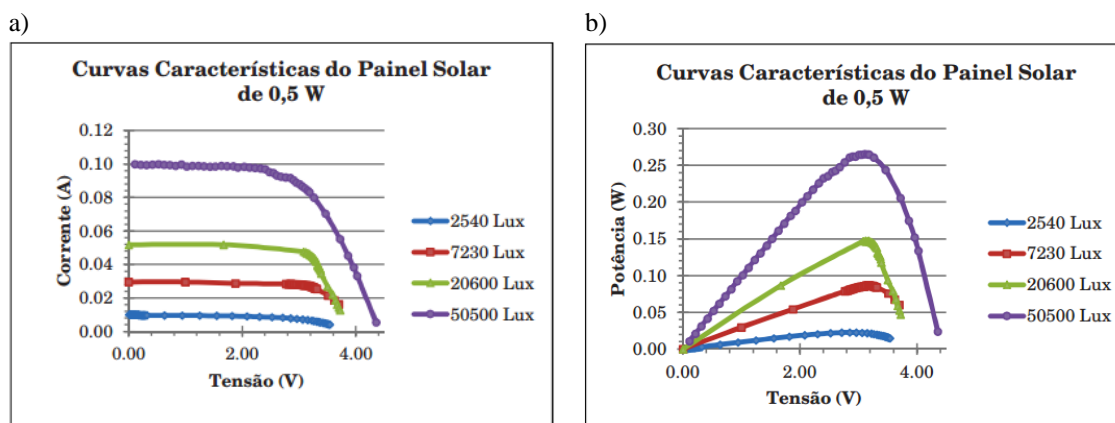


Figura 3.10 - Curvas características do painel solar MSX-005F de 0,5 W: Curva I/V e b) Curva P/V.

A luminosidade ao meio dia, num dia claro, ronda os 120 000 lux ($1lx=1lm/m^2$).

Na figura 3.10 verifica-se que o MPP do painel solar encontra-se situado em torno dos 3,1 V. Todavia, o efeito da temperatura influencia o resultado do MPP do painel solar.

3.2.4.3. Modelo de carregamento de baterias ON-OFF

Na alimentação dos nós sensores optou-se por utilizar um modelo de carregamento do tipo ON-OFF. Este modelo não necessita de funções adicionais do microcontrolador, o que permite uma rentabilização do consumo energético total do nó sensor (estação meteorológica). A figura 3.11 mostra o diagrama de blocos geral do modelo ON-OFF.

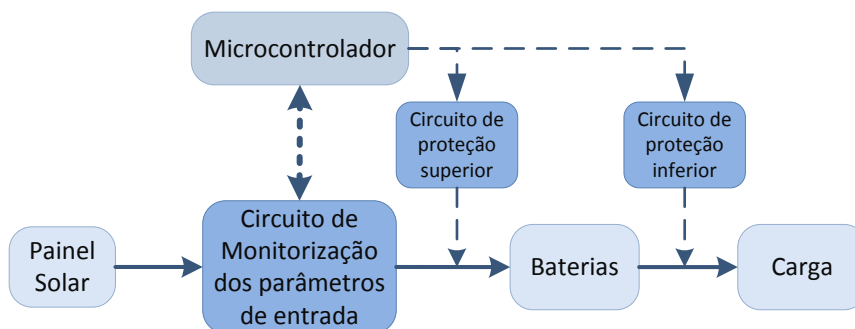


Figura 3.11 - Diagrama de Blocos do modelo de carregamento ON-OFF.

O modelo ON-OFF não utiliza um controlo de carga para a máxima transferência de potência. Este modelo pode ser mais adequado para aplicações de baixa potência, visto que o microcontrolador não necessita de estar no modo ativo. Todavia, é necessário ter em atenção o nível de tensão máximo e mínimo admissível pelas baterias e efetuar um circuito de proteção para as mesmas.

O circuito de proteção das baterias consiste, essencialmente, num relé que comuta de estado quando a tensão das baterias ultrapassa o valor pré-definido no microcontrolador (ATmega328P). Neste trabalho, o relé escolhido foi o *Omeron latching relay G6-JU-2FS-Y*, ilustrado na figura 3.12.

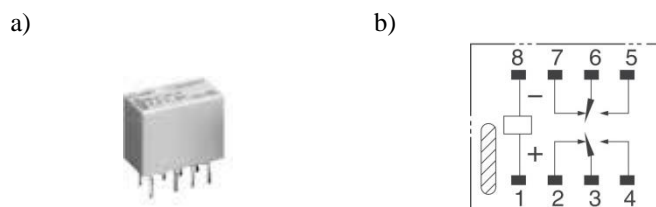


Figura 3.12 - *Omeron latching relay G6-JU-2FS-Y*: a) relé e b) circuito interno [33].

O relé comuta de estado quando recebe um impulso de amplitude de 3 V. Este impulso é fornecido por dois pinos digitais do Arduino fio.

A seleção do relé foi baseada no facto deste ser *latching* (biestável), ou seja, quando é aplicada uma determinada corrente nos pinos *set* e *reset*, o relé comuta de estado, permanecendo nesse estado mesmo quando é desligado a corrente. Este relé tem como vantagem o seu consumo (33,7 mA), pois esta apenas ocorre no ato da comutação de estado.

3.3. Sensores e Atuadores

Nesta secção serão abordados os sensores utilizados no trabalho para a monitorização e controlo de um sistema de rega por uma rede de sensores sem fios.

A utilização dos sensores na agricultura tem como finalidade a aquisição dos parâmetros climáticos e de outras variáveis relacionadas com a cultura aplicada. Assim, pela conciliação dos dados adquiridos, é possível verificar a evolução da cultura e atuar em caso de necessidade no processo de irrigação do cultivo.

3.3.1. Sensores

A implementação de uma rede de monitorização com fins agrícolas necessita da utilização de diversos sensores e dos seus circuitos de condicionamento de sinal. Alguns dos sensores referem-se à monitorização de parâmetros climáticos e outros são aplicados à medição de variáveis relacionadas com as culturas.

Na realização deste projeto foram utilizados os seguintes sensores para monitorização dos parâmetros ambientais: temperatura, humidade relativa, anemómetro, piranómetro e pluviómetro. Relativamente aos sensores com fins agrícolas, utilizaram-se os seguintes sensores: sensor de humidade da folha, sensor de humidade do solo, sensor de temperatura do solo e sensor de humidade que mede a tensão de água (em kPa) no solo.

3.3.1.1. Sensor de temperatura e humidade relativa

O sensor utilizado para a medição da temperatura e da humidade relativa foi o SHT11 da *Sensirion* apresentado na figura 3.13. Este sensor possui um sinal de saída digital, adquirido por um canal série utilizando um ADC (*Analog-to-Digital Converter*) de 14 bits [34]. A preferência deste tipo de sensor para o trabalho deve-se ao facto de ele ter uma boa resolução nas medições, dimensões reduzidas, o que facilita a sua colocação no exterior e também de o consumo dele ser relativamente baixo.



Figura 3.13 - Sensor SHT11 da *Sensirion* [34].

O sensor SHT11 é composto por dois sensores com tecnologia CMOS colocados num único chip. A tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) aumenta a fiabilidade e a estabilidade dos sensores. A figura 3.14 ilustra a gama de valores para a qual o SHT11 torna-se mais preciso.

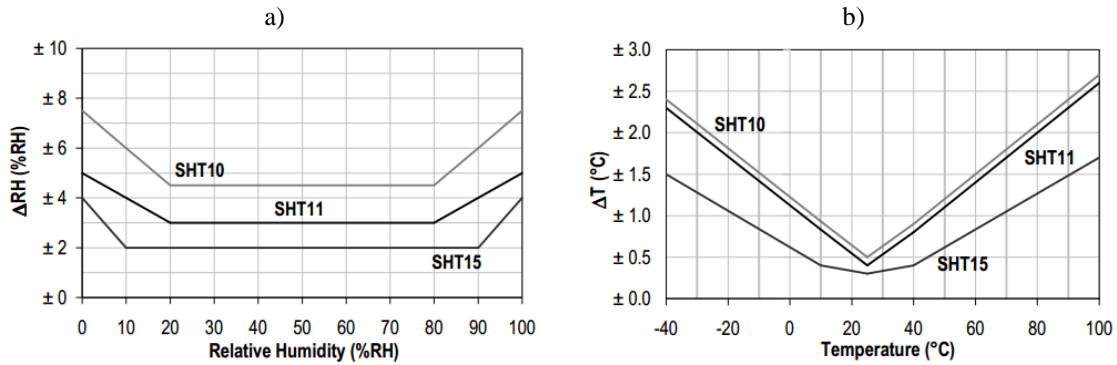


Figura 3.14 - Gama de valores do SHT11: a) RH-tolerância máxima a 25 ° C no sensor de humidade e b) T tolerância máxima no sensor de temperatura [34].

O valor da temperatura do SHT11 é obtido pela seguinte equação:

$$Temp = Amostra_{Temp} * 0.01 - 40 \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (3.1)$$

com $Amostra_{Temp}$ a corresponder a amostras realizadas pelo sensor num determinado intervalo de tempo. A humidade é determinada por:

$$Hum = (Temp - 25) * (t_1 + t_2 * Amostra_{Hum}) + C_1 + C_2 * Amostra_{Hum} + C_3 * Amostra_{Hum}^2 \text{ (%)} \quad (3.2)$$

em que $t_1 = 0,01$; $t_2 = 0,00008$; $C_1 = -4$; $C_2 = 0,0405$ e $C_3 = -0,0000028$.

A tensão de alimentação recomendada está compreendida numa gama de valores entre 2,4 e 5,5 V, o que engloba a gama de tensões de alimentação do Arduino fio.

O esquema da ligação do sensor SHT11 com o microcontrolador encontra-se ilustrado na seguinte 3.15.

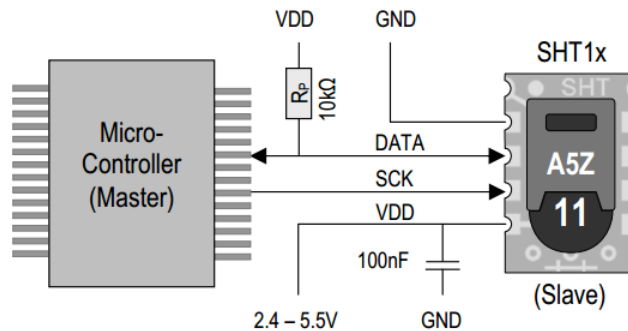


Figura 3.15 - Ligação física do sensor SHT11 com o microcontrolador [34].

O sensor SHT11 tem quatro pinos (ligações): massa (GND), dados ($DATA$), relógio (SCK) e alimentação (V_{DD}).

O pino $DATA$ é utilizado na transferência de dados entre o sensor e o microcontrolador e vice-versa. Nesta ligação é necessário colocar uma resistência para estabilizar a tensão, ou seja, colocar o sinal no estado *high* (*pull-up*). O pino SCK realiza a sincronização na permuta de dados entre o controlador e o sensor. O sensor é alimentado por uma tensão de 3,3 V, sendo colocado um condensador entre o pino de alimentação e a massa, de modo a filtrar as variações bruscas no sinal de entrada [34].

Por fim, o fabricante disponibiliza o código em linguagem C para ser carregado no microcontrolador, garantindo assim o correto funcionamento do sensor.

3.3.1.2. Anemómetro

O anemómetro é um dispositivo de medição da velocidade do vento. Este habitualmente utiliza copos armados sobre um eixo vertical que circulam com a passagem do vento. Alguns anemómetros estão equipados com um dispositivo de medição da direção do vento (cata-vento).

Para medição da direção e velocidade do vento, o anemómetro disponível e utilizado no trabalho consistiu no sensor 7911 da *Davis Instruments*, apresentado na figura 3.16. Este sensor tem a particularidade de poder medir a velocidade do vento entre 1 a 322 km/h ou 0,5 a 89 m/s [35].



Figura 3.16 - Anemómetro 7911 da *Davis Instruments* [36].

O sensor 7911 contém um anemómetro e um cata-vento, os quais são dispositivos analógicos passivos, ou seja, não necessitam de alimentação. Contudo, o anemómetro responde a um breve impulso de excitação de modo a determinar a direção do vento. Relativamente aos impulsos de velocidade do vento, estes são criados por um interruptor magnético de leitura com lâmina mecânica selada [36].

No anemómetro, o vento faz com que, por cada rotação completa dos copos, crie um ciclo de fechamento no interruptor, ou seja, os copos ao girar rodam o íman e, a cada passagem do íman, o interruptor de leitura fecha. Inicialmente, o interruptor magnético de leitura encontra-se no estado aberto, 3 V, mas fecha brevemente e apenas quando o íman está perto do interruptor, 0 V [36].

A direção do vento é detetada pelo cata-vento (agulha) que encontra-se colocado por cima dos copos de vento (ver figura 3.16). Deste modo, com as mudanças de direção de vento, o cata-vento segue a direção, alterando assim a resistência do terminal deslizante do potenciómetro.

Na direção do vento é enviado um impulso de tensão (impulso de excitação) para o anemómetro e este é aplicado ao terminal *cw* do potenciómetro, ver figura 3.17. A agulha mecânica utiliza este impulso de excitação, que, dependendo da posição angular da agulha, retorna uma porção do impulso.

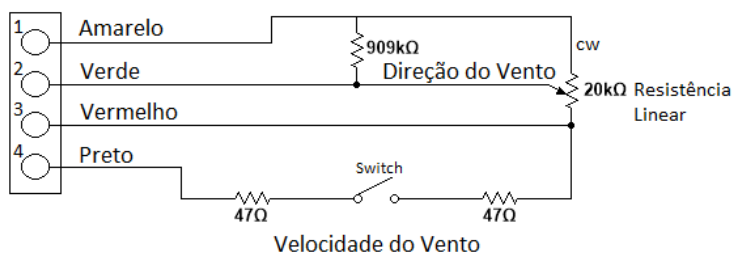


Figura 3.17 - Circuito de condicionamento do anemómetro [36].

O circuito de condicionamento do anemómetro possui quatro terminais, sendo os mesmos, amarelo, verde, vermelho e preto.

O terminal amarelo corresponde ao impulso de excitação com amplitude 3 V introduzido no anemómetro para a deteção da direção do vento, o terminal verde retorna o sinal de direção do vento, o terminal preto corresponde ao sinal de velocidade do vento e o terminal vermelho, que é comum às duas ligações (velocidade do vento e direção do vento), realiza a massa do equipamento [36].

Relativamente à resistência fixa de 909 kΩ colocada entre o terminal amarelo e o terminal verde, esta faz com que a direção indicada no cata-vento permaneça no estado norte (ponto de referência) quando o circuito está em aberto.

Por último, no terminal preto existem duas resistências de 47 Ω colocadas em série com o interruptor magnético de leitura (*switch*) de modo a protegerem o interruptor em caso de curto-circuito entre o terminal preto e o terminal vermelho [36].

3.3.1.3. Piranómetro

O piranómetro consiste num sensor que mede a soma das componentes direta e difusas de radiação solar incidentes, sendo as unidades dadas por W/m^2 . Neste trabalho, o piranómetro utilizado consistiu no sensor 6450 da *Davis Instruments*, representado na figura 3.18a), sendo a resposta do sensor em função do ângulo de luz incidente, ilustrada pela figura 3.18b).

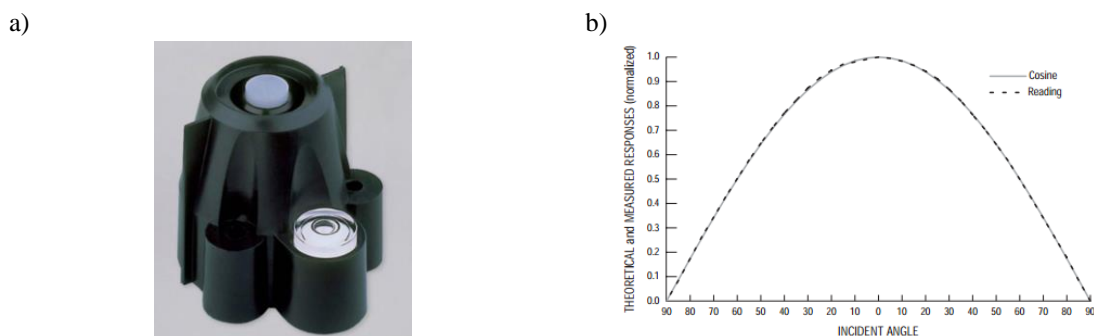


Figura 3.18 - Piranómetro: a) sensor 6450 da *Davis Instruments* e b) resposta em função do ângulo de incidência [37].

O piranómetro inclui um circuito interno de conversão da corrente do fotodíodo em tensão e apresenta as ligações indicadas na figura 3.19.

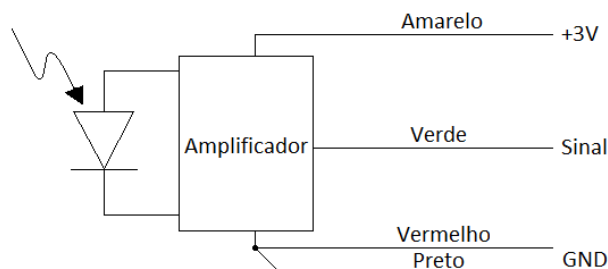


Figura 3.19 - Esquema de ligações do sensor 6450 [37].

Observando a figura 3.19, verifica-se que a alimentação do piranómetro é realizada pelo fio amarelo com uma tensão $3\text{ V} \pm 10\% @ 1\text{ mA}$. A massa é efetuada pelos fios: vermelho e preto. A saída do piranómetro é dada em tensão, pelo fio verde, com um valor de $1,67\text{ mV por } W/m^2$. Assim, a radiação solar (RS) é obtida por:

$$RS = \frac{V_{out}}{1,67 \times 10^{-3}} (W/m^2) \quad (3.3)$$

A gama de operação de saída do sensor 6450 varia entre 0 e 3 V, o que corresponde a uma gama entre 0 e 1800 W/m^2 , respetivamente, sendo esta tensão de saída lida pelo microcontrolador [37].

3.3.1.4. Pluviómetro

O pluviómetro consiste num sensor que se destina a registar a quantidade de precipitação ocorrida num determinado intervalo de tempo, sendo o valor de precipitação expresso em mm/m^2 (milímetros por metro quadrado). Assim, um milímetro de chuva corresponde a 1 litro por metro quadrado de água na superfície.

Porém, a medida de precipitação pode ser afetada pela localização do sensor, pela deposição de poeira, folhas e outros detritos, devendo o mesmo ser inspecionado regularmente para limpeza.

O pluviómetro disponível e utilizado neste trabalho consiste no sensor 7852 da *Davis Instruments*, representado na figura 3.20.



Figura 3.20 - Sensor 7852 da *Davis Instruments* (pluviómetro).

O funcionamento deste sensor baseia-se na comutação de um interruptor magnético, sempre que uma dada quantidade de chuva é recolhida pelo coletor.

Cada comutação do sensor 7852 corresponde a $0,2\text{ mm}$ de água de chuva. A figura 3.21 ilustra o circuito de condicionamento do pluviómetro [38].

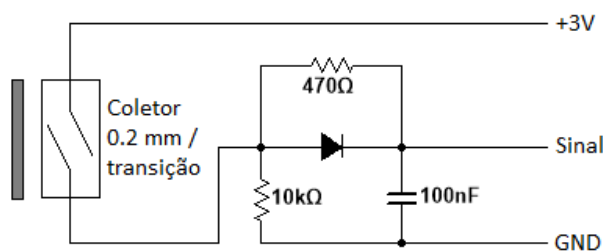


Figura 3.21 - Circuito de condicionamento do pluviómetro [39].

No circuito de condicionamento, o pluviómetro é alimentado por uma tensão de 3 V e o sinal de saída contém um filtro do tipo passa baixo para permitir a passagem de baixas frequências. O filtro passa baixo é um filtro passivo constituído por um circuito RC em série.

3.3.1.5. Sensor de humidade da folha

O sensor de humidade da folha disponível no momento em laboratório e utilizado no trabalho tem por designação *Leaf Wetness Sensor* (ver figura 3.22). Este sensor é essencialmente um sensor resistivo [40].



Figura 3.22 - Sensor de humidade da folha [40].

O sensor de humidade da folha é comercializado pela empresa *Spectrum Technology* que, segundo o fabricante, apresenta as seguintes características [40]:

- Alimentação: 3 V a 5 V @ 6 mA a 10 mA;
- Saída: 0 a 2,71 V para uma alimentação de 3 V

A saída do sensor é dada na gama desde 0 (para um estado da folhagem da planta seca) a 15 (para um estado de folhagem da planta molhada), sendo a calibração efetuada por [40]:

$$Hum (\%) = \begin{cases} 15 & V_{out} < 0,14 \\ 15,2 - 5,2V_{out} & 0,14 \leq V_{out} \leq 2,71 \\ 0 & V_{out} > 2,71 \end{cases} \quad (3.4)$$

onde V_{out} é a tensão lida no sensor e os valores necessitam de ser arredondados à unidade.

O sensor de humidade *Leaf Wetness Sensor* contém no seu terminal um conector do tipo *jack* macho de 2,5 mm, como mostra a figura 3.23.

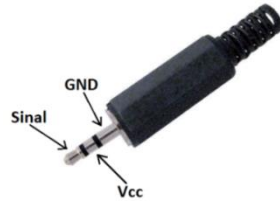


Figura 3.23 - Conector *jack* macho de 2,5 mm.

Na figura 3.23 visualiza-se a disposição das ligações do conector *jack*, onde V_{cc} corresponde à ligação de alimentação, o *GND* à ligação da massa e o *Sinal* retorna a tensão lida no sensor.

3.3.1.6. Sensor de humidade do solo

A medição da humidade do solo será efetuada pelo sensor disponível no momento em laboratório da marca *WaterScout* comercializado pela empresa *Spectrum® Technologies*, representado na figura 3.24.



Figura 3.24 - Sensor de humidade do solo *Waterscout* [41].

O sensor *Waterscout*, segundo o fabricante, possui as seguintes características [41]:

- Gama: 0 % VWC (*Volumetric Water Content*) até à saturação;
- Alimentação: 3 a 5 V @ 6 a 10 mA;
- Saída: tensão analógica de 0,5 – 1,5 V para 3 V de excitação;
- Resolução: 0,1% VWC;
- Precisão: 3% VWC @ EC (*Electrical Conductivity*) < 8 mS/cm

Estes sensores são colocados no subsolo e têm a seguinte curva de calibração [41]:

$$WVC(\%) = \begin{cases} 0 & \frac{V_{out}}{V_{in}} \leq 0,29 \\ 65,29 \frac{V_{out}}{V_{in}} - 19,13 & 0,29 < \frac{V_{out}}{V_{in}} \leq 0,34 \\ 380,46 \left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)^2 - 1575,24 \frac{V_{out}}{V_{in}} + 263,52 & 0,34 < \frac{V_{out}}{V_{in}} \leq 0,5 \end{cases} \quad (3.5)$$

onde V_{in} corresponde à tensão de alimentação (3 V) e V_{out} corresponde ao valor de saída do sensor [18].

3.3.1.7. Sensor de temperatura do solo

A aquisição dos valores de temperatura do solo foi realizada por um termístor NTCASCWE3, da *Visbay*, ilustrado na figura 3.25 [42]. A preferência deste tipo de sensor para a medição da temperatura do solo deve-se ao facto de ser um sensor robusto, económico e ter um consumo muito baixo.



Figura 3.25 - Sensor de temperatura do solo termistor NTCASCWE3.

O termistor NTCASCWE3, segundo o seu fabricante, possui as seguintes características [42]:

- Resistência a 25 °C: $R_{25} = 10 \text{ k}\Omega$;
- Constante do termistor a 25 °C: $B_{25} = 3977$;
- Máxima potência dissipada: 500 mW.

Para realizar a medição da temperatura, o termistor necessita de um circuito divisor resistivo, com uma tensão de alimentação de 3 V, e a resistência dada em função da seguinte equação [42].

$$R = 27000 \left(\frac{V_{in}}{V_{out}} \right) - 1 (\Omega) \quad (3.6)$$

sendo V_{in} a tensão de alimentação do sensor e V_{out} o valor de lido.

A temperatura do termistor pode ser obtida a partir da seguinte expressão [42]:

$$T = \frac{298 * B_{25}}{B_{25} + 298[\ln(R) - \ln(R_{25})]} - 273 (^{\circ}\text{C}) \quad (3.7)$$

O termistor utiliza um conector semelhante ao do sensor de humidade da folha.

3.3.1.8. Sensor de humidade *Watermark*

O sensor *Watermark* consiste num outro tipo de sensor utilizado para a monitorização da humidade do solo (ou teor de água no solo) [43]. Este sensor encontra-se representado na figura 3.26.



Figura 3.26 - Sensor de humidade *Watermark*.

O *Watermark* consiste numa resistência elétrica de estado sólido, delineada para monitorizar a tensão de água (em kPa) no solo. Como o valor de tensão do sensor altera-se com a presença de água, o valor da resistência elétrica do sensor também se altera.

A medição da resistência elétrica do sensor de humidade é realizada pela passagem de uma corrente AC (*Alternating Current*), o que implica utilizar um circuito de condicionamento, como mostra a figura 3.27, uma vez que o nó sensor apenas disponibiliza corrente DC (*Direct Current*) [44].

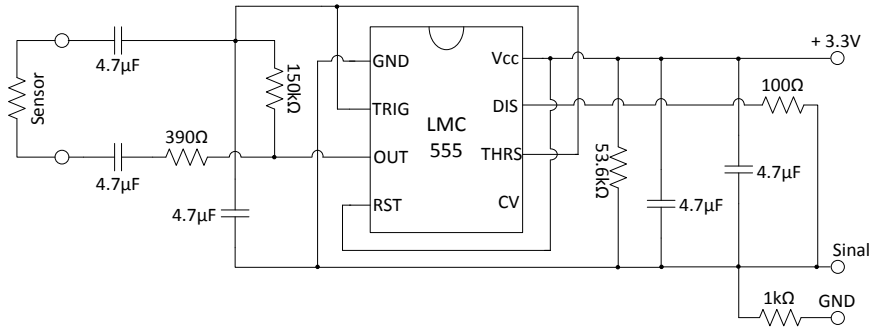


Figura 3.27 - Circuito de dimensionamento do sensor *Watermark*.

Segundo o fabricante, este sensor tem como principais características:

- Alimentação: 3 a 12 V;
- Resistência: 550 a 28705 Ω;
- Tensão do solo (ST): 0 a 200 kPa.

Além do circuito de dimensionamento, é necessário realizar a calibração do sensor em função de uma curva de calibração dada por [45]:

$$R(\Omega) = \begin{cases} 28075 & V_{out} < 0,28 \\ 3 \times 10^{0,8} e^{-33,9V_{out}} & 0,28 \leq V_{out} < 0,303 \\ 33,9V_{out}^{-4,6} & 0,303 \leq V_{out} < 0,534 \\ 10644V_{out}^2 - 17196V_{out} + 7130 & 0,534 \leq V_{out} < 0,694 \\ -1622 \ln(V_{out}) - 275 & 0,694 \leq V_{out} < 0,844 \\ 0 & V_{out} \geq 0,844 \end{cases} \quad (3.8)$$

Posteriormente, a resistência $R(\Omega)$ é convertida em tensão do solo (ST) pela seguinte equação [45]:

$$ST(KPa) = \begin{cases} 0 & R < 550 \\ 0,02R - 11 & 550 \leq R < 1000 \\ 7 \times 10^{-8}R^2 + 0,004R + 4,187 & 1000 \leq R < 28075 \\ 200 & R \geq 28075 \end{cases} \quad (3.9)$$

O *Watermark*, apesar de utilizar apenas dois fios, possui um terminal conector igual ao terminal do sensor de humidade da folha.

3.3.1.9. Sensor de Corrente MAX9929F

No projeto o sensor de corrente utilizado foi o MAX9929FF, uma vez que este apresenta uma gama de entrada compreendida entre -0,1 a +28 V, baixa corrente de alimentação 20 μA e uma precisão de ganho superior a 1,0 %. No MAX9929F, a saída do sinal digital indica a direção do fluxo de corrente, permitindo ao utilizador mensurar as correntes de carga e descarga de baterias. A figura 3.28 mostra o sensor de corrente MAX9929F [46].

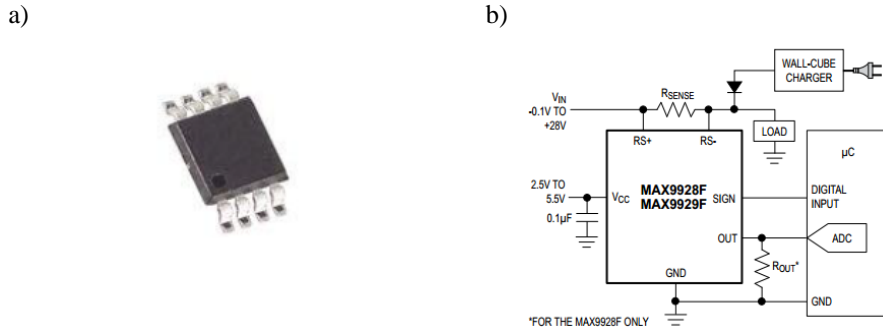


Figura 3.28 - Sensor de corrente MAX9929F: a) imagem do sensor e b) circuito de operação.

O MAX9929F apresenta uma saída de corrente com uma relação transcondutância de $5 \mu\text{A/mV}$. No caso, de o sensor de corrente utilizado ser o MAX9928F, este sensor, tem uma saída de tensão onde integra uma resistência de saída de $10 \text{ k}\Omega$ para um ganho de tensão de 50 V/V .

A tensão de saída do sensor é dada por [46]:

$$V_{out} = (R_{sense} \times I_{sense}) \times (A_V) \quad (3.10)$$

onde R_{sense} corresponde à resistência colocada entre os terminais RS^+ e RS^- do sensor, I_{sense} é a corrente máxima presente no circuito e o A_V é o ganho de tensão.

3.3.2. Atuadores

Nesta seção são considerados dois tipos de atuadores. O primeiro atuador permite a abertura da válvula principal do sistema de rega e o segundo consiste numa válvula de controlo de rega que possibilita a rega de uma zona seleccionada.

3.3.2.1. Válvula principal

A válvula principal consiste no primeiro atuador de uma instalação de rega e tem como principal função a abertura da conduta principal do sistema de rega. Este atuador fica colocado na parte montante do sistema de rega. Neste trabalho, a válvula principal utilizada foi a eletroválvula J3-L55 (ver figura 3.29) comercializada pela empresa J.J. BCN Internacional [47].



Figura 3.29 - Eletroválvula principal J3-L55.

A eletroválvula J3-L55 tem como principais características:

- Alimentação: 12-24 AC (1 fase) ou DC;
- Tempo de operação (0-90° sem carga): 16 s;

- Torque máximo ($T_{m\acute{a}x}$): 60 N.m;
- Consumo de corrente: 24 V AC e $T_{m\acute{a}x}$: 1,24 A;
24 V DC e $T_{m\acute{a}x}$: 1,43 A;
12 AC e $T_{m\acute{a}x}$: 2,98 A;
12 V DC e $T_{m\acute{a}x}$: 3,18 A.

3.3.2.2. Válvula de controlo de rega

As válvulas de controlo de rega constituem o segundo atuador do sistema de rega e encontram-se ligadas em cada tubo que deriva da válvula principal. Esta válvula tem por função a rega de uma determinada área ou cultura. A válvula utilizada para este tipo de função consiste na eletroválvula *Rain Bird DV-075*, ilustrada na figura 3.30 [48].



Figura 3.30 - Eletroválvula *Rain Bird DV-075*.

A eletroválvula *Rain Bird DV-075* requer uma tensão de alimentação de 9 V DC e um débito que pode ser regulável entre 0,05 a 5 m³/h. A pressão de funcionamento está compreendida entre 1 a 10,4 bar (a 23 °C), sendo que a temperatura máxima da água é 43 °C.

3.4. Características dos cultivos selecionados

Neste trabalho, a seleção dos cultivos teve em consideração o tipo de cultivo praticado na Região Autónoma da Madeira (RAM), sendo o mais saliente a produção de banana. Outro cultivo, também praticado na RAM consiste na plantação de morangos. Deste modo, ajustou-se o protótipo do sistema de rega tendo em conta as especificações dos dois tipos de cultivos, a nível do crescimento, clima, solo, irrigação e fertilização.

3.4.1. Bananeira

A bananeira (figura 3.31), de nome científico *Musa.sp*, pertence à família *Musaceae* e consiste numa planta herbácea caracterizada pela exuberância das suas formas e dimensões das folhas. Esta planta tem um caule curto e subterrâneo (rizoma) de onde saem as raízes. O fruto (bananas) forma-se em cachos na parte superior do falso caule ou “pseudocaulis”. O falso caule é formado pela união das bainhas (bases) das folhas e termina com uma copa de folhas longas e largas.

Os cachos de bananas, pendurados na extremidade do falso caule da bananeira, podem ter 5 a 20 pencas e pesar entre 30 a 50 kg.

As bananas, originárias do sudeste da Ásia, são cultivadas em mais de 130 países e são o quarto produto alimentar mais produzido a nível mundial, seguidamente ao arroz, trigo e milho.

Em média, cada banana pesa 125 g e tem uma composição de 75% de água e 25% de matéria seca. As bananas são uma fonte notável de fibras, potássio, vitamina A e vitamina C [6].



Figura 3.31 - Bananeira.

O cultivo da bananeira pode ser efetuado ao longo de todo o ano, não existindo um mês apropriado para a sua plantação. Porém, é aconselhado que a plantação das mudas seja calendarizada de forma a abranger a produção em todo o ano.

Depois da plantação das mudas, demorará aproximadamente 10 a 15 meses para a bananeira produzir a primeira inflorescência terminal, onde irá dar origem ao cacho [49].

3.4.1.1. Clima

A plantação de bananas é recomendada para regiões com uma temperatura compreendida entre os 10 e os 40 °C. Contudo, outro fator a ter em consideração no cultivo destas plantas consiste na velocidade do vento. O vento, quando atinge velocidades acima dos 80 km/h, pode remover a planta do solo e causar danos nos frutos [50].

3.4.1.2. Solo

A bananeira consiste numa planta cujas raízes não excedem a profundidade de um metro, pelo que poderão ser cultivadas em solos pouco profundos. Todavia, para uma melhor produção da planta, o solo deverá ser rico em matéria orgânica e ter uma boa capacidade de retenção de água e de drenagem.

Outro fator relevante a ter em consideração no solo traduz-se no seu pH, pois solos com um pH superior a 8 não são aconselhados para a plantação do cultivo. No entanto, solos ligeiramente alcalinos poderão apresentar vantagens na prevenção de doenças [50].

3.4.1.3. Irrigação

Os métodos de irrigação mais apropriados e utilizados na irrigação do cultivo de banana são a microaspersão e a rega por gota-a-gota [50][51]. Na figura 3.32 estão ilustrados os dois métodos.



Figura 3.32 - Métodos de irrigação: a) Microaspersão e b) rega gota-a-gota.

As necessidades hídricas da bananeira devem ser determinadas de modo a quantificar o volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) ou a lâmina ($mm \cdot ha^{-1}$) de água a ser aplicada no solo pelo sistema de irrigação. Este cálculo pode ser efetuado a partir da evapotranspiração diária, ET_0 , (Capítulo 2, equação (2.1)) e do coeficiente de cultivo, K_c (equação (2.3)).

Na Ilha da Madeira, o centro de Bananicultura realizou um estudo, com a duração de quatro, anos no Lugar de Baixo, Ponta do Sol, num sistema de rega localizado por microaspersão, sobre o consumo de água na cultura da bananeira. Desse estudo, verificou-se que, em média, são necessários cerca de 28 litros de água diários por bananeira, com temperatura média anual de $21^\circ C$ [51].

Depois das necessidades hídricas do cultivo estarem definidas, é necessário instituir a periodicidade de rega, tendo em consideração o sistema de irrigação.

Para otimizar os turnos de rega, os tensiómetros deverão ser colocados aleatoriamente, de acordo com a variabilidade espacial do solo. Assim, os tensiómetros deverão ser instalados a 40 cm de profundidade do solo, sendo que, nesta profundidade, encontra-se aproximadamente 80% do sistema radicular de absorção da banana. A leitura dos tensiómetros para o correto desenvolvimento do cultivo deverá oscilar entre os 70 e 100% de água disponível no solo [51]. Paralelamente, deverão ser construídas as curvas de retenção do solo, tendo em conta o perfil do terreno encontrado para otimizar o regime de rega.

3.4.2. Morangueiro (*Fragaria vesca*)

O morangueiro (figura 3.33), de nome científico *Fragaria vesca*, pertence à família *Rosaceae* e consiste numa planta rasteira, herbácea e perene, ou seja, é uma planta com um ciclo de vida longo, da qual forma uma espessa roseta ao nível do solo [52]. A planta do morangueiro é composta por um caule curto (designado por coroa), folhas trifoliadas ligadas à coroa por pecíolos. Esta planta tem um sistema radicular

fasciculado, constituído por inúmeras raízes e propaga-se por via vegetativa, através dos estolhos como mostra a figura 3.33.



Figura 3.33 - Morangueiro.

Na realidade, o que conhecemos como morango é na verdade o receptáculo da flor que se tornou carnudo, suculento e avermelhado. Os verdadeiros frutos são os aquênios, pequenos frutos secos na superfície do morango [53].

Relativamente ao calendário de cultivo dos morangos, a colheita destes inicia-se 30 a 40 dias após o início da floração, podendo prologar-se por 3 a 4 meses.

Em Portugal, como é habitual utilizar plantas frescas de altitude em cultivares não reflorescentes, o período de colheita varia consoante a região do país, nomeadamente, entre o mês de novembro a meados de abril [52].

3.4.2.1. Clima

O morangueiro é uma planta de climas frescos e húmidos, embora esta planta possua uma boa adaptação a climas quentes e secos, caso exista água para a sua irrigação.

Esta planta tem como preferência zonas onde a temperatura média oscila entre os 23 e 25 °C, visto que, nesta gama de temperaturas a planta tem maior produtividade. No entanto, ao longo do seu ciclo cultural, o morangueiro necessita de outras gamas de temperatura ambiente para o seu bom desenvolvimento, mais precisamente [52]:

- Entre 10 a 18 °C, durante o período vegetativo;
- Próximo de 10 °C na indução floral;
- Inferior a 7 °C durante o período de repouso vegetativo.

Na fase de floração, a parte vegetativa da planta é muito resistente às geadas. Contudo, o mesmo não sucede com as flores, pois estas são danificadas a temperaturas inferiores a 0 °C.

Outro parâmetro de grande influência na atividade vegetativa do morangueiro é o fotoperíodo. Este influencia principalmente a época de produção da diferenciação floral (transformação de alguns gomos em flores) [52].

3.4.2.2. Solo

A planta do morangueiro é sensível a solos compactos, pois têm tendência a encharcar-se em períodos de abundante água, particularmente na estação do inverno. Nestes solos a planta tem um desenvolvimento reduzido, uma vez que o sistema radicular está localizado superficialmente, estando mais sujeito à asfixia e à escassez de água. Assim, os melhores solos para a cultura do morango são os solos que possuem uma melhor retenção de água, ou seja, os solos francos. Os solos arenosos também podem ser utilizados para a cultura dos morangos, embora estes solos antecipem a maturação dos frutos [52].

No solo, o excesso de calcário provoca um aparecimento de cloroses nas folhas e um crescimento reduzido da planta. Outro fator relevante consiste na salinidade da água de rega, pois esta provoca a redução do tamanho das plantas e do número de inflorescências (parte da planta onde se localizam as flores). Sendo assim, o pH mais apropriado para a cultura dos morangos encontra-se situado entre 5,5 e 6,5 [52].

3.4.2.3. Irrigação

Numa plantação de morangueiros é comum cobrir o solo com um plástico preto, para evitar a acumulação de poeiras nos morangos e evitar o crescimento de ervas daninhas. Deste modo, a utilização do sistema de rega gota-a-gota torna-se mais apropriada para este tipo de cultivo. Este sistema permite uma correta adaptação ao cultivo, uma vez que os morangueiros têm um sistema radicular superficial, raramente ultrapassando os 30 cm de profundidade [53].

Na tabela 3.2 encontram-se representadas as respetivas tensões limite para os vários tipos de solos, considerando um tensiómetro colocado a 18 cm de profundidade [53][54].

Tabela 3.1 - Tensões limite para os vários tipos de solo numa cultura de morangos [53].

Tipo de solo	Tensão limite (kPa)
Arenoso	40
Franco-arenoso	50
Siltoso	60
Franco-siltoso	70
Argiloso	90

A tensão limite define quando o solo deverá ser irrigado. Deste modo, o solo deverá ser irrigado sempre que os tensiómetros apresentem uma tensão limite superior ao indicado pela tabela 3.1. Por outro lado, o processo de irrigação deverá ser terminado quando o valor indicado pelo tensiómetro apresentar um valor de tensão compreendido entre 5 e 10 kPa. No caso da tensão limite ser inferior a 5 kPa, significa que foi aplicada água em demasia, podendo danificar o cultivo [54].

4. Implementação do Sistema

Neste capítulo são apresentadas as várias fases do processo de implementação do sistema de gestão de irrigação para a agricultura. Numa primeira fase, são descritos os requisitos do sistema de irrigação e a arquitetura do sistema e, numa segunda fase, do trabalho da construção do sistema, onde inicialmente foi realizada uma estação meteorológica, a qual permite a monitorização dos parâmetros ambientais, que poderão influenciar o crescimento do cultivo. Após o desenvolvimento da estação meteorológica, foi desenvolvido um gerador hídrico com o modelo de pás em hélice. Este gerador tem como finalidade fornecer energia ao nó atuador (válvulas) do sistema de rega. O nó atuador integra duas válvulas, que poderão ser acionadas individualmente por um comando de forma automatizada ou forçada. A fase seguinte do protótipo consistiu no desenvolvimento dos nós sensores para a monitorização dos parâmetros do solo. Finalmente tem-se a interligação e o funcionamento de todo o sistema, onde os dados mensurados são visualizados na plataforma *web*, assim como os comandos de ativação do nó atuador.

4.1. Requisitos do sistema de irrigação

Com este projeto pretende-se desenvolver um protótipo de sistema de monitorização agrícola robusto, capaz de avaliar e interagir com o cultivo de uma forma autónoma.

O protótipo utiliza uma rede de sensores sem fios de baixo custo, que permite efetuar a leitura em tempo real dos parâmetros do solo, clima, condições das plantas, controlo de irrigação e a produção energética do sistema.

Este protótipo será instalado em ambiente exterior, com características semelhantes às de interesse, pelo que estará sujeito a condições atmosféricas adversas. Assim, os nós sensores do protótipo deverão caracterizar-se por:

- Baixo consumo energético: atendendo a que serão alimentados por baterias do tipo AA recarregadas por um painel solar de baixa potência;
- Fiabilidade na leitura dos dados: onde as medições dos nós sensores deverão estar imunes a interferências externas.
- Robustez na comunicação: o nó atuador deverá retornar uma mensagem de confirmação (*acknowledgement*) quando é acionado pelo nó coordenador;
- Dimensões reduzidas: para minimizar o impacto estético em ambiente exterior;
- Proteção contra intempéries: sendo que os componentes do nó sensor deverão estar dentro de um compartimento estanque.
- Baixo custo de produção: tornando-se assim num produto competitivo no mercado.

Relativamente à estação base do protótipo (nó coordenador), esta encontra-se situada em ambiente interior e deverá ser caracterizada por:

- **Aquisição:** o nó coordenador da rede estará conectado por um cabo USB (*Universal Serial Bus*) a um computador, possibilitando, assim, a transferência de dados e a alimentação do mesmo;
- **Visualização:** a informação proveniente dos nós sensores será armazenada numa base de dados, analisada e disponibilizada numa aplicação *web*;
- **Despacho:** os comandos para ativação das válvulas de irrigação serão acionados na aplicação *web* e enviados pelo nó coordenador.

Outro requisito a ter em consideração neste projeto consiste na implementação de um sistema hídrico para captação de energia. O sistema hídrico a ser implementado fornecerá alimentação energética ao nó atuador do sistema.

Para concluir, o nó atuador deverá ser capaz de ligar e desligar, de forma individual, os canais de rega que se encontram ligados a um reservatório de água.

4.2. Arquitetura do sistema

A arquitetura do sistema de irrigação encontra-se representada na figura 4.1. Esta arquitetura poderá seguir a topologia em árvore ou em malha. Porém, na topologia em árvore, as mensagens dos nós sensores apenas têm um percurso até ao coordenador, não sendo uma topologia apropriada em caso de perdas de informação para uma rede de monitorização. No entanto, esta topologia é útil para o teste de determinadas funcionalidades da rede, como será apresentado ao longo deste capítulo.

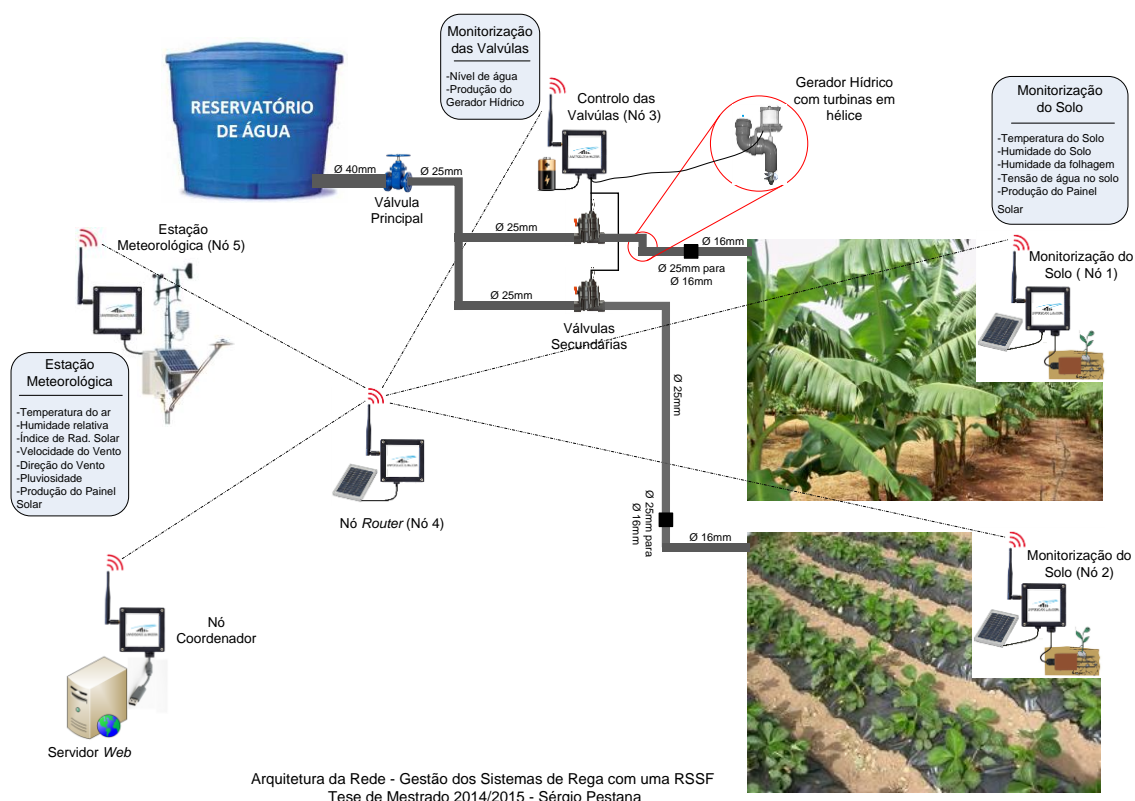


Figura 4.1 - Arquitetura do sistema.

Observando a figura 4.1, pode-se ter uma percepção global do sistema de irrigação. Este sistema irá conter uma estação base, um acesso de ligação à internet, um nó *router*, vários nós sensores (estação meteorológica, atuador e monitorização do solo) e uma rede *ZigBee* que realizará a comunicação entre os nós sensores e o nó coordenador.

No sistema, o PC de monitorização local está ligado ao coordenador da rede por uma porta COM através de um cabo USB.

No que diz respeito ao acesso pela Internet, o sistema disponibilizará um acesso remoto à rede de monitorização agrícola, a fim de o utilizador poder consultar e interagir com os parâmetros medidos pelos nós sensores.

4.2.1. Alimentação da rede *Zigbee*

A rede *ZigBee*, como referido no capítulo 3, inclui três nós distintos: o coordenador, o *router* e o nó sensor. Como o coordenador é alimentado por um cabo USB, através do computador, este não carece de cuidados em termos energéticos, ao contrário do nó *router* e do nó sensor.

O nó *router* tem como função a retransmissão das mensagens provenientes dos nós sensores, ou mesmo transmitir mensagens no caso de realizarem algum tipo de amostragem. Deste modo, o nó *router* não pode entrar no modo adormecido, apresentando assim um elevado consumo. A alimentação do nó *router* é realizada por painel solar. O anexo A apresenta o circuito de carregamento do nó *router*.

Por outro lado, os nós sensores podem entrar no estado adormecido após realizarem a amostragem, possibilitando o aumento da durabilidade das baterias, sendo que são utilizados, para além de painéis solares, um gerador hídrico para a sua alimentação.

4.3. Estação Meteorológica

A estação meteorológica desenvolvida neste projeto tem como finalidade a medição dos parâmetros relativos ao clima, nomeadamente, a temperatura ambiente, a humidade relativa do ar, a velocidade e direção do vento, o índice de radiação solar e a pluviosidade.

Para a realização da estação meteorológica utilizaram-se os dispositivos (sensores) descritos na subseção 3.3.1. Os sensores utilizados na estação meteorológica, numa primeira fase, foram calibrados de forma a minimizar os erros sistemáticos e aleatórios ao longo de um intervalo de medição.

A estação meteorológica foi calibrada de modo a obter periodicamente, a cada dez segundos, os valores dos respetivos sensores, bem como a tensão e corrente de produção do painel solar, tensão e corrente nas baterias e a indicação do nível do sinal de rádio frequência recebido (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*). O tempo definido para o envio da informação da estação meteorológica para o nó coordenador foi dimensionado, com o intuito de se obter uma boa resolução, dos parâmetros ambientais.

4.3.1. Calibração dos sensores

Neste projeto, a calibração dos sensores foi realizada pelo método de calibração indireto. Neste método, o equipamento é calibrado por comparação com um equipamento já calibrado.

4.3.1.1. Calibração do anemómetro 7911 da *Davis Instruments*

O anemómetro 7911 da *Davis Instruments* foi calibrado através da comparação de valores obtidos pela consola da estação *Davis Wireless Vantage Pro2 Weather Station* e pelo anemómetro de copos AN400 EXTECH (instrumento de referência). A calibração foi realizada com o auxílio de um túnel de vento (ver figura 4.2).



Figura 4.2 - Túnel de vento.

O túnel permite velocidades máximas de vento até aos 8 m/s, embora estas velocidades possam ser superiores com a extensão do túnel e redução do bocal (na prática, conseguiu-se atingir velocidades de vento em torno dos 13 m/s).

Na calibração do anemómetro 7911, relativamente à velocidade do vento, realizaram-se várias medições de modo a obter uma curva de calibração. As medições foram realizadas tendo em consideração diferentes velocidades de vento, controladas pela turbina do túnel e pela frequência obtida em função da rotação dos copos do anemómetro 7911. O anexo B1 contém os valores obtidos na calibração do anemómetro 7911 relativamente à velocidade do vento.

Na programação do Arduino foi necessário criar uma função para contar a velocidade de rotação do anemómetro 7911, designada por `void rpmCount()`. Outro parâmetro efetuado no código, consistiu na criação de uma interrupção externa, para a leitura dos valores do anemómetro 7911, designada por `attachInterrupt(0, rpmCount, HIGH)`. O anexo B2.1 contém o código realizado no Arduino. Após a calibração, verificou-se que o erro, comparativamente aos valores obtidos pelo anemómetro EXTECH AN400, era de 3%. Esta análise pode ser consultada no anexo B3 do trabalho.

Comparativamente à direção do vento foi necessário medir o sinal de saída do sensor 7911 referente à direção do vento. Este sinal corresponde um nível de tensão, que conforme a posição da agulha (cata ventos), varia entre os 0 e 3,3 V. Os valores obtidos foram registados numa tabela que se encontra no anexo B4.

4.3.1.2. Calibração do pluviômetro 7852 da *Davis Instruments*

A medição da precipitação diária foi realizada através do pluviômetro 7852 da *Davis Instruments*, com o circuito de condicionamento ilustrado na figura 3.21.

A calibração deste instrumento de medição é efetuada tendo em consideração o número de comutações do *switch* bem como a área do balde coletor, que é proporcional à quantidade de chuva recolhida [39].

O pluviômetro 7852, segundo o seu fabricante, tem uma precisão de 0,2 mm por cada comutação.

Relativamente à programação no Arduino fio, esta é muito idêntica à programação do anemómetro 7911, ou seja, criou-se uma função para contar as comutações do pluviômetro, designada por *void pluvCount()*. De igual modo, criou-se uma interrupção externa, para a leitura dos valores provenientes do pluviômetro designada por *attachInterrupt(1, pluvCount, HIGH)*. O código pode ser visualizado no anexo B2.2.

4.3.1.3. Calibração do piranómetro 6450 da *Davis Instruments*

O piranómetro 6450 consiste num sensor onde a calibração é muito simples, pois a gama de operação de saída do sensor varia entre 0 e 3V, o que corresponde a um valor de 0 a 1023 na leitura pelo pino analógico do Arduino. Assim, na programação, é necessário utilizar a função *map*. Esta função atribui aos valores mensurados um novo intervalo, correspondente ao intervalo de operação do sensor 6450 definido pelo fabricante, nomeadamente, 0 a 1800 W/m².

4.3.1.4. Calibração do Sensor de temperatura e humidade relativa (SHT11)

O sensor SHT11 não necessita de calibração pois este vem calibrado de fábrica.

Porém, os valores obtidos pelo SHT11 foram comparados com outro instrumento de medição de temperatura e humidade (*Center 315 Humidity Temperature Meter*) de modo a avaliar os resultados obtidos. O anexo C contém a comparação dos valores obtidos pelo SHT11 com os do *Center 315 Humidity Temperature Meter*.

Na programação do sensor no Arduino é necessário utilizar a biblioteca desenvolvida para o SHT11, disponível em: <https://github.com/practicalarduino/SHT1x>. Esta biblioteca, <*SHT1x.h*>, permite otimizar o código, sendo apenas necessário definir as portas *DATA* e *ClocK* do sensor e realizar a leitura dos valores referentes à temperatura ambiente e à humidade relativa.

4.3.2. Consumo da estação meteorológica

No consumo total da estação foram tidos em consideração os consumos fornecidos pelos fabricantes de cada componente, quando é aplicada uma tensão de 3,3 V, a uma temperatura ambiente de 25 °C. A tabela 4.1 mostra os respetivos valores referente aos consumos.

Tabela 4.1 - Valores referentes ao consumo de cada componente da estação meteorológica.

	Estado		
	Ativo (mA)	Inativo (mA)	Adormecido (µA)
Arduino fio	3,8	0,8	180
Rádio XBee S2	Tx – 40 Rx – 40	15	<1
Sensor SHT11	0,55	-	0,3
Sensor 6450		1 mA	
Sensor MAX9929F		2×20 µA	
TOTAL	45,59 mA	16,84 mA	1,22 mA

Pela tabela 4.1, verifica-se que, no estado ativo, o consumo total previsto para o nó é de 45,59 mA; no estado inativo, o consumo é de 15,84 mA; e no estado adormecido, apresenta o valor aproximado de 1,22 mA. É de mencionar, ainda, que aos totais obtidos falta a contribuição dos sensores 7911 e 7852, pois na folha de características destes não está especificado o seu consumo. De forma a integrar o consumo dos sensores 7911 e 7852, colocou-se uma resistência de 1 Ω em série com o circuito e mediu-se um o consumo de 2,2 mA. Logo, os sensores 7911 e 7852 têm um consumo médio de 1 mA. Deste modo, o consumo total no estado ativo é de 46,59 mA, no estado inativo para 17,84 mA e no estado adormecido para 2,22 mA.

No protótipo, a estação meteorológica é alimentada por 4 baterias recarregáveis do tipo AA com 1,2 V, ligadas em série, com uma carga máxima de 2300 mAh. A fórmula para determinar a duração que as baterias levam a descarregar é dada pela seguinte expressão:

$$Duração = \frac{Carga\ das\ baterias}{Consumo\ do\ nó} \quad (4.1)$$

Porém, para não danificar as baterias, estas não devem ser descarregadas abaixo dos 20% da sua carga. Assim, pela equação (4.1) o tempo de operação da estação meteorológica no modo ativo sem carregamento das baterias é de:

$$Duração_{modo_ativo} = \frac{2300\ mAh \times 0,8}{46,59\ mA} = 39,49\ horas$$

o que corresponde à duração, aproximadamente, a 1 dia e 15 horas.

No modo adormecido o tempo de funcionamento da estação meteorológica sem carregamento das baterias é de:

$$Duração_{modo_adormecido} = \frac{2300\ mAh \times 0,8}{2,22\ mA} = 828,83\ horas$$

o que corresponde, aproximadamente, a 34 dias e 12 horas.

Os cálculos realizados anteriormente mostram apenas as durações das baterias em dois estados distintos. Mas, o nó da estação opera nos dois estados, pelo que é necessário criar um ciclo onde o nó fique acordado o tempo necessário para se ligar à rede *ZigBee* e transmitir a mensagem com a informação das amostras e voltar a adormecer. Assim, a forma para estimar a nova duração das baterias, quando operam sobre um ciclo, é dada por:

$$Duração = \frac{Carga\ das\ baterias}{Consumo\ médio\ do\ nó} \quad (4.2)$$

O consumo médio do nó pode ser determinado por:

$$Consumo_{médio} = \frac{I_{in\ ativo} \times Duração_{ativo} + I_{in\ adormecido} \times Duração_{adormecido}}{duração\ do\ ciclo} \quad (4.3)$$

onde $I_{in\ ativo}$ é a corrente de consumo no modo ativo do sistema, $Duração_{ativo}$ é o tempo de funcionamento no estado ativo, $I_{in\ adormecido}$ é a corrente de consumo no modo adormecido e o $Duração_{adormecido}$ é o tempo de funcionamento no estado adormecido.

No protótipo, a estação meteorológica opera em dois estados (ativo e adormecido) e envia a informação com uma periodicidade de 10 s, com 0,2 s no estado ativo (tempo máximo necessário para a estação poder enviar os dados para o coordenador) e com 9,8 s para o estado adormecido. Pela equação (4.3) determina-se o consumo médio do nó como sendo igual a:

$$Consumo_{médio} = \frac{46,59\ mA \times 0,2\ s + 2,22\ mA \times 9,8\ s}{10\ s} = 3,11\ mA$$

Assim, pela equação (4.2) a duração das baterias quando operam sobre um ciclo de 10 s é de:

$$Duração = \frac{2300\ mAh \times 0,8}{3,11\ mA} = 591,64\ horas$$

o que corresponde, aproximadamente, a 24 dias e 15 horas.

Como o consumo médio de corrente da estação meteorológica é de 3,11 mA e esta é alimentada por quatro pilhas de 1,2 V ligadas em série, a potência média de consumo é de 14,93 mW. Como a potência de consumo da estação é relativamente baixa, optou-se por utilizar neste nó sensor o modelo de carregamento ON-OFF.

No modelo de carregamento ON-OFF, os dois painéis solares ligados em série num dia de sol, totalizam uma potência média 270 mW, o que satisfaz o consumo da estação meteorológica. Este valor foi obtido com base nos resultados práticos ao longo de um dia de sol, sendo que esta análise pode ser consultada no Anexo D.

4.3.3. Arquitetura da estação meteorológica

A arquitetura da estação meteorológica desenvolvida neste projeto encontra-se apresentada na figura 4.3.

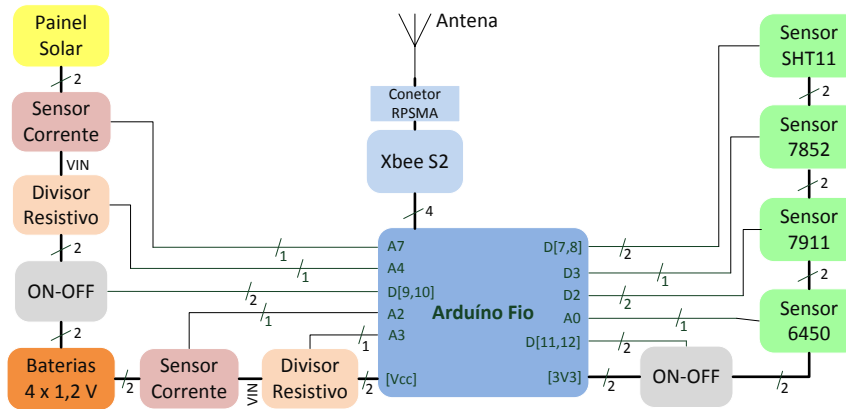


Figura 4.3 - Arquitetura da estação meteorológica.

Esta arquitetura é composta por vários blocos, sendo que alguns deles já foram anteriormente mencionados. Para além destes, existem os blocos dos divisores resistivos, os blocos ON-OFF e os blocos dos sensores de corrente.

Os blocos dos divisores resistivos têm como função apresentar o valor de tensão dos painéis solares e da bateria. Para tal, é necessário reduzir o nível de tensão VIN, para um nível admissível pelo microcontrolador ATmega328P.

O bloco ON-OFF tem como finalidade a proteção das baterias. Este bloco é constituído por um relé, que é acionado em caso de alguma ocorrência que possa danificar as baterias.

A arquitetura da figura 4.3 ilustra a presença de dois blocos ON-OFF. O bloco ON-OFF que se encontra anteriormente ao bloco das baterias é acionado quando a tensão das baterias, em modo de carregamento, obtém o valor de 5,6 V (valor máximo para carregamento), desligando portanto o circuito de carregamento. Por outro lado, o bloco ON-OFF que se encontra posteriormente ao Arduino fio é acionado no caso da tensão das baterias atingir um nível de 4,75 V, desligando assim os sensores de monitorização da estação. Deste modo, com a inativação dos sensores, o consumo da estação meteorológica decai drasticamente. Contudo, o restante equipamento encontra-se em funcionamento, de modo a poder efetuar o carregamento das baterias. O valor 4,75 V atribui uma margem de operação de 0,35 V ao equipamento da estação (excluindo os sensores), visto que o valor mínimo das baterias é de 4,4 V.

Na arquitetura da estação, o bloco sensor corrente utiliza o sensor MAX9929F, descrito seção 3.3.1.9. Estes blocos possibilitam medir a corrente produzida pelos painéis solares e a corrente de consumo do circuito. A figura 4.4 ilustra o circuito utilizado para o sensor de corrente MAX9929F.

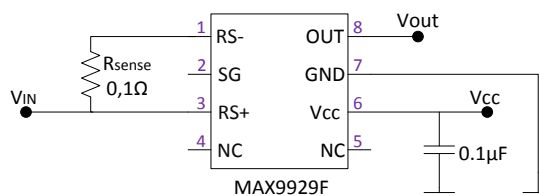


Figura 4.4 - Circuito do sensor de corrente.

Como os dois painéis solares ligados em série não produzem uma corrente acima dos 160 mA e o limite máximo de tensão por degrau admitida pelas portas ADC do Arduino fio é de 1,1 V, então pela equação (3.10) o V_{out} será, no máximo, de 0,8 V.

Na calibração do sensor de corrente constatou-se que, com a configuração do circuito da figura 4.4, a saída do sensor MAX9929F varia 5,4 mV por cada 1 mA.

Na prática, este circuito é utilizado em todas as medições relativamente à corrente do protótipo do sistema de irrigação.

4.3.4. Circuito interno da estação meteorológica

No circuito interno da estação começou-se por definir o circuito elétrico da mesma. A figura 4.5 ilustra o circuito elétrico da estação meteorológica.

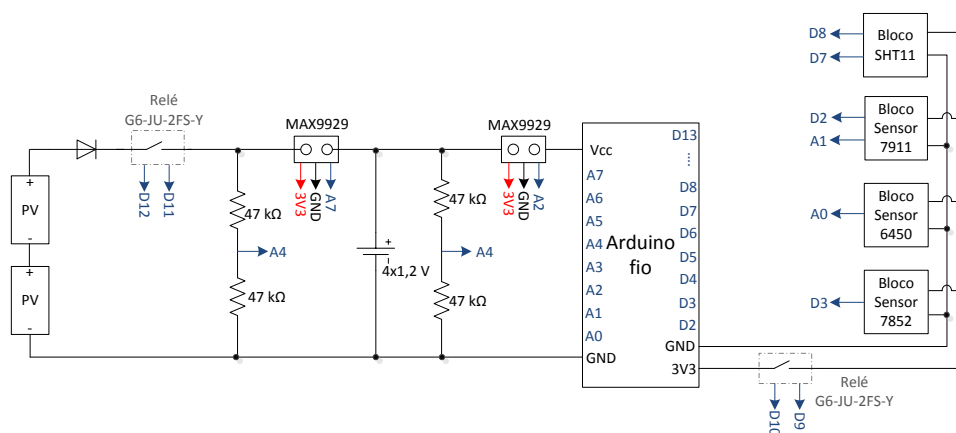


Figura 4.5 - Circuito elétrico da estação meteorológica.

Tendo em consideração o circuito elétrico da estação, realizou-se o circuito impresso (PCI) da estação.

Para a realização da placa PCI (Placa de Circuito Impresso), utilizou-se o *software NI Ultiboard 12* da empresa *National Instruments*.

No *NI Ultiboard 12* nem todos os componentes estão presentes nas bibliotecas do *software*, sendo que, por vezes, é necessário recorrer à implementação dos componentes, como é o caso do relé G6-JU-2FS-Y.

No esboço da estação, o fabrico da PCI, deverá ser realizado de acordo com determinados protocolos [56]. O Anexo E1 contém o esboço referente à construção do nó sensor da estação.

4.3.5. Construção do nó sensor

Neste ponto do projeto são descritos os vários procedimentos para a realização do nó sensor, sendo que o primeiro procedimento a realizar, após a soldadura dos componentes na placa PCI, consiste na inserção dos sensores e do Arduino fio na placa, como ilustra a figura 4.6a).

Posto isto, a estação meteorológica será colocada em ambiente exterior, sendo necessário proteger o equipamento eletrónico contra condições climáticas adversas. Deste modo, optou-se por colocar o equipamento dentro de caixas estanques, com a

norma IP65 [57]. A caixa utilizada detém as dimensões apropriadas para a colocação dos vários módulos referentes ao nó sensor como ilustra figura 4.6b).

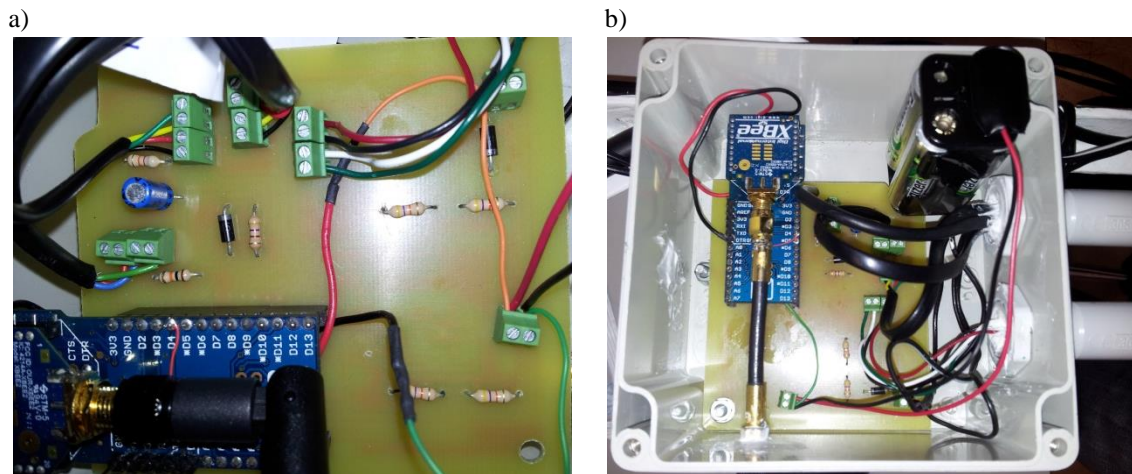


Figura 4.6 - Nó sensor: a) Sensores e Arduino na placa e b) Equipamento no interior de uma caixa com IP65.

Na figura 4.6 é possível observar os componentes que constituem a placa PCI da estação. Nesta pode-se verificar que a utilização dos módulos *XBee* com conetores RPSMA possibilita a colocação da antena no exterior da caixa por um cabo coaxial de 50 Ω de impedância. Além da antena, os sensores da estação também estão colocados no exterior da caixa. Na prática, o isolamento da caixa foi realizado com a colocação de silicone vedante entre a antena e a caixa IP65 e no acesso dos sensores à placa PCI. Por outro lado, a humidade no interior da caixa também foi tida em consideração neste projeto, sendo que utilizou-se um saco com sílica, de modo a minimizar o impacto que a humidade poderia provocar nos componentes eletrónicos da estação.

A colocação dos sensores no exterior da caixa permite medir os parâmetros de interesse. No entanto, existem sensores que, segundo o seu fabricante, não podem estar diretamente expostos ao sol, como é o caso do sensor SHT11. Assim, este sensor é colocado dentro de um tubo PVC (*Polyvinyl Chloride*), o qual é enroscado na base da caixa. Na extremidade do tubo PVC, é colocado um filtro para impedir o acesso de insetos e rastejantes nas proximidades do sensor SHT11 permitindo, desta forma, que o sensor fique em contacto com o ar.

A caixa foi colocada verticalmente numa estrutura desenvolvida especificamente para o nó sensor da estação. Esta estrutura consiste numa estrutura metálica, que foi concebida tendo em consideração condições climáticas adversas, nomeadamente, ventos fortes. A figura 4.7 mostra o produto final referente à estação meteorológica.

a)



b)



Figura 4.7 - Estação meteorológica.

Após a finalização da estrutura e colocação dos sensores nesta, a estação foi colocada num poste metálico que se encontra no terraço da Universidade da Madeira.

4.3.6. Programação do nó sensor

No Arduino a programação abrange vários aspetos. Inicialmente são carregadas as bibliotecas e as configurações das portas, variáveis globais, funções auxiliares e apontadores das funções.

No programa principal são definidos os estados das portas a serem utilizadas.

Em suma, a programação do nó sensor (estação meteorológica) encontra-se definida por quatro fases, sendo que, a primeira fase consiste no adormecimento do XBee e do Arduino fio. Na segunda fase, o Arduino e o XBee entram no modo ativo após uma interrupção temporal, onde esperam um determinado tempo para que o XBee possa enviar a mensagem com os dados amostrados pelos sensores.

Após o envio dos dados, tem-se a terceira fase, pelo que o XBee entra no modo inativo, permanecendo à espera de uma mensagem de *broadcast*, à qual contém os tempos relativos do próximo ciclo.

Na última fase, o XBee após a receção do *broadcast* informa o Arduino dos novos tempos para o ciclo de operação finalizar o tratamento da mensagem. Posteriormente, o nó entra no modo adormecido.

A figura 4.8 apresenta o fluxograma correspondente ao código implementado no Arduino da estação.

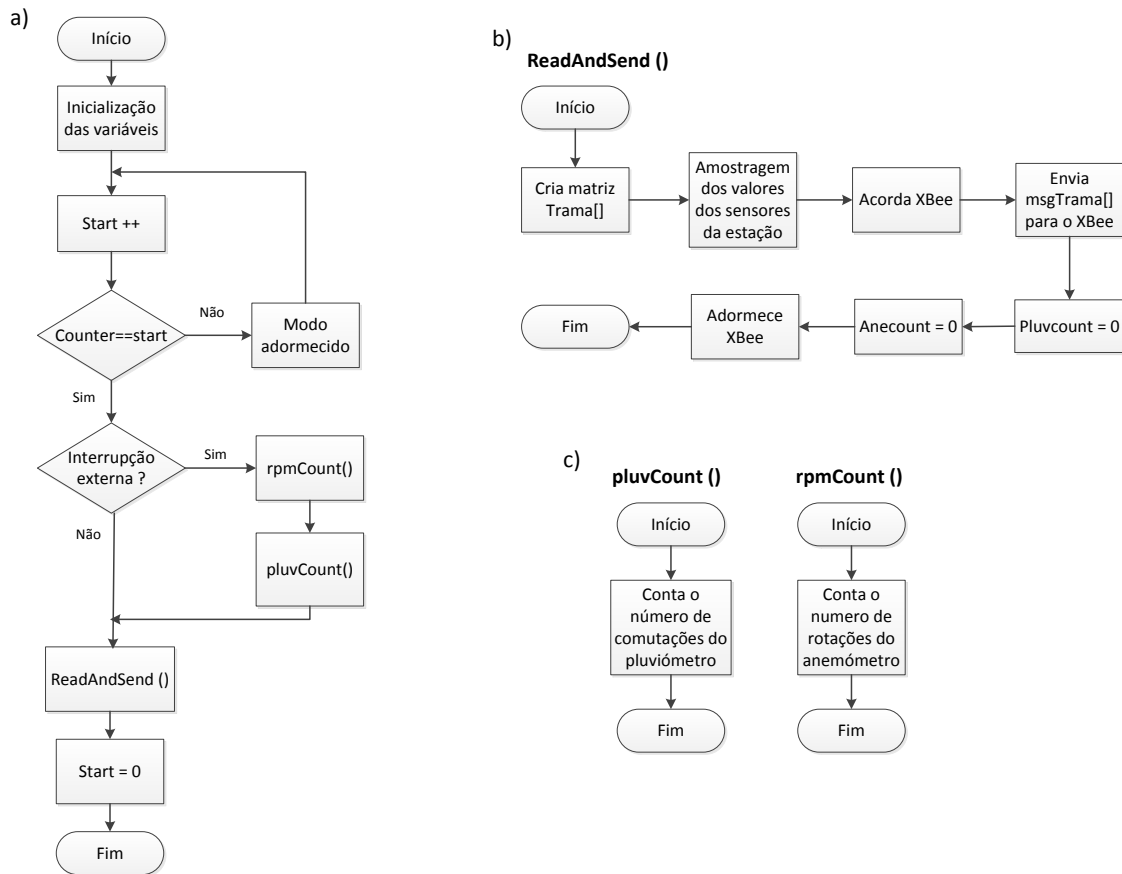


Figura 4.8 - Fluxograma do código implementado no Arduino referente à estação

O código implementado em linguagem C no Arduino fio, referente à estação meteorológica, pode ser visualizado no anexo H1 do trabalho. Este código, como foi referido, possibilita o adormecimento periódico da estação a cada 10 s e realiza a amostragem dos sensores presentes na estação meteorológica. Após a leitura dos sensores, a mensagem é compilada e é realizado o cálculo do *Checksum*. Por último, a mensagem é enviada para a rede.

4.4. Nó atuador

O nó atuador desenvolvido neste projeto tem como finalidade o controlo da irrigação dos cultivos. Este contém duas válvulas que possibilitam a rega de duas zonas distintas associadas a cada uma das válvulas. Além do controlo de irrigação, o nó atuador realiza a monitorização da passagem de água, de modo a garantir robustez na atuação do sistema de rega.

O nó atuador foi calibrado de modo a obter periodicamente, a cada vinte segundos, os valores dos sensores de nível, estado das válvulas, tensão e corrente de produção do gerador hídrico, tensão e corrente nas baterias e a indicação do nível do sinal de radiofrequência recebido (RSSI). Todavia, o tempo definido para o envio da informação do nó atuador poderá ser ajustado pelo utilizador.

4.4.1. Arquitetura do nó atuador

No nó atuador a alimentação será realizada por um gerador hídrico com pás do tipo em hélice embutidas dentro da tubagem. Este nó permite o controlo das válvulas, ou seja, abertura ou fecho, e possibilita também a monitorização da produção do gerador hídrico associado ao nó, a supervisão de passagem de água após a abertura da válvula, o consumo do nó (tensão e corrente) e o RSSI. Na figura 4.9 encontra-se representado a arquitetura do nó atuador.

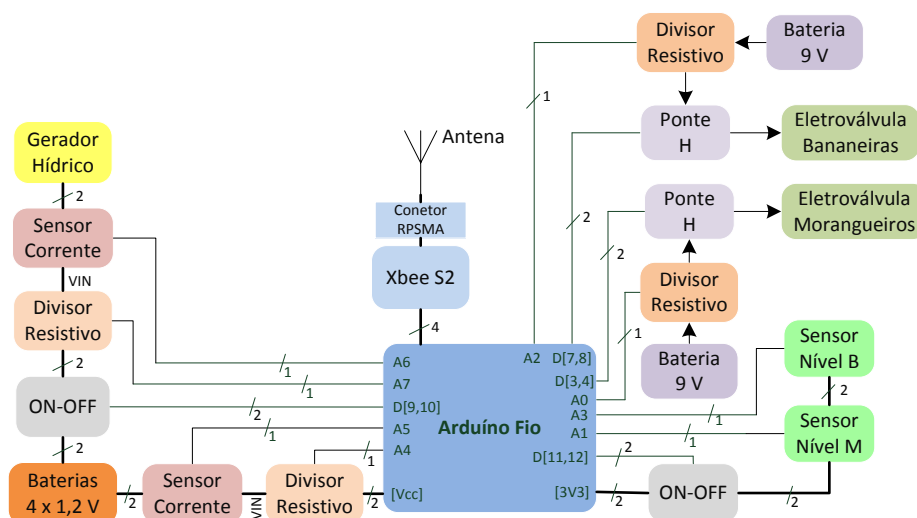


Figura 4.9 - Arquitetura do nó atuador.

A arquitetura do nó atuador é composta por vários blocos, sendo que alguns dos blocos ainda não foram mencionados, como é o caso do bloco da ponte H e o bloco do sensor nível.

O bloco ponte H é essencialmente constituído por um relé NEC EP2-3N1S que, consoante os valores aplicados na entrada do relé, altera o sentido da corrente na eletroválvula, de modo a ativar e desativar a mesma. A figura 4.10 mostra o circuito interno do relé NEC EP2-3N1S. No circuito interno do relé, os comutadores são ativados através da tensão de polarização aplicadas nas bobinas interligadas entre os pontos 2-3 e 6-7.

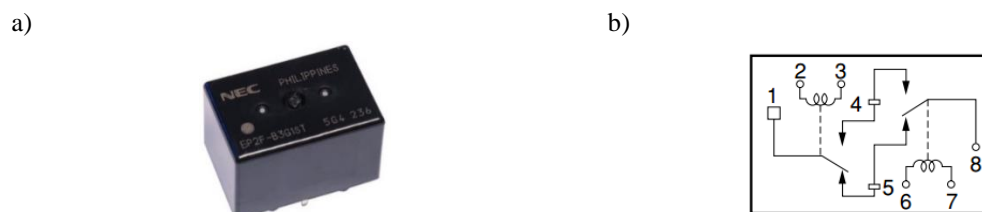


Figura 4.10 - Relé NEC EP2-3N1S: a) relé e b) circuito interno [58].

Como a corrente de funcionamento do relé (53,3 mA) é superior à corrente máxima fornecida pelas portas do Arduino, o relé necessita de dois transístores ligados à bateria de 9 V a funcionarem como comutadores, controlados pelo Arduino fio [58].

A presença da bateria de 9 V no nó atuador deve-se ao facto de a eletroválvula Rain Bird DV-075 necessitar de uma tensão de alimentação de 9 V DC.

Relativamente ao circuito de ativação e desativação da válvula para o controlo de irrigação, através da atuação do relé NEC EP2-3N1S, este encontra-se representado na figura 4.11.

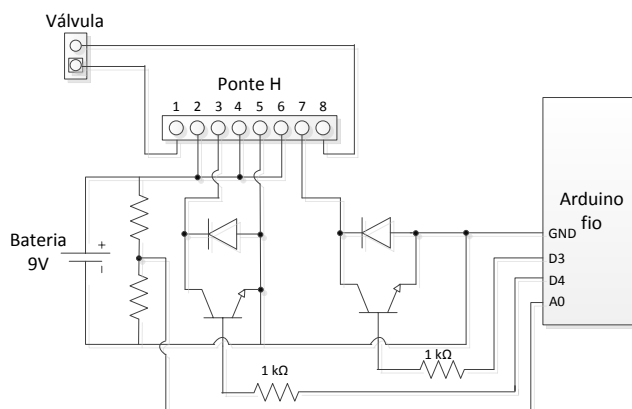


Figura 4.11 - Circuito para ativar a válvula.

Na figura 4.11 os díodos presentes no circuito têm como função a eliminação de problemas de polarização dos transístores nos momentos de comutação. Por outro lado, as resistências de 1 kΩ asseguram a saturação do transístor para o caso da saída do Arduino estar no seu estado máximo (*HIGH*).

Comparativamente ao divisor resistivo, como as portas de entrada do Arduino fio apenas suportam uma tensão máxima de 3,3 V, foi necessário reduzir a tensão da bateria de 9 V para 3 V.

O sensor de nível consiste num sistema que monitoriza a passagem de água na tubagem do sistema de irrigação. Esta monitorização é efetuada posteriormente às válvulas, o que permite redundância no processo de abertura das eletroválvulas. Deste modo, quando o sistema enviar o comando para abrir a válvula, o utilizador, além de visualizar na aplicação *web* o *acknowledgement* restituído pela própria válvula, poderá também consultar o estado do sensor de deteção de água, confirmando assim que está a decorrer a irrigação do cultivo. A figura 4.12 mostra o circuito do sensor de presença de água na tubagem.

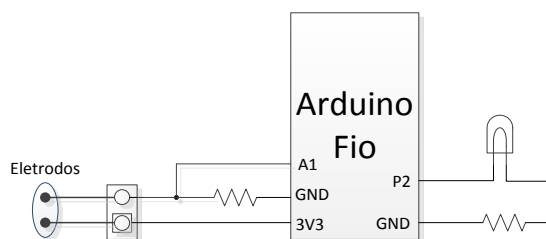


Figura 4.12 - Circuito do sensor de deteção de água.

No circuito da figura 4.12 os elétrodos são inseridos dentro da tubagem do sistema de irrigação. Assim, quando a água percorrer a tubagem, esta fecha o sistema e ativa o LED (*Light Emitting Diode*). Ao ativar o LED, o sistema envia uma mensagem para o nó coordenador a informar a presença de água na tubagem.

4.4.2. Consumo do nó atuador

No consumo do nó atuador foi tido em consideração os consumos fornecidos pelos fabricantes de cada componente, quando aplicada uma tensão de 3,3 V a uma temperatura ambiente de 25 °C. A tabela 4.2 mostra os respetivos valores referente aos consumos.

Tabela 4.2 - Valores referentes ao consumo de cada componente do nó atuador.

	Estado		
	Ativo (mA)	Inativo (mA)	Adormecido (µA)
Arduino fio	3,8	0,8	180
Rádio XBee S2	Tx – 40 Rx – 40	15	<1
Sensor MAX9929F	2×20 µA		
TOTAL	43,8 mA	15,84 mA	180,1 µA

É de mencionar que aos valores obtidos na tabela 4.2 falta a contribuição dos sensores de nível (bananeiras e morangueiros), pois estes apenas ficam ativos com a passagem de água na tubagem, logo não se contabilizou o consumo destes no cálculo teórico.

No protótipo, o nó atuador é alimentado de igual modo como a estação, ou seja, por 4 baterias recarregáveis do tipo AA com 1,2 V ligadas em série com uma carga máxima de 2300 mAh.

Como o atuador opera em dois estados e envia a informação com uma periodicidade de 20 s, com 0,4 s no estado ativo (tempo necessário para o nó atuador ler a trama proveniente do coordenador e acionar as válvulas) e com 19,6 s no estado adormecido. Pela equação (4.3) o consumo médio do nó atuador é de:

$$Consumo_{m\u00e9dio} = \frac{43,8 \text{ mA} \times 0,4 \text{ s} + 0,1801 \text{ mA} \times 19,6 \text{ s}}{20 \text{ s}} = 1,05 \text{ mA}$$

Pela equação (4.2) a duração das baterias quando operam sobre um ciclo de 20 s é de

$$Dura\u00e7\u00e3o = \frac{2300 \text{ mAh} \times 0,8}{1,05 \text{ mA}} = 1752,38 \text{ horas}$$

o que corresponde, aproximadamente, a 73 dias e 6 horas.

Tendo em consideração o consumo médio e a tensão de alimentação do nó atuador, verifica-se que potência de consumo do atuador é em média, 5,04 mW. Como a potência de consumo do nó atuador é mínima e o gasto de água para o cultivo da bananeira é elevado (28 litros diários por bananeira), optou-se por colocar neste nó, um gerador hídrico com pás do tipo em hélice, de modo a fornecer energia ao nó e prolongar a longevidade energética do mesmo.

4.4.3. Circuito interno do nó atuador

Na elaboração de circuito elétrico do nó atuador teve-se em consideração os circuitos de atuação do relé NEC EP2-3N1S e dos sensores de detecção de água. A figura 4.13 ilustra o circuito elétrico do nó atuador.

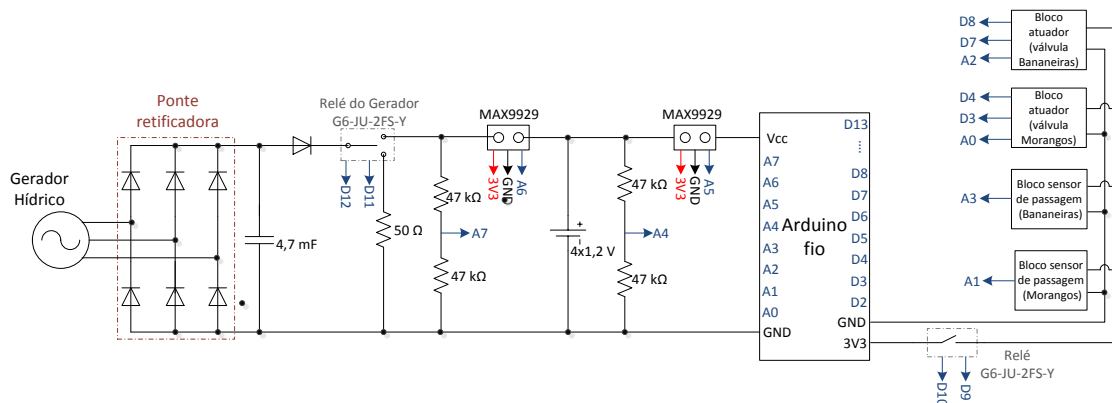


Figura 4.13 - Circuito elétrico do nó atuador.

No circuito da figura 4.13 existe uma resistência colocada num dos estados do relé do gerador hídrico. Esta resistência tem por objetivo a proteção mecânica do gerador, pois, no caso da bateria referente ao gerador estar totalmente carregada, o relé irá desativar o carregamento do gerador e o gerador ficará em circuito aberto. Na prática, o valor da carga foi determinado em função dos testes realizados no gerador ($R = 50 \Omega$).

O Anexo E2 contém o esboço referente à construção do nó atuador.

4.4.4. Construção do nó atuador

O nó atuador também foi colocado em ambiente exterior, pelo que foi necessário proteger o equipamento eletrónico contra condições climáticas adversas. Deste modo, optou-se por colocar o equipamento dentro de caixas com a norma IP65. A figura 4.14a) ilustra o interior da caixa com o circuito do nó atuador.

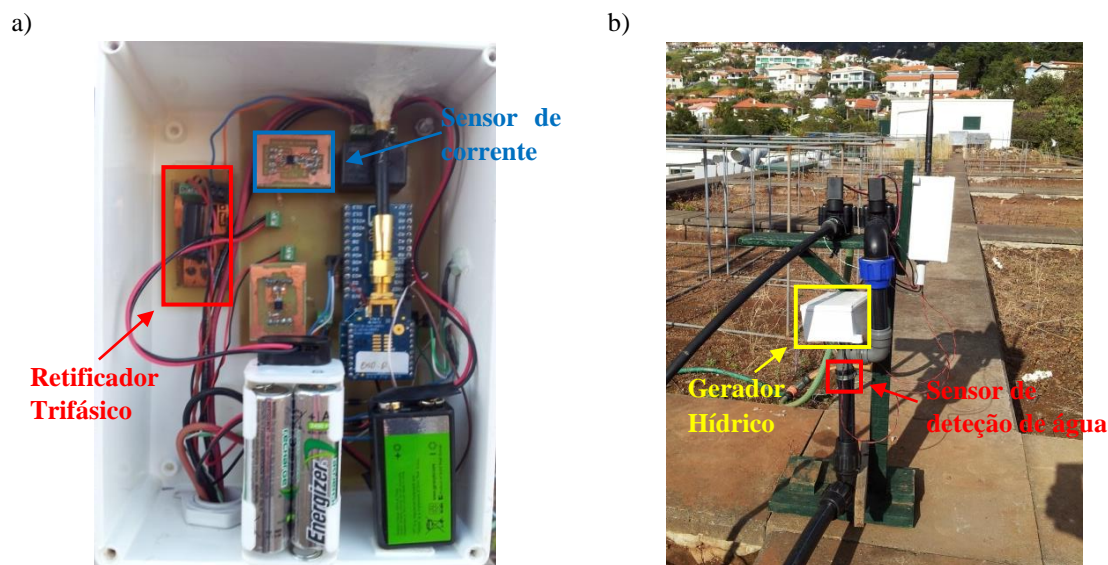


Figura 4.14 - Nó atuador: a) perspetiva interior e b) perspetiva exterior

Na figura 4.14a) é possível observar os componentes que constituem a placa PCI do nó atuador. Nesta figura, pode-se verificar a existência de uma bateria de 9 V para a alimentação das válvulas. Outro componente que consta na figura 4.14a) é o sensor de corrente associado ao gerador hídrico. Por último, também é possível visualizar o retificador trifásico do gerador hídrico.

Como no nó da estação, o nó atuador tem a antena, os sensores de deteção de água e as eletroválvulas colocados no exterior da caixa, sendo o isolamento da caixa idêntico ao da estação meteorológica.

A figura 4.14b) mostra o exterior do nó atuador, onde consta as duas eletroválvulas, o gerador hídrico e os dois sensores de níveis. É de salientar que nesta figura, o gerador hídrico encontra-se dentro de uma caixa estanque com norma IP65.

Após a finalização da estrutura e colocação dos sensores nesta, o nó atuador foi colocado num canteiro do terraço da Universidade da Madeira.

4.4.5. Programação do nó atuador

A figura 4.15 apresenta o fluxograma correspondente ao código implementado no Arduino do nó atuador.

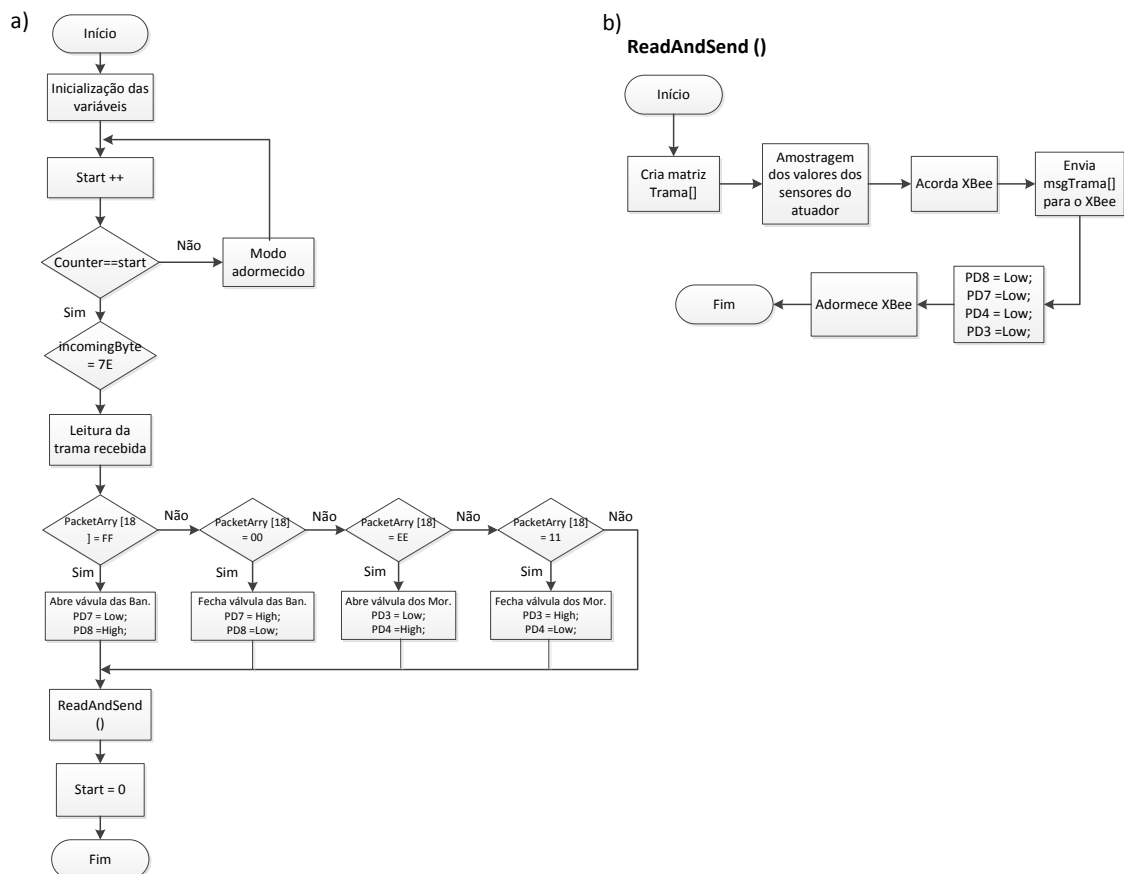


Figura 4.15 - Fluxograma do código implementado no Arduino referente ao nó atuador.

Na programação, o nó atuador ao receber uma trama proveniente do coordenador da rede, verifica a posição 18 da trama recebida e consoante a informação tida nessa posição, irá executar o pedido solicitado pelo utilizador. No caso de o coordenador enviar uma trama em que na posição 18 contenha os bytes de dados FF, o nó atuador irá

abrir a válvula referente ao cultivo das bananeiras. Por outro lado, se a trama tiver os *bytes* de dados a *00*, este fechará a válvula do cultivo das bananeiras. Relativamente à válvula do cultivo dos morangueiros, o procedimento é o mesmo, mas com a particularidade de os *bytes* de dados forem *EE*, abre a válvula e se forem *II*, fecha a válvula. Outra situação presente no código do nó atuador consiste no envio de um *acknowledgement* do estado das válvulas do nó atuador para o coordenador da rede. Assim, o utilizador poderá confirmar na aplicação *web* o estado das válvulas (aberto ou fechado).

O código implementado em linguagem C no Arduino fio referente ao nó atuador pode ser visualizado no anexo H2.

4.5. Gerador Hídrico

Nesta secção do trabalho será abordado o estudo, a construção e a análise do sistema hídrico, que irá alimentar o nó atuador. O sistema hídrico desenvolvido consiste num gerador trifásico capaz de realizar a alimentação do nó atuador. Assim, numa primeira fase, começou-se por efetuar uma abordagem teórica sobre os geradores trifásicos.

Na fase seguinte, selecionou-se o modelo de pás mais apropriado ao sistema de irrigação.

Por último, é apresentado o sistema desenvolvido para a aplicação em causa e são efetuados alguns testes ao gerador, de modo a avaliar o comportamento deste a nível de potência quando aplicado a uma carga.

4.5.1. Geradores trifásicos

Os geradores trifásicos são geradores simples, fiáveis e produzem uma potência 3 vezes superior comparado aos geradores de fase única (ou monofásicos). Esta produção deve-se ao facto de o sistema trifásico ser composto basicamente por três ondas sinusoidais balanceadas, as quais devem apresentar um desfasamento de 120° entre si, o que permita uma maior eficiência, sendo o sistema mais usual para a produção de energia elétrica [59][60].

O sistema trifásico é definido por um conjunto de 3 funções variáveis no tempo $f_3(t)$, que são adquiridas por uma função $f(t)$ somente por translações de dimensão $T/3$ no tempo, onde T corresponde ao período da função [59][60].

$$f_3(t) = f \left[t - (K - 1) \frac{T}{3} \right], \quad \text{com } K = 1, 2, 3 \quad (4.4)$$

Para criar uma onda sinusoidal é necessário rodar com uma velocidade angular constante, ω , uma espira (bobina) de secção S no seio de um campo magnético B , dando origem a um fluxo magnético definido por [59] [60]:

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (4.5)$$

Atendendo que o fluxo magnético pode ser caracterizado por

$$\Phi = BS\text{sen}(\omega t) \quad (4.6)$$

a força eletromotriz induzida numa espira é:

$$e(t) = - \frac{d\phi}{dt} = -\omega BS\text{cos}(\omega t) \quad (4.7)$$

onde a tensão é dada por:

$$v(t) = \omega BS\text{cos}(\omega t) \quad (4.8)$$

Relativamente às ondas desfasadas de 120° , estas possuem a mesma amplitude e podem ser representadas pelas seguintes expressões [59][60]:

$$v_1(t) = \sqrt{2} V\text{cos}(\omega t + \emptyset) \quad (4.9)$$

$$v_2(t) = \sqrt{2} V\text{cos}(\omega t - 120^\circ + \emptyset) \quad (4.10)$$

$$v_3(t) = \sqrt{2} V\text{cos}(\omega t - 240^\circ + \emptyset) \quad (4.11)$$

A figura 4.16 mostra a distribuição das sinusoides ao longo do tempo.

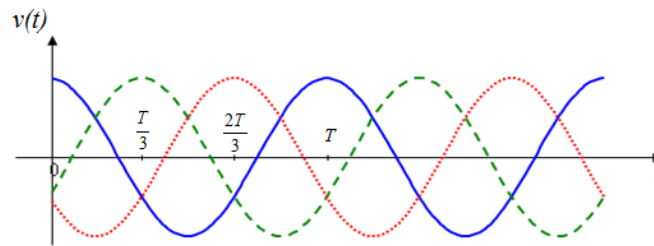


Figura 4.16 - Ondas sinusoidais geradas por um sistema trifásico [58].

O campo magnético numa bobina é caracterizado por:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 \frac{N}{2\pi r} I \quad (4.12)$$

onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$, N o número de espiras, r o diâmetro central da bobina e I a corrente que percorre a bobina.

Num sistema trifásico, a ligação das bobinas pode ser realizada de duas formas distintas, em estrela ou em triângulo (delta) [59][60]. No projeto, na construção do gerador foi utilizada a ligação em triângulo, ilustrada na figura 4.17. Nesta configuração, as ligações dos enrolamentos são realizadas de forma a minimizar o número de linhas a utilizar para ligar as bobinas à carga.

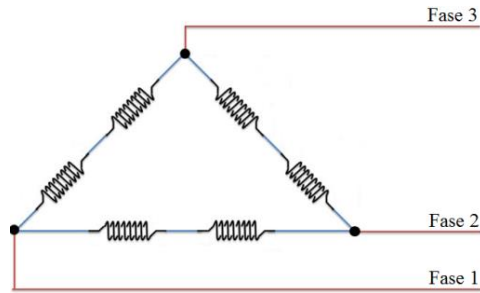


Figura 4.17 - Ligação das bobinas em triângulo (ou delta) [60].

Após a ligação das bobinas, é necessário realizar a retificação do modo a se obter uma tensão contínua. Para tal, são utilizados retificadores trifásicos de onda completa. Os retificadores trifásicos de onda completa são constituídos por uma ponte de seis diodos (sem ligação de neutro), como mostra a figura 4.18.

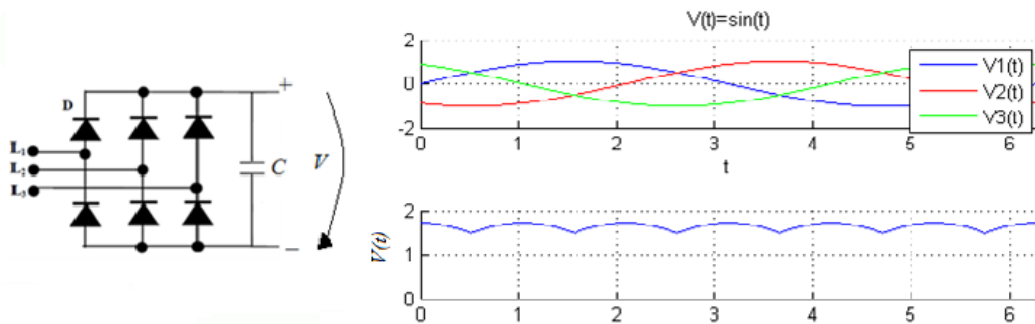


Figura 4.18 - Retificador trifásico de onda completa [61].

Na figura 4.18, o gráfico superior apresenta as ondas à saída do gerador, enquanto o gráfico inferior ilustra a onda retificada. Após a retificação, a onda apresenta um comportamento, aproximadamente, constante. No entanto, a colocação de um condensador em paralelo com a carga permite reduzir o *ripple* de saída.

Num sistema trifásico, o valor médio da tensão obtida com retificação completa é dado por [58]:

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}KNBS\omega}{\pi} \quad (4.13)$$

onde K corresponde ao número de bobinas por fase, sendo o valor máximo da tensão dado por $\sqrt{3}KNBS\omega$. Porém, num sistema real, é necessário ter em consideração a eficiência do gerador, η_g .

4.5.2. Construção do gerador hídrico

No projeto, de forma a responder às necessidades energéticas do nó atuador, construiu-se um gerador hídrico. Deste modo, teve-se em consideração que a potência gerada pelo gerador fosse de 0,5 W, para uma carga de 100 Ω (valor obtido com base num estudo realizado em [17]). Assim, para uma tensão V em circuito aberto, uma aproximação à potência máxima na carga R é dada por:

$$P = \frac{V^2}{4R} \quad (4.14)$$

Desta equação, e tendo em consideração os valores indicados anteriormente, retira-se que $V = 14,14 \text{ V}$.

Na construção do gerador, foi necessário determinar o número de bobinas por polo para um sistema trifásico. As seguintes relações permitem que o sistema produza 3 fases:

$$\begin{aligned} \text{Número de bobinas} &= 3n \\ \text{Número de ímanes} &= 4n \end{aligned} \quad (4.15)$$

onde n é o fator de multiplicação.

Na construção do gerador utilizou-se o fator de multiplicação de 2 ($n = 2$), o que perfaz seis bobinas (duas por fase) e oito ímanes.

A obtenção do campo magnético criado pelo íman pode ser calculada tendo como base o *site* presente em [62], onde é necessário introduzir os parâmetros referentes ao íman utilizado, nomeadamente, as dimensões do íman, o tipo de íman e a distância relativamente às bobinas. No trabalho, os ímanes utilizados são do tipo *neodímio* (N42) com as dimensões $20 \times 10 \times 5 \text{ mm}$, para uma distância em relação às bobinas de 4 mm, o que corresponde a um campo magnético de $0,1856 \text{ T}$ criado pelos ímanes.

Relativamente ao número de espiras por bobina, esta pode ser determinada pela equação (4.13), onde é necessário ter em consideração a área eficaz das bobinas ($S = 2,15 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), o número de bobinas por fase ($K=2$), o valor do campo magnético ($B = 0,1856 \text{ T}$), a tensão DC pretendida ($14,14 \text{ V}$) e que a velocidade angular assuma um valor de $\omega = 240 \text{ rad/s}$ (valor obtido com base num estudo realizado em [63]). Assim, pela equação (4.13), verificou-se que são necessárias 142 espiras por bobina. Porém, devido às imperfeições ferromagnéticas do material, optou-se por colocar 150 espiras em cada bobina, de modo a garantir a potência de $0,5 \text{ W}$ produzida pelo gerador à rotação de 1508 voltas por minuto. A figura 4.19a) ilustra uma das seis bobinas construída para o gerador de 150 espiras.

a)



b)



Figura 4.19 - Bobinas: a) Bobinas construídas e b) distribuição das bobinas em triângulo (estator).

Após a construção das seis bobinas, estas foram distribuídas uniformemente no interior de um tubo PVC com 5,4 cm de diâmetro (ver figura 4.19b). As ligações entre as bobinas seguiram o esquema de associação em triângulo.

A construção do rotor foi realizada com o auxílio de uma impressora 3D, onde primeiro foi necessário desenhar o rotor num *software* de desenho 3D com as dimensões pretendidas de modo a minimizar a distância entre as bobinas e os ímanes. O *software* utilizado foi o *Google sketchup*. A figura 4.20a) mostra o interior do gerador construído

já com o estator e o rotor. É de salientar, ainda, que, na impressora 3D, foram também produzidas outras peças elementares na construção do gerador como, por exemplo, a cobertura inferior e superior do gerador.

Depois da construção do gerador, girou-se o rotor sobre o estator a uma velocidade constante e, com o auxílio de um osciloscópio de quatro canais, verificou-se as ondas produzidas pelo gerador, o resultado é apresentado na figura 4.20b).

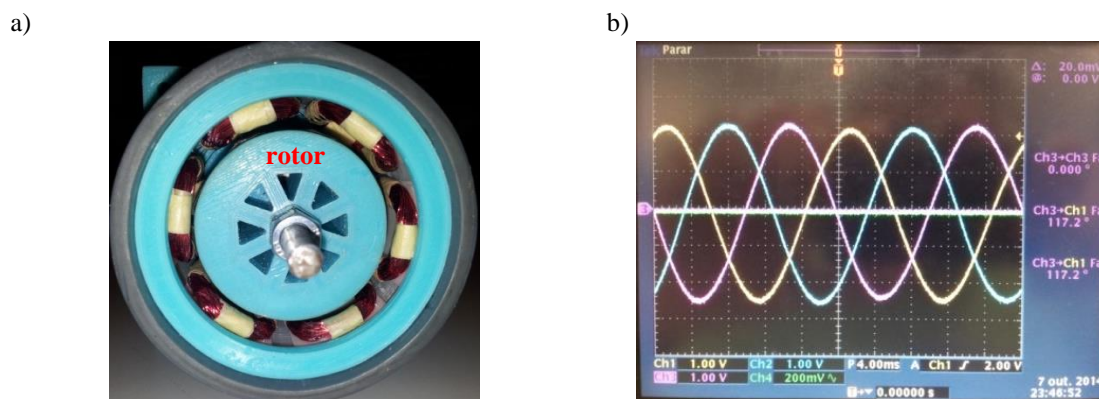


Figura 4.20 - Gerador hídrico: a) Perfil interior e b) ondas produzidas pelo gerador desfasadas de 120°.

Pela análise gráfica da figura 4.20 verifica-se que existe um desfasamento de aproximadamente 120° entre as diferentes ondas, referentes a cada grupo de associação de bobinas como expectável.

O passo seguinte consistiu na retificação das ondas geradas pelo sistema trifásico. Para tal, utilizou-se uma ponte retificadora de onda completa constituída por seis díodos de *Schottky* (MBRA210LT3G), que suportam uma corrente máxima de 2 A e apresentam uma queda de tensão de 0,325 V a 1 A. O condensador utilizado para o efeito de filtragem do *ripple* tem uma capacidade de 4900 μF . Na figura 4.21a) encontra-se o circuito impresso utilizado para esse efeito.

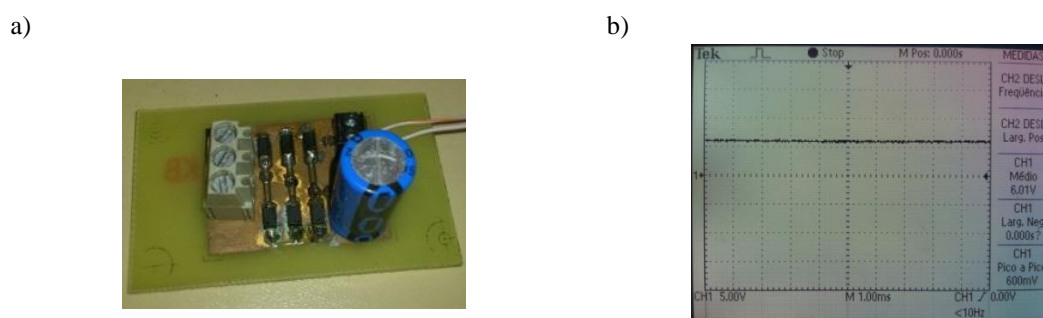


Figura 4.21 - Retificador: a) circuito de retificação e b) onda após retificação trifásica

Os resultados obtidos após o circuito de retificação encontram-se representados na figura 4.21b), pelo que se pode verificar uma tensão praticamente contínua.

Dos diversos modelos de pás existentes para hidrogeradores, optou-se pelo modelo de pás em hélice, visto que, nos campos agrícolas, os reservatórios de água encontram-se a um desnível pouco acentuado do solo. Outro fator tido em consideração na seleção do modelo de pás foi o caudal presente na tubagem do sistema de irrigação,

sendo que o caudal pode atingir os $7,34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para um desnível de 1,5 metros do reservatório de água em relação ao solo para uma tubagem de 25 mm de diâmetro.

A figura 4.22 apresenta a turbina utilizada no gerador. Esta turbina foi desenvolvida no âmbito de um estudo realizado em [17] e é constituída por quatro lâminas e apresenta um rendimento de 5,5%.

a)



b)

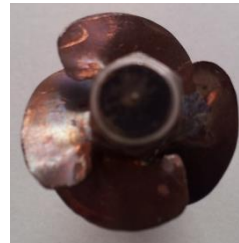


Figura 4.22 - Turbina em hélice de quatro lâminas: a) vista frontal e b) vista superior.

Construiu-se um suporte em acrílico que assenta sobre o tubo PVC onde irá ser colocado o gerador. A figura 4.23 ilustra a fase final do gerador construído para fins do projeto.



Figura 4.23 - Gerador hídrico construído.

Observando a figura 4.23 é possível ter a percepção do tamanho reduzido do gerador construído. O tamanho reduzido do gerador tem por objetivo minimizar o impacto visual que este poderia causar no sistema de irrigação.

Na prática, como o gerador hídrico irá ser colocado no exterior. Deste modo, este foi colocado dentro de uma caixa estanque de modo a protegê-lo contra a chuva e a humidade.

4.5.3. Testes do gerador hídrico

Na prática, para avaliar a potência produzida pelo gerador, foi necessário ajustar a altura do reservatório de água em três níveis de altitude distintos. Deste modo, variou-se a altura do reservatório para 0,5 metros, 1 metro e 1,5 metros face ao gerador hídrico.

Com a variação da altura do reservatório face ao solo e com uma tubagem de 25 mm de diâmetro entre o reservatório e o gerador, verificou-se que ocorreu um aumento do caudal médio. O caudal foi de $6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para uma altura de 0,5 metros,

$6,84 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para uma altura de 1 metro e $7,34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para uma altura de 1,5 metros. Após o conhecimento do caudal médio, foram realizadas as medições de corrente e de tensão, para as várias resistências de carga. O anexo F contém os resultados destes testes para cada nível de caudal médio.

Analisando as tabelas do anexo F, constatou-se que o ponto de máxima potência do gerador foi de 210 mW para uma carga de 218Ω para um caudal de $6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. No caso do caudal de $6,84 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, o ponto de máxima potência do gerador foi de 271 mW para uma carga de $148,6 \Omega$. Para um caudal de $7,34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e uma carga de 218Ω o ponto de máxima potência do gerador obtido corresponde a 442 mW. A figura 4.24 mostra os resultados obtidos ao longo dos testes realizados.

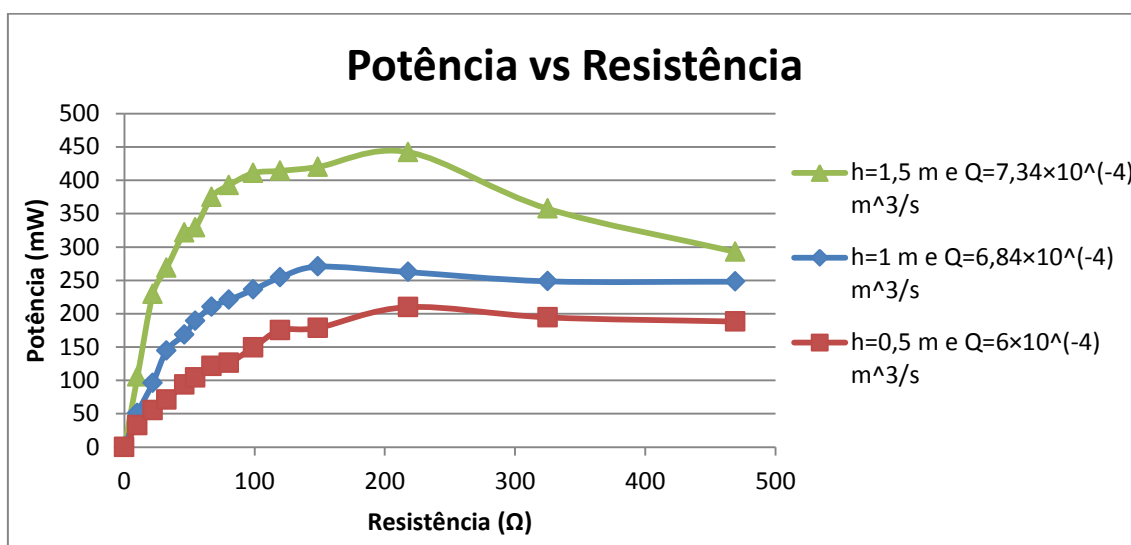


Figura 4.24 - Potência em função da resistência de carga.

Tendo em consideração que o consumo médio do nó atuador é de 5,04 mW, verifica-se pela análise gráfica da figura 4.24, que o gerador hídrico consegue dar resposta às necessidades energéticas do nó atuador, mesmo para o caso de o reservatório permanecer a 0,5 metros do solo.

No protótipo, o gerador hídrico será colocado na canalização referente ao cultivo da banana, uma vez que este tipo de cultivo requer uma maior quantidade de água durante o seu período de irrigação comparativamente ao cultivo dos morangueiros.

Na figura 4.25 encontra-se representado o diagrama de blocos do gerador hídrico realizado neste trabalho.

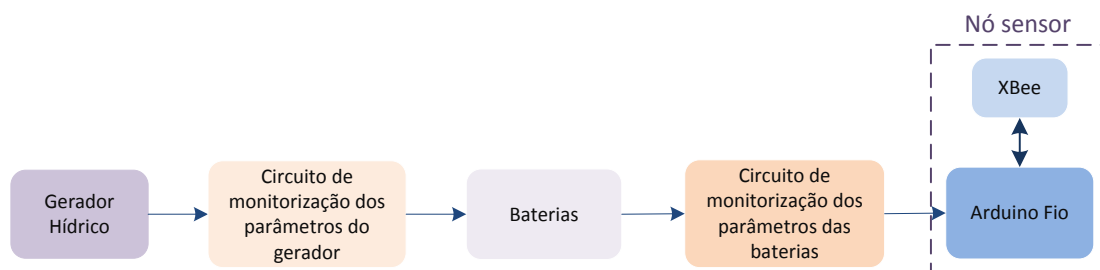


Figura 4.25 - Diagrama de blocos referente ao protótipo do gerador.

Pelo diagrama de blocos da figura 4.25, constata-se que, apesar da energia produzida pelo gerador hídrico ser constante, esta será armazenada por baterias e não

fornecida diretamente ao nó atuador. Esta situação ocorre pelo facto de o gerador apenas produzir energia, no caso da válvula do cultivo das bananeiras for acionada.

Na prática, para determinar a velocidade angular do gerador, teve-se em consideração a tensão em circuito aberto produzida pelo gerador ($V = 16,18$ V), o número de espiras por bobina ($N = 150$ espiras) e os restantes parâmetros mencionados no cálculo teórico. Assim, pela equação (4.13), a velocidade angular obtida foi de $\omega = 260$ rad/s valor superior ao utilizado no cálculo teórico, dado que, no cálculo teórico foi utilizado o valor de um modelo de gerador construído. Contudo, a utilização dos parâmetros de geradores construídos é apropriado para o dimensionamento de novos geradores do mesmo modelo.

4.6. Nó sensor para monitorização dos parâmetros do solo

Os nós sensores do solo permitem a monitorização em tempo real dos valores de produção do painel (tensão e corrente), da temperatura e humidade do solo, do teor de água do solo (kPa), da humidade da folhagem, o consumo das baterias e o RSSI. No protótipo foram construídos dois nós sensores, um para cada um dos cultivos.

4.6.1. Calibração dos sensores do solo

A calibração dos sensores do solo foi realizada tendo em consideração os parâmetros proferidos pelos seus fabricantes. Deste modo, procedeu-se com a calibração dos sensores do solo com base na informação descrita na seção 3.3.1 deste trabalho.

No sensor de humidade da folha, como o valor de saída deste varia entre 0 e 2,71 V para uma alimentação de 3 V, foi necessário ajustar a gama dos valores de saída do sensor para a do Arduino. Após a atribuição da nova escala de valores, introduziu-se no código a reta de calibração dada pela equação (3.4).

Na calibração do sensor de humidade do solo o procedimento é muito semelhante ao da calibração do sensor de humidade da folha, ou seja, foi necessário ajustar a gama de valores de saída do sensor para a do Arduino e introduzir no código a curva de calibração dada pela equação (3.5).

Para medir a temperatura do solo, pelo termístor NTCASCWE3, é essencial calcular o valor da resistência, visto que a tensão de saída do termístor NTCASCWE3 está associada ao valor da resistência dado pela equação (3.6). Assim, na programação do Arduino, definiu-se a equação (3.7) em função da equação (3.6). O termístor NTCASCWE3, depois da calibração apresenta uma precisão de 0,5 graus Celsius.

Relativamente à calibração do sensor de humidade do solo, com base no teor de água, o procedimento de calibração é muito semelhante ao termístor NTCASCWE3. Desta forma, foi essencial introduzir no Arduino a curva de calibração para determinar o valor da resistência dado pela equação (3.8) e, posteriormente, converter o valor da resistência em tensão do solo (equação (3.9)). O sensor após a calibração apresenta uma precisão de 1 kPa, o que corresponde a um erro de 0,5% por medição.

4.6.2. Arquitetura do nó sensor do solo

No nó sensor do solo a alimentação é realizada de igual forma que o nó da estação, ou seja, por dois painéis solar ligados em série. Na figura 4.26 encontra-se representado a arquitetura do nó sensor do solo.

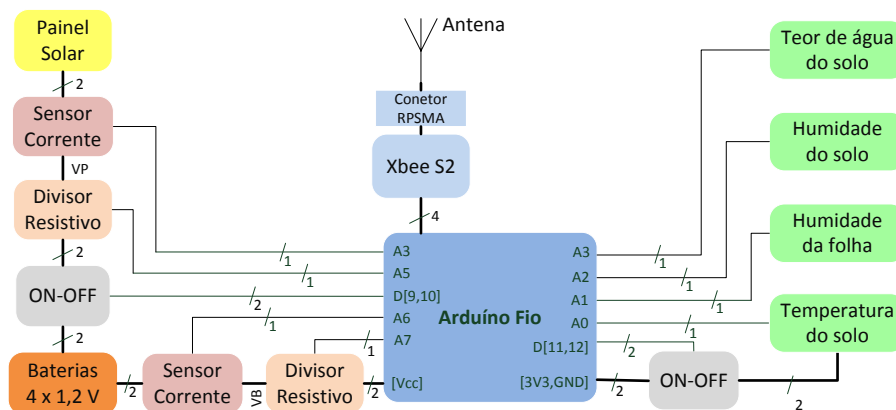


Figura 4.26 - Arquitetura do nó atuador.

A arquitetura do nó do solo é composta por vários blocos, sendo que estes já foram mencionados nas seções anteriores.

4.6.3. Consumo do nó sensor

No consumo total do nó sensor foi tido em consideração os consumos fornecidos pelos fabricantes de cada componente, quando é aplicada uma tensão de 3,3 V a uma temperatura ambiente de 25 °C. A tabela 4.3 mostra os respetivos valores referente aos consumos.

Tabela 4.3 - Valores referentes ao consumo de cada componente do nó sensor do solo.

	Estado		
	Ativo (mA)	Inativo (mA)	Adormecido (µA)
Arduino fio	3,8	0,8	180
Rádio XBee S2	Tx – 40 Rx – 40	15	<1
Sensor MAX9929F		2×20 µA	
Leaf Wetness Sensor		6 mA	
Sensor WaterScout		6 mA	
Sensor de humidade Watermark	0,2 mA (solo seco) e 1 mA (solo húmido)		
TOTAL	56,84 mA	28,84 mA	13,18 mA

Nos valores dos consumos obtidos foi tido em consideração que o sensor de humidade do solo *Watermark* encontra-se em solo húmido (pior caso). Também é de mencionar que, a estes valores, falta a contribuição do sensor termístor NTCASCWE3. Como o termístor NTCASCWE3 é um sensor resistivo de elevada carga, o consumo deste poderá ser desprezado.

No protótipo, o nó sensor do solo opera nos dois estados e como os valores medidos por este não variam repentinamente, considerou-se um intervalo de envio da informação com uma periodicidade de 300 s, sendo que 0,2 s do tempo o nó sensor encontra-se no estado ativo e 299,8 s no estado adormecido, então pela equação (4.3) determina-se o consumo médio do nó.

$$Consumo_{m\u00e9dio} = \frac{56,84 \text{ mA} \times 0,2 \text{ s} + 13,18 \text{ mA} \times 299,8 \text{ s}}{300 \text{ s}} = 13,21 \text{ mA}$$

Logo, pela equação (4.2) a duração das baterias quando operam sobre um ciclo de 300 s é de:

$$Dura\u00e7\u00e3o = \frac{2300 \text{ mAh} \times 0,8}{13,21 \text{ mA}} = 139,29 \text{ horas}$$

o que corresponde, aproximadamente a 5 dias e 19 horas.

Tendo em consideração que o consumo médio de corrente do nó atuador é de 13,21 mA e como o nó sensor é alimentado por quatro baterias ligadas em série de 1,2 V, a potência de consumo é 63,41 mW.

4.6.4. Circuito interno do nó sensor

O circuito elétrico do nó sensor do solo corresponde, essencialmente, ao circuito de carregamento ON-OFF e ao circuito de condicionamento de sinal do sensor de humidade solo (*Watermark*), como ilustrado na figura 4.27.

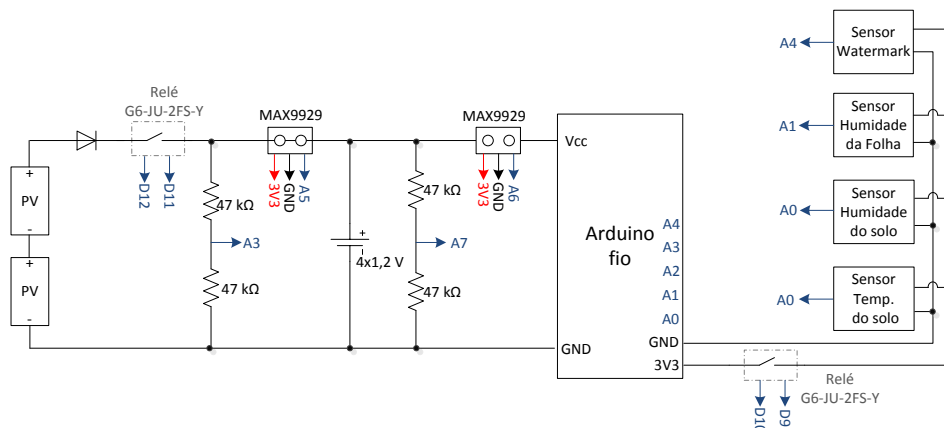


Figura 4.27 - Circuito elétrico do nó atuador.

O Anexo E3 contém o esboço referente à construção do nó sensor do solo.

4.6.5. Construção do nó sensor do solo

Na construção do nó sensor foi tido em consideração que o sistema continha dois cultivos distintos, pelo que foi necessário construir dois nós sensores do solo. A construção destes seguiu os mesmos procedimentos, descritos na construção dos outros nós do trabalho.

Estes nós também foram colocados em ambiente exterior, pelo que foi necessário proteger o equipamento eletrónico contra condições climáticas adversas. A figura 4.28a) ilustra o interior da caixa com o circuito do nó atuador.

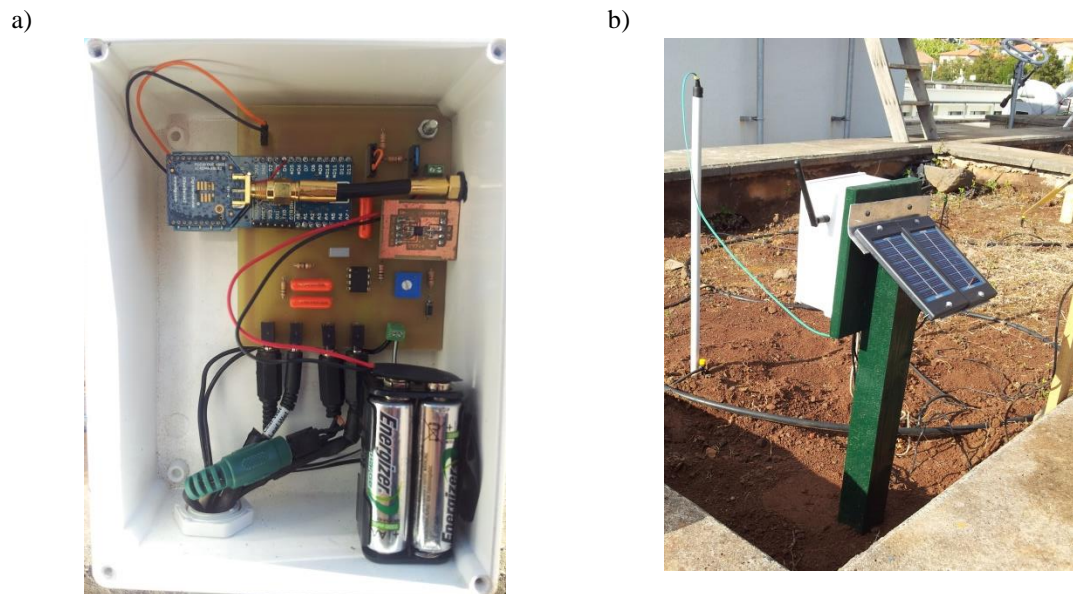


Figura 4.28 - Nó sensor do solo: a) perspetiva interior e b) perspetiva exterior

Na figura 4.28a) é possível observar os componentes que constituem o sistema do nó sensor do solo.

A figura 4.28b) apresenta o perfil global de um dos nós sensores desenvolvidos, colocado no ambiente de monitorização. Nesta figura, também é possível observar os sensores inseridos no solo e a estrutura desenvolvida para instalação do nó sensor do solo.

O nó sensor do solo também possui os sensores de monitorização e a antena no exterior, pelo que foi preciso realizar o isolamento da caixa. O isolamento foi efetuado de igual modo aos dos outros nós (estação meteorológica e nó atuador).

A estrutura do nó sensor do solo foi inserida num dos canteiros do terraço da Universidade da Madeira.

4.6.6. Programação do nó sensor

No Arduino a programação do nó sensor abrange vários aspetos como mencionado, na programação do nó da estação e na programação do nó atuador.

A figura 4.29 mostra o fluxograma correspondente ao código implementado no sensor do solo.

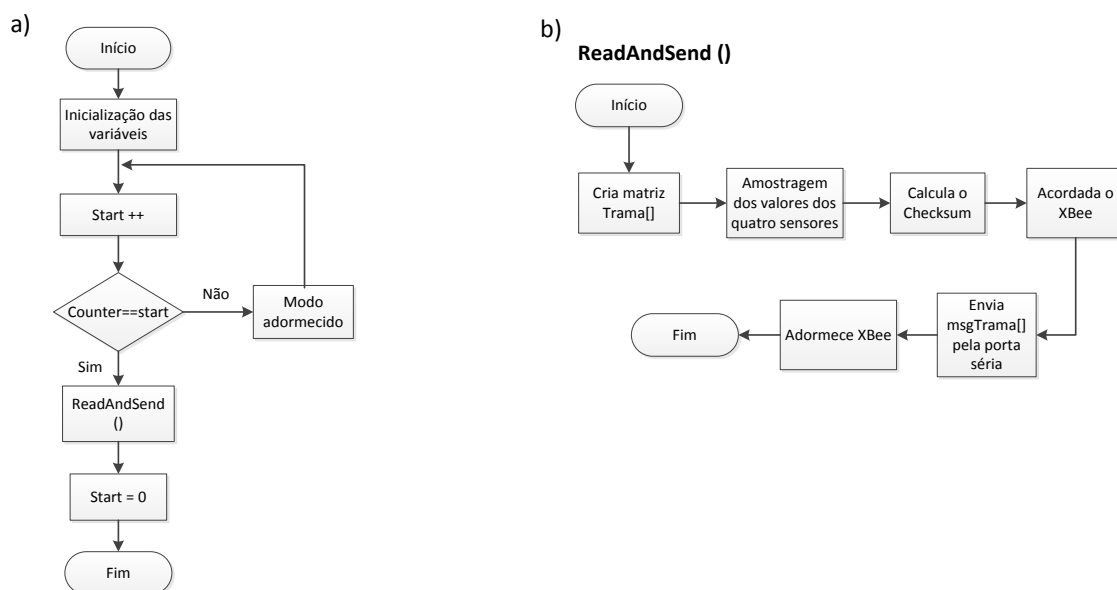


Figura 4.29 - Fluxograma do código implementado no Arduino referente ao nó sensor do solo.

O código implementado em linguagem C no Arduino fio referente ao nó sensor do solo pode ser consultado no anexo H3 do trabalho.

Para concluir, foi efetuada uma análise financeira do custo de implementação de todo o sistema de irrigação, sendo esta apresentada no anexo G.

4.7. Rede de comunicação

No trabalho foi utilizada uma rede sem fios composta por rádios XBee, que possibilita a comunicação dos dados referentes a cada protótipo desenvolvido. Esta rede sem fios foi integrada numa base de dados preparada para a receção dos dados provenientes do XBee. A rede é composta por quatro nós sensores, que fazem a monitorização dos sistemas desenvolvidos, um nó *router* e um nó coordenador. Os nós sensores comunicam com o nó *router* através de uma ligação por radiofrequência, que, por sua vez, também comunica com o coordenador com a mesma ligação. O coordenador envia a informação para a estação base através da porta USB, a qual é tratada e, posteriormente, armazenada numa base de dados. Os dados obtidos são apresentados numa interface gráfica através de uma página da *Internet*.

4.7.1. Configuração dos módulos XBee

Para a configuração dos módulos do XBee, foi necessário instalar o *software* XCTU, disponibilizado gratuitamente pela empresa DIGI no endereço eletrónico www.digi.com. O rádio XBee foi ligado numa placa de aquisição de dados (*XBee Explorer*) conectada por um cabo USB ao computador. A figura 4.30 mostra a janela principal do programa.

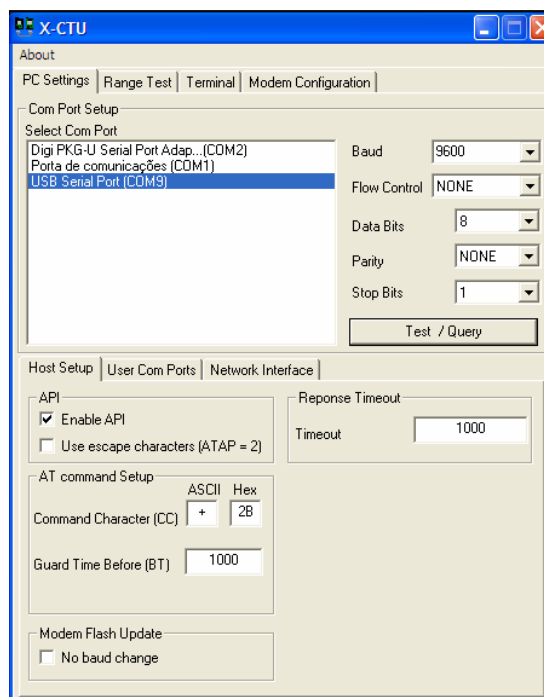


Figura 4.30 - Janela principal do programa X-CTU.

Os rádios XBee são regulados de fábrica para trabalharem no modo AT, embora não sendo o modo mais adequado para o desenvolvimento do projeto. Por isso, procedeu-se à alteração para o modo API.

Posteriormente, à configuração do XBee no modo API, no X-CTU selecionou-se o separador *Modem Configuration*. Neste separador é possível selecionar o modelo XBee e configurar o *firmware* de operação do modelo selecionado.

Para configurar o XBee como coordenador da rede é necessário selecionar na opção *Function Set* o *firmware* de operação “ZIGBEE COORDINADOR API”.

Posto isto, definiu-se no separador *Networking* a *PAN ID*, que identifica o *ID* da rede, onde se definiu a *PAN ID* como 46. Outro parâmetro essencial na configuração do XBee como coordenador consiste nos tempos de adormecimento da rede (configuração do SP e SN). O parâmetro SP determina o tempo limite que o nó coordenador tem para armazenar e enviar uma mensagem ao nó terminal antes que este entre no modo adormecido. Relativamente ao parâmetro SN, este corresponde ao número de ciclos de adormecimento da rede. No caso do nó terminal não enviar um pedido para registar-se na rede durante o tempo estabelecido, ele é descartado da rede pelo coordenador.

No coordenador, no separador *Sleep Modes* no parâmetro SP, colocou-se o valor máximo permitido pelo XBee, sendo este de 28 s, o que corresponde em hexadecimal a AF0. O parâmetro SN foi de 10, visto que os nós sensores do solo enviam a informação a cada 5 minutos.

Os restantes parâmetros não foram alterados, mantendo-se as configurações predefinidas. As configurações foram guardadas nos XBee através da opção *Write*.

Na configuração do módulo XBee como *router* da rede é necessário selecionar na opção *Function Set* o *firmware* de operação “ZIGBEE ROUTER API”. O restante procedimento é idêntico ao da configuração do XBee como coordenador, ou seja, o mesmo *PAN ID*, *SP* e *SN*.

Para a configuração do módulo XBee como nó sensor da rede alterou-se no “*Function Set*” para a opção “ZIGBEE END DIVICE API”, mantendo sempre o mesmo “PAN ID”.

Na configuração do módulo XBee como dispositivo terminal não é necessário configurar os parâmetros SN e o SP, mas foi essencial configurar na pasta *Sleep Mode*, o *Sleep Mode-1-PIN HIBERNATE*, para o nó terminal poder entrar no modo adormecido.

A figura 4.31 mostra a configuração do módulo XBee como coordenador e como nó sensor.

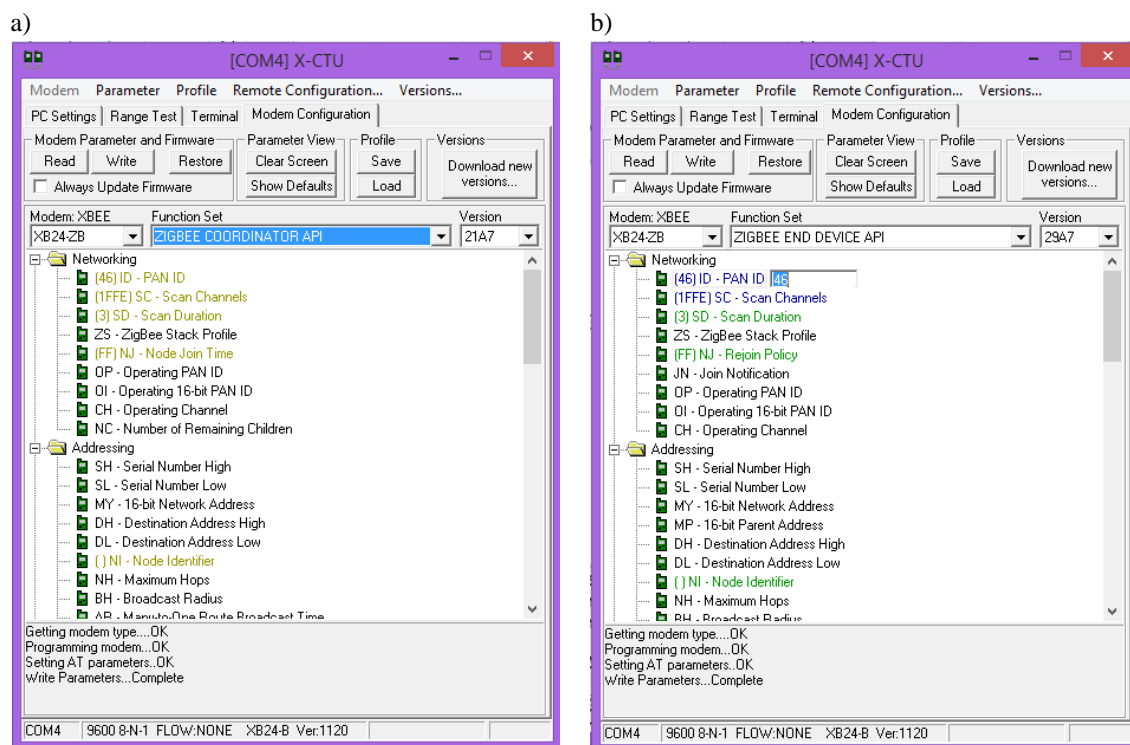


Figura 4.31 - Configuração do módulo XBee: a) Cordenador e b) nó sensor.

Para verificar a presença dos nós na rede selecionou-se o *Remote Configuration*, seguido da opção *Open Port* e, por fim, a escolha do separador *Discover*. O resultado é mostrado na Figura 4.32.

Address	Node Identifier	Type	Short Address	Profile
13A2004069842C		Coordinator		
13A20040B088E0		Router	41A6	
13A2004030C05A		End Device	3CC0	
13A200409EDA2A		End Device	1356	

Figura 4.32 - Nós presentes na rede.

Na figura 4.32 só é possível visualizar os rádios XBee na rede, como coordenador, *router* e nó terminal. Porém, existem mais dois rádios XBee configurados como nós terminais que não constam na figura 4.32. Este facto sucede devido ao tempo de adormecimento dos mesmos ser elevado.

4.8. Base de dados e Aplicação web

No sistema, os dados são processados, manipulados e armazenados numa base de dados desenvolvida para esse efeito. A base de dados utilizada neste trabalho disponibiliza os dados oriundos dos nós sensores em tempo real através de uma página de *internet* e possibilita a atuação das válvulas de forma eficaz, de modo a proporcionar à cultura as condições ideais para o seu correto desenvolvimento.

Para o armazenamento e tratamento dos dados monitorizados pelos sensores utilizou-se o programa *NetBeans IDE 7.1*. Este programa é desenvolvido em linguagem *java* e permite a construção de aplicações. Para desenvolver a aplicação foi fundamental implementar as classes necessárias para desempenhar determinadas funções, nomeadamente, a comunicação com a porta série, a manipulação de mensagens com diferentes identificadores API, o envio de uma mensagem de *broadcast* para o pedido de RSSI, o armazenamento na base de dados, entre outros. Para a implementação da base de dados foi utilizado o MySQL.

A base de dados utilizada no projeto foi desenvolvida no âmbito de um trabalho realizado por Filipe Santos no âmbito de uma unidade curricular.

O funcionamento da aplicação da página de *Internet* é ilustrado no fluxograma da figura 4.33.

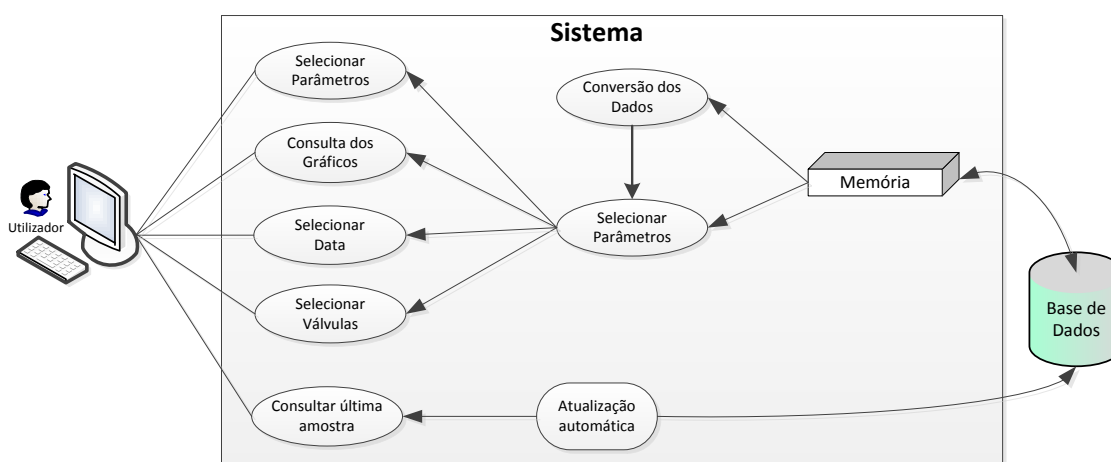


Figura 4.33 - Diagrama de fluxo dos dados.

No sistema, os dados são guardados na base de dados em diferentes tabelas, pelo que o utilizador ao aceder à página *web* poderá visualizar os gráficos em qualquer data. O utilizador também pode selecionar os vários parâmetros do sistema, bem como a ativação e desativação do sistema de rega.

Para a visualização gráfica dos dados do sistema de irrigação foi reutilizada uma página *web* desenvolvida em PHP. Na reformulação da interface da página *web* foram feitas as configurações necessárias para a visualização dos respetivos parâmetros, bem como a interação da página com o sistema de irrigação.

A interface da página *web* desenvolvida especificamente para o protótipo encontra-se representada na figura 4.34, onde o utilizador pode consultar, em tempo real, os resultados de cada sistema e atuar no sistema de irrigação do cultivo.

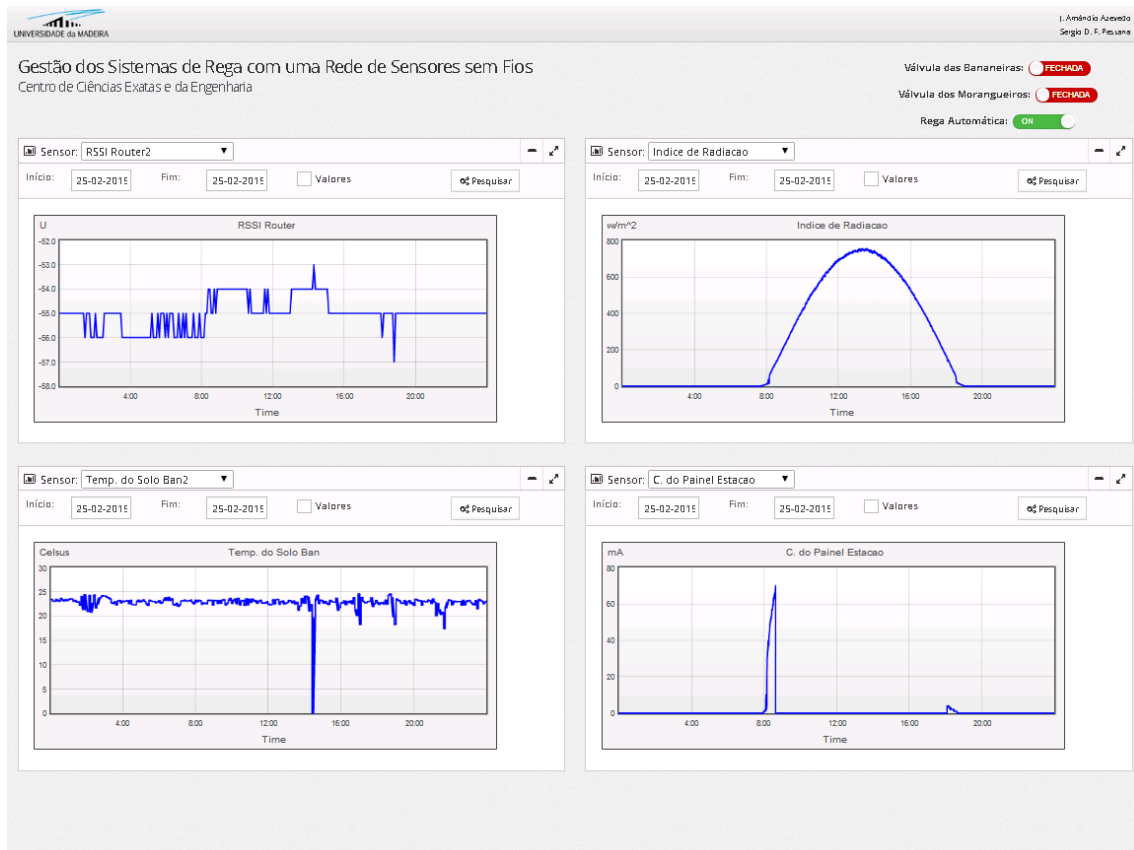


Figura 4.34 - Interface da página *web* do sistema de irrigação.

A página *web* desenvolvida permite ao utilizador a consulta de quatro parâmetros em simultâneo de forma gráfica, o que proporciona uma melhor análise do funcionamento do sistema de irrigação. Caso o utilizador tenha interesse em visualizar os valores medidos pelos nós sensores, a página *web* permite a visualização em texto dos respetivos valores ou a expansão do gráfico selecionado com os respetivos valores. Outra característica da página *web* desenvolvida consiste na exportação dos dados mensurados pelos nós sensores, para um ficheiro Excel. Deste modo, o utilizador poderá realizar estatísticas sobre o sistema de irrigação.

Por último, a página *web* contém três botões, dois dos quais correspondem a ativação manual das válvulas (um para cada cultivo), onde o utilizador poderá acionar o sistema de irrigação. No caso de o sistema de irrigação ser acionado o utilizador irá receber uma mensagem informativa a confirmar, o pedido efetuado pelo mesmo. É de salientar que, quando o sistema de rega não é acionado, os botões da aplicação *web* possuem a cor vermelha, caso contrário estes detêm a cor verde.

O terceiro botão consiste na seleção da irrigação automática, onde o sistema efetua a irrigação com base nos parâmetros pré configurados. No caso da irrigação automática ser selecionada, o botão detém a cor verde (ver figura 4.34), caso contrário possui a cor vermelha. No caso da figura 4.34 pode-se constatar que o botão de rega automática encontra-se ativado.

5. Testes e Resultados

Neste capítulo é apresentada a localização em ambiente exterior do sistema de irrigação, bem como os resultados dos testes efetuados ao mesmo em ambiente real. O protótipo desenvolvido foi submetido a determinados testes durante vários dias e/ou meses, com o intuito de avaliar o seu grau de fiabilidade e de robustez.

Nos resultados obtidos, começou-se por analisar o modelo de carregamento ON-OFF das baterias ao longo da estação do outono e inverno. Nesta análise verificou-se que o modelo de carregamento ON-OFF, durante estas duas estações, consegue responder às necessidades energéticas do protótipo. Seguidamente, comparou-se os resultados obtidos pela estação meteorológica com os do IPMA (Instituto Português do Mar e Atmosfera), de forma a conferir os mesmos.

Outra análise efetuada no trabalho consiste no funcionamento do nó sensor do solo, onde é possível visualizar os parâmetros mensurados por este.

De seguida, são analisados os resultados obtidos referentes ao nó atuador do sistema, nomeadamente, a produção do gerador hídrico, o acionamento das válvulas, a monitorização da passagem de água na tubagem de irrigação e a resposta dos sensores do solo em caso de irrigação do cultivo.

Por último, é efetuada uma análise sobre o estado da rede, para averiguar se é necessário a colocação de mais nós *router*.

5.1. Localização do Sistema

Para a localização do sistema, recorreu-se ao *software Google Maps* para ilustrar a localização geográfica onde foi instalado o protótipo do sistema de irrigação.

O protótipo desenvolvido foi colocado no exterior, no terraço da Universidade da Madeira, de modo a ter em consideração os efeitos climáticos adversos no sistema.

Na localização do sistema de irrigação é de referir que o nó coordenador da rede encontra-se situado no piso -2 da Universidade da Madeira, estando assim a um desnível de 18 metros dos nós sensores da rede. Devido a esta situação, foi necessário colocar um nó *router* para retransmitir a informação dos nós sensores para o coordenador e vice-versa.

A figura 5.1 mostra a posição geográfica e o local do sistema de irrigação.

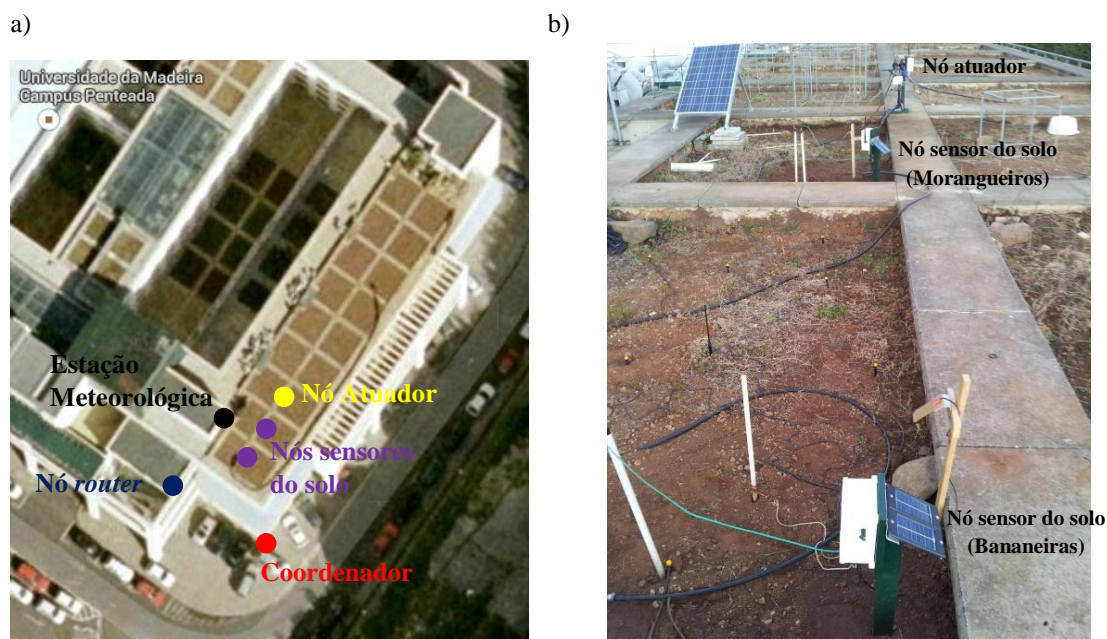


Figura 5.1 - Posição geográfica do sistema de irrigação: a) perfil aéreo e b) perfil local.

A figura 5.1a) mostra o perfil aéreo do local onde se encontra o sistema de irrigação instalado. Por outro lado, a figura 5.1b) mostra o posicionamento dos nós sensores no terreno.

5.2. Modelo de carregamento ON-OFF

Nos testes realizados ao modelo de carregamento ON-OFF teve-se em consideração o período de inverno, visto que é neste período que ocorre menor exposição solar diária. A figura 5.2 apresenta os resultados de produção do modelo de carregamento ON-OFF referente ao nó da estação meteorológica para um dia com pouca intensidade solar.

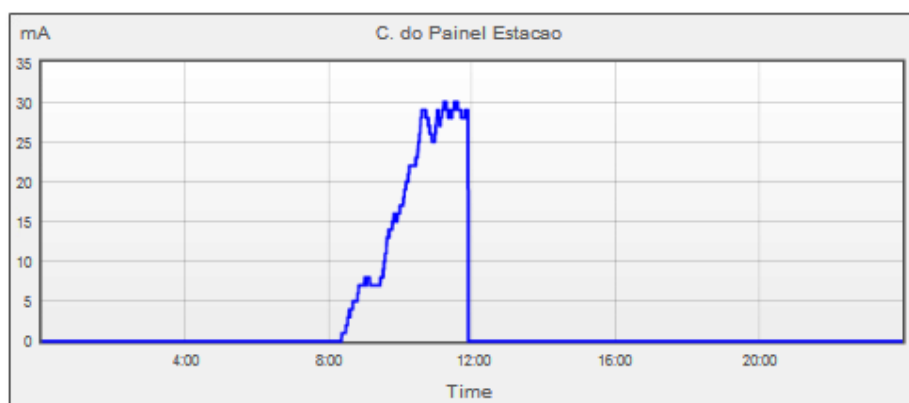


Figura 5.2 - Corrente produzida pelo painel solar num dia com pouca intensidade solar.

Na figura 5.2 é possível observar a produção de corrente do painel solar num dia com muita nebulosidade. Nesta, pode-se apurar que a corrente máxima produzida pelo painel é de 30 mA. Outro parâmetro visível na figura 5.2 consiste na descontinuidade ocorrida por volta das 12h. Esta descontinuidade sucede pelo facto das baterias do nó

sensor estarem completamente carregadas. De forma a conferir esta ocorrência, a figura 5.3 ilustra o comportamento da tensão das baterias no mesmo dia.

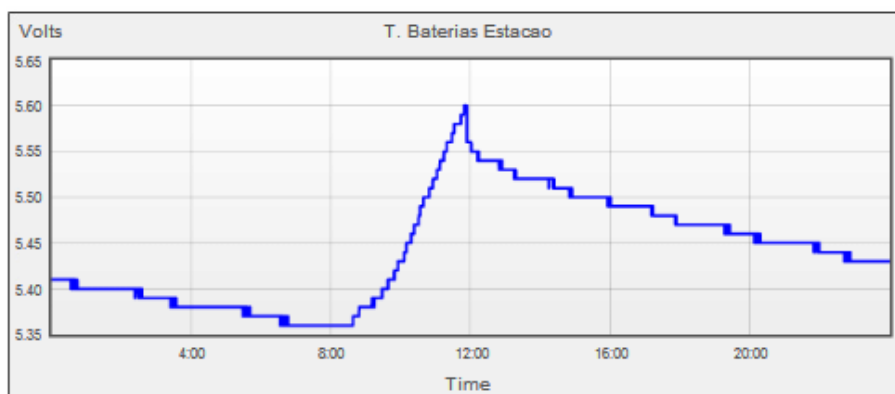


Figura 5.3 - Comportamento das baterias ao longo de um dia da estação meteorológica.

Pela análise gráfica da figura 5.3 pode-se constatar que o modelo de carregamento ON-OFF consegue fornecer energia em quantidade suficiente ao nó sensor, mesmo num dia com pouca intensidade de luz solar. Também na figura 5.3 é possível visualizar que quando a tensão da bateria atinge os 5,6 V o relé de proteção coloca o painel solar em circuito aberto para não danificar as baterias.

Por último, o relé só volta a ser acionado quando a tensão das baterias for inferior a 5,4 V, como pré-definido pela zona de histerese.

Relativamente à zona de histerese dos 4,75 aos 4,95 V não é possível visualizá-la graficamente, uma vez que a tensão das baterias não alcançou os 4,75 V quer para o caso do nó da estação meteorológica como o nó de monitorização do solo. A figura 5.4 mostra um período de 10 dias com pouca intensidade de luz solar.

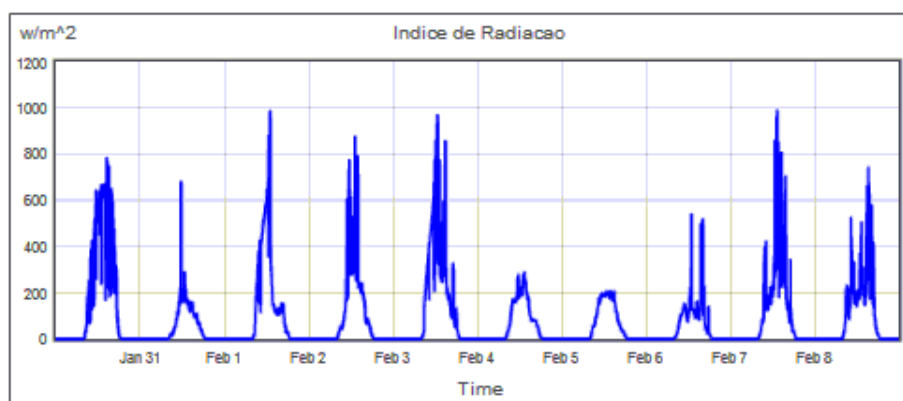


Figura 5.4 - Índice de radiação solar ao longo de 10 dias durante o inverno.

Tendo em consideração que ao longo destes 10 dias o índice de radiação solar foi baixo, a produção do painel solar decaiu acentuadamente. Todavia, o painel solar neste período conseguiu exceder a produção de energia e realizar o carregamento das baterias. A figura 5.5 mostra a produção do painel neste período dos 10 dias.

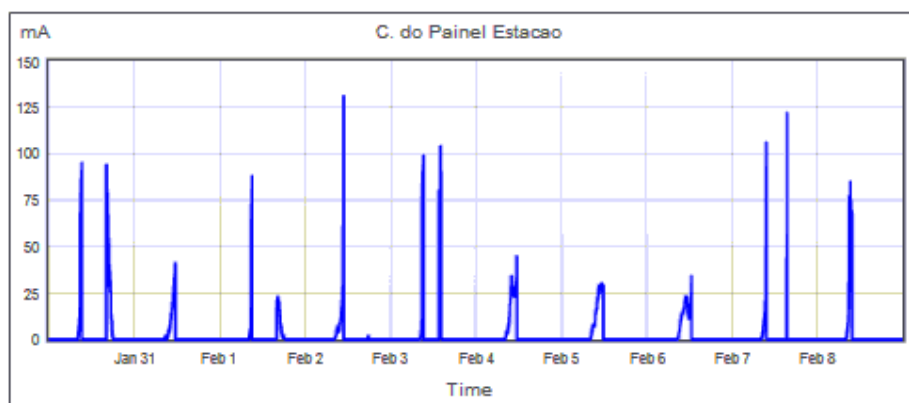


Figura 5.5 - Produção do painel ao longo de 10 dias durante o inverno.

Relativamente ao comportamento das baterias este encontra-se representado na figura 5.6.

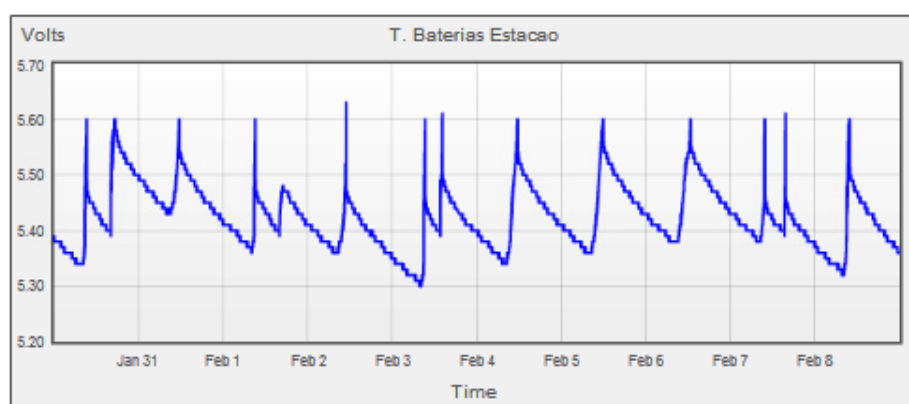


Figura 5.6 - Comportamento das baterias ao longo de 10 dias durante o inverno.

Na figura 5.6 pode-se visualizar o comportamento das baterias quando carregadas pelo painel solar, nomeadamente, as descontinuidades ocorrida no carregamento da bateria quando estas atingem a tensão máxima. Contudo, é de referir que a frequência de descontinuidades ocorridas no carregamento das baterias ocorrem pelo facto de as baterias não estarem completamente descarregadas, como pode-se conferir na figura 5.6.

Em suma, o modelo de carregamento ON-OFF aplicado no protótipo encontra-se em funcionamento desde maio de 2014 e este sempre teve um excedente de produção de energia relativamente ao consumo do sistema, mesmo no caso de ocorrer vários dias consecutivos de pouca luz solar.

5.3. Estação meteorológica

Como referido no trabalho, a estação meteorológica efetua a medição da temperatura ambiente, humidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, o índice de radiação solar e pluviosidade. Porém, na análise dos resultados apenas comparou-se os valores referentes à temperatura ambiente, humidade relativa do ar e velocidade do vento com os do IPMA.

A figura 5.7 mostra os resultados obtidos pela estação meteorológica relativamente à velocidade do vento, num dia com alguma intensidade de vento.

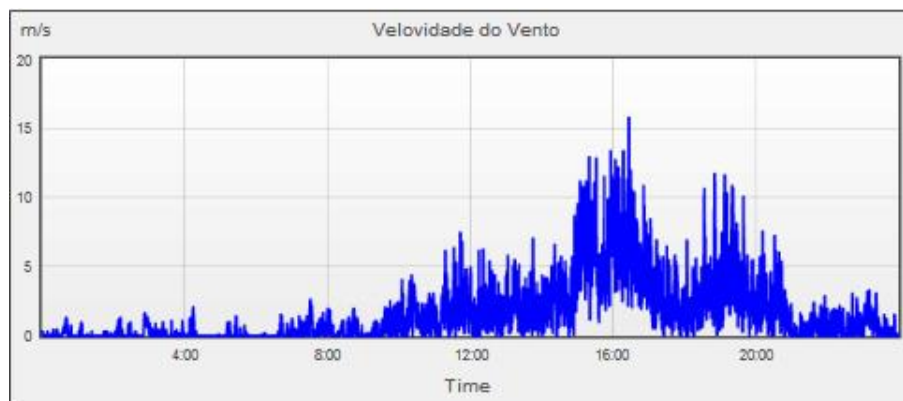


Figura 5.7 - Valores da velocidade do vento.

Pela figura 5.7, pode-se constatar que a velocidade máxima de vento atingida nesse foi de 15.75 m/s.

Posteriormente, compararam-se os valores medidos no dia 17 de fevereiro de 2015 pela estação meteorológica com os do IPMA. As figuras 5.8, 5.9 e 5.10 ilustram essa comparação. A estação do IPM utilizada nesta análise encontra-se situada na cidade do Funchal mais especificamente na zona do Lido.

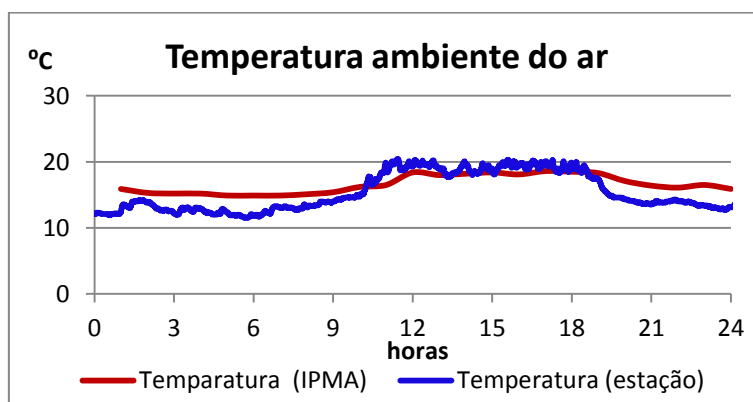


Figura 5.8 - Comparação dos valores da temperatura do ar.

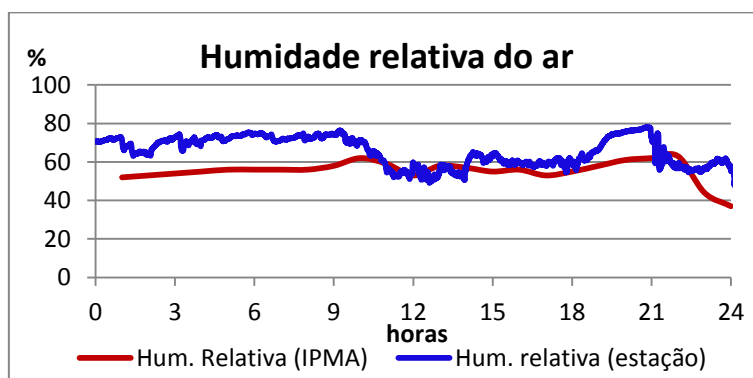


Figura 5.9 - Comparação dos valores da humidade relativa do ar.

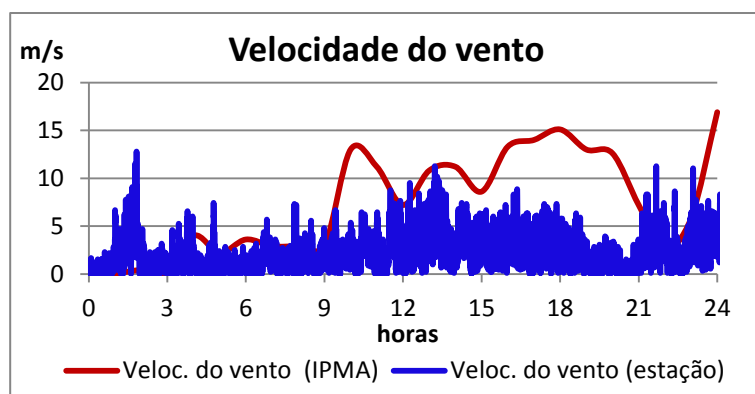


Figura 5.10 - Comparação dos valores da velocidade do vento.

Pela comparação gráfica pode-se verificar que, apesar do IPMA disponibilizar a informação de hora em hora, os valores obtidos na temperatura e na humidade relativa do ar, pela estação têm o mesmo seguimento que os valores mensurados pelo IPMA. Porém, no caso da velocidade do vento, os valores divergem, pelo facto de as duas estações meteorológicas encontrarem-se em localidades diferentes e também devido ao facto de o vento ter um comportamento imprevisível.

É de referir que a estação meteorológica encontra-se em pleno funcionamento desde junho de 2014.

5.4. Nó sensor do solo

No nó sensor do solo foram monitorizados os valores mensurados pelos sensores que compõem o mesmo. Neste ponto do trabalho, analisou-se os parâmetros do cultivo dos morangueiros. Comparativamente aos parâmetros do cultivo das bananeiras, estes serão analisados de acordo com os resultados obtidos pelo sistema de irrigação. As figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 mostram os resultados obtidos durante um dia de monitorização, onde foi realizada uma irrigação ao cultivo.

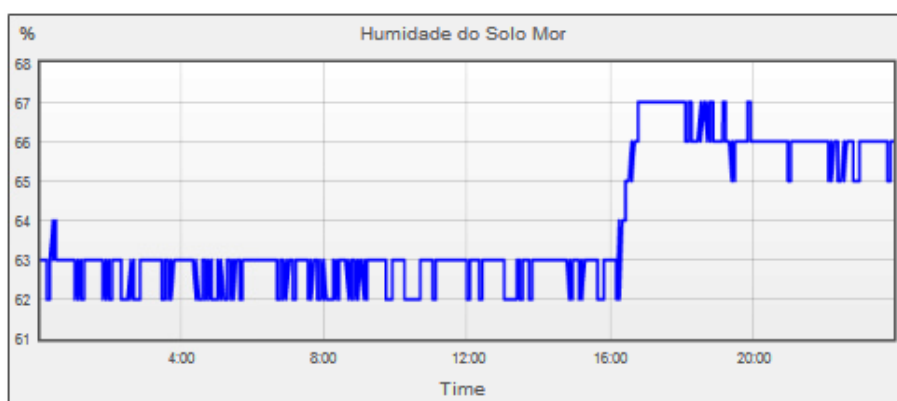


Figura 5.11 - Valores da humidade do solo do cultivo dos morangueiros.

Na figura 5.11 verifica-se que ocorreu uma variação da humidade do solo por volta das 16 horas. Esta situação advém do facto de ter sido realizada uma irrigação ao cultivo. Para conferir o estado do solo, a figura 5.12 mostra os valores mensurados pelo sensor que monitoriza o teor de água presente no solo (sensor de humidade *Watermark*).

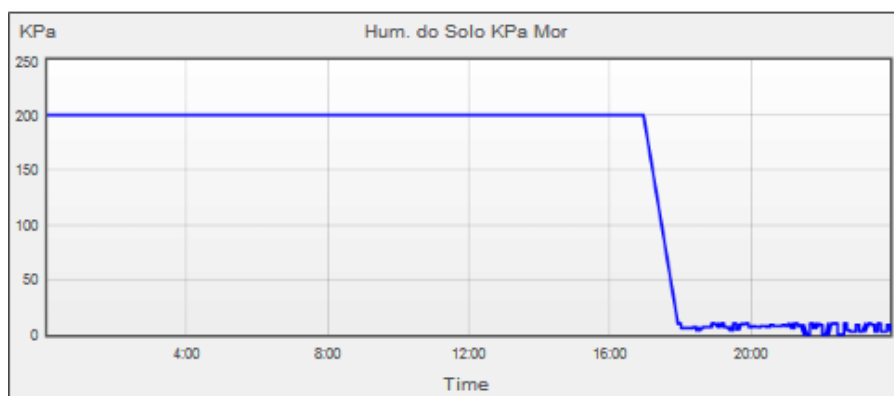


Figura 5.12 - Valores da medição do teor de água presente no solo do cultivo dos morangueiros.

Pela figura 5.12 pode-se verificar que, após a irrigação o solo dos morangueiros, encontra-se no estado húmido, visto que a tensão de água monitorizada pelo sensor de humidade *Watermark* ronda os 10 kPa. Relativamente à temperatura do solo, neste mesmo período, esta encontra-se representada na figura 5.13.

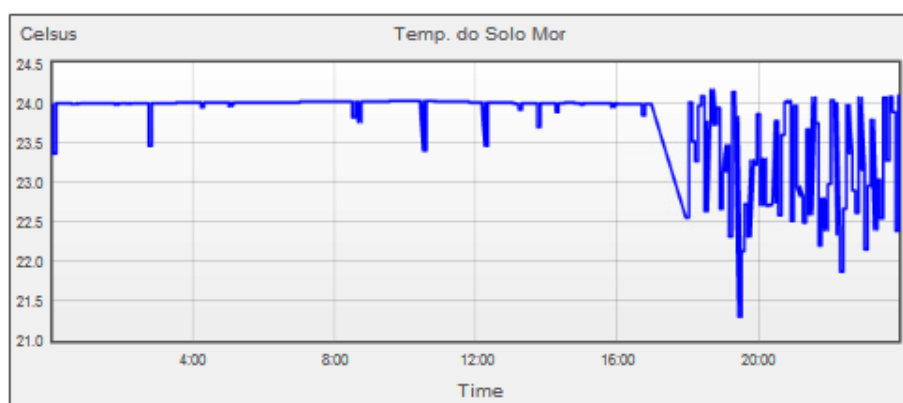


Figura 5.13 - Valores da temperatura do solo do cultivo dos morangueiros.

Pela figura 5.13 verifica-se que a temperatura do solo do cultivo dos morangueiros reduziu durante o período de irrigação de 24 °C para os 22,5 °C.

Por último, são analisados os valores da humidade da folhagem que se encontram ilustrados na figura 5.14.

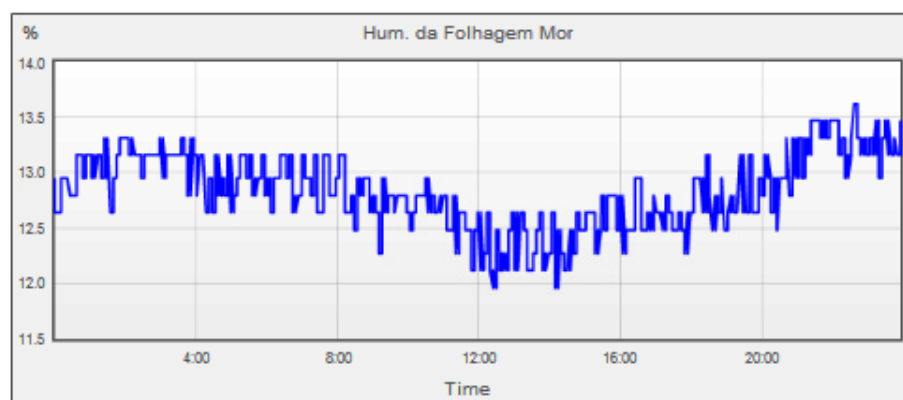


Figura 5.14 - Valores da humidade da folhagem do cultivo dos morangueiros.

Na análise da figura 5.14 constata-se que a humidade da folhagem diminui durante o dia e aumenta ao longo da noite, como expectável.

O sensor de humidade da folhagem não é influenciado pela irrigação ao cultivo, pois este encontra-se a 40 cm acima do solo. Todavia, este sensor permite estudar a ocorrência de orvalho noturno (ou sereno).

Por último, os dois nós sensores do solo encontram-se em pleno funcionamento desde fevereiro de 2015.

5.5. Sistema de irrigação

O sistema de irrigação desenvolvido permite o acionamento das eletroválvulas de forma manual ou de forma automática através do processamento dos dados obtidos.

Na forma manual, o utilizador terá de atuar nos botões da aplicação *web* e esperar aproximadamente 40 s para que o nó atuador possa receber o comando para ativar ou desativar a eletroválvula. Este tempo de espera deve-se ao facto da base de dados apenas enviar o pedido a cada 20 s e também do tempo de adormecimento do nó atuador ser de 20 s. Porém, poderão ocorrer situações que levem mais tempo a acionar as válvulas do sistema, nomeadamente, no caso de a base de dados enviar o comando e de o nó atuador se encontrar no modo adormecido. Devido a esta situação, a base de dados envia periodicamente a cada 20 s o comando com o respetivo pedido até esta receber o *acknowledgement* restituído pela válvula. Desta forma garante-se que o cultivo será irrigado. O tempo de 20 s definido na base de dados deve-se ao facto de o nó *router* apenas poder tratar de um pedido a cada 28 s.

Relativamente à forma automática, esta é concebida tendo em consideração os parâmetros mensurados pelos sensores do solo. Assim, no caso do cultivo das bananeiras quando a humidade do solo mensurada for inferior a 60%, será realizado a irrigação ao cultivo, sendo que a irrigação deverá ser desativada aos 90% de humidade do solo. No caso do cultivo dos morangueiros, apenas quando o valor medido do teor de água do solo (sensor de humidade *Watermark*) apresentar um valor superior a 60 kPa (solo Siltoso), é atuado o sistema de rega, sendo a irrigação desativada aos 10 kPa.

5.5.1. Gerador Hídrico

No gerador hídrico foram realizados dois testes distintos, sendo que no primeiro teste não se incluiu o sistema de rega gota a gota combinado com microaspersores, enquanto no segundo teste foi incluído o sistema de rega.

No primeiro teste realizado ao gerador hídrico teve-se em consideração que este fornecesse energia diretamente ao nó atuador. Este teste teve como propósito a verificação da corrente máxima produzida pelo gerador.

Nos testes realizados de modo a simular o caudal de água no terraço da Universidade da Madeira, ligou-se a canalização do gerador à rede de distribuição de água da Universidade. A figura 5.15 mostra os valores de corrente produzida pelo gerador.

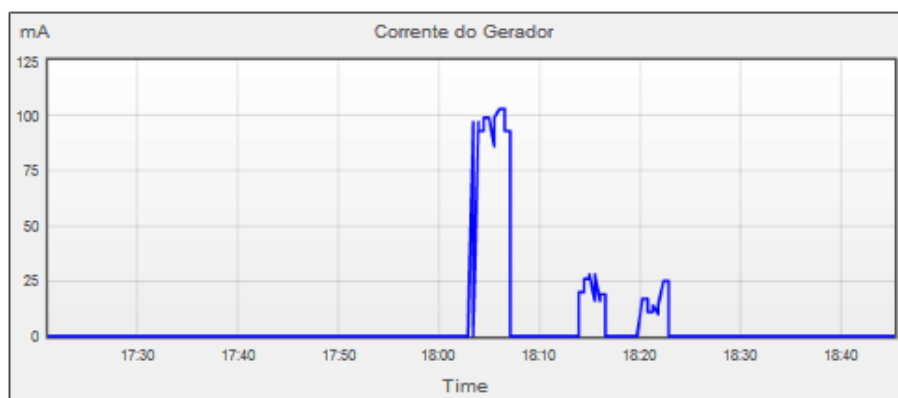


Figura 5.15 - Corrente máxima produzida pelo gerador.

Na figura 5.15 pode-se verificar que a corrente máxima produzida pelo gerador é de aproximadamente 103 mA para uma tensão de 4,75 V, o que perfaz uma potência máxima produzida pelo gerador de 489,25 mW. Esta potência foi produzida para um caudal de água de $7,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Posteriormente, reduziu-se o caudal de água para os $5,84 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e constatou-se que a corrente máxima produzida pelo gerador decaiu para os 25 mA a uma tensão de 4,75 V.

No segundo teste incluiu-se o sistema de rega gota a gota combinado com microaspersores. A figura 5.16 apresenta os resultados do segundo teste.

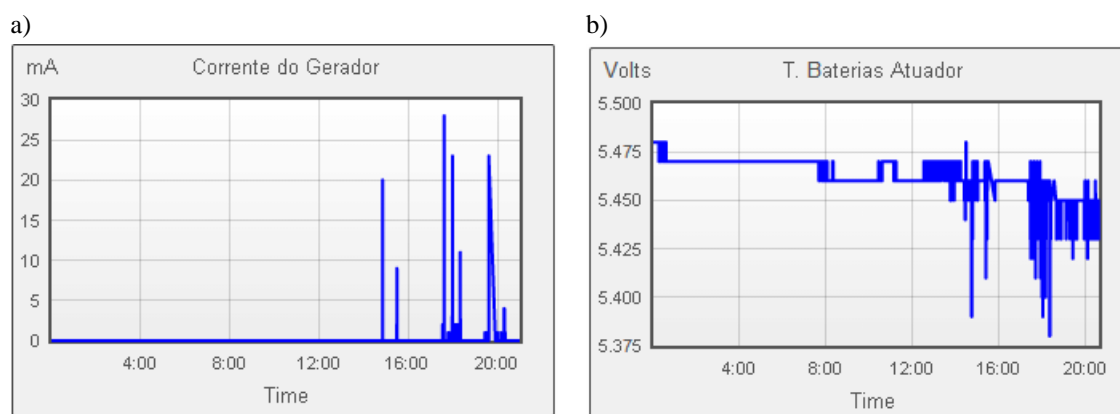


Figura 5.16 - Resultados do teste do gerador hídrico: a) corrente fornecida ao nó atuador e b) comportamento da tensão das baterias do nó atuador.

Observando a figura 5.16a) pode-se verificar que a corrente máxima produzida pelo gerador hídrico, quando aplicado o sistema de rega gota a gota combinado com microaspersores, é de 20 mA para uma tensão de 5,45 V, o que corresponde a uma potência de 109 mW. É de salientar que o sistema de rega utilizado para fins de teste consiste num sistema de rega de pequenas dimensões. Todavia, num caso real, como a quantidade de água aplicada num cultivo de bananeira é elevada, o gerador hídrico poderá gerar grandes quantidades de energia. No entanto, 109 mW pode ser mais do que suficiente para manter uma bateria carregada.

Relativamente ao comportamento da tensão das baterias do nó atuador, encontra-se representado na figura 5.16b), onde se pode ver pequenas variações no carregamento das baterias. Estas pequenas variações surgem devido à corrente produzida pelo gerador ser baixa.

5.5.2. Sensor de detecção de água

O sensor de detecção de água monitoriza a passagem de água na tubagem do sistema de irrigação, o que permite redundância no processo de abertura das eletroválvulas. Deste modo, quando o sistema enviar o comando para abrir a válvula, o utilizador terá uma confirmação robusta da atuação das válvulas. A figura 5.17 mostra os resultados obtidos quando é aplicada uma irrigação ao cultivo, que neste caso correspondeu ao das bananeiras.

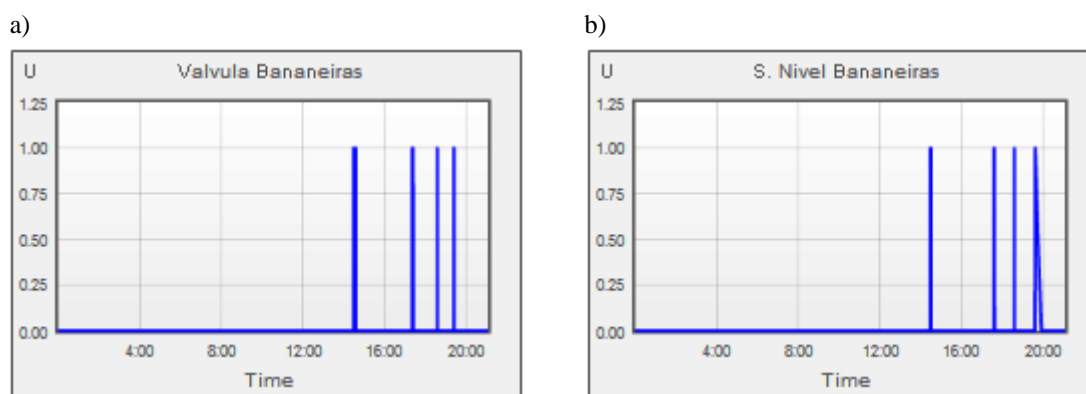


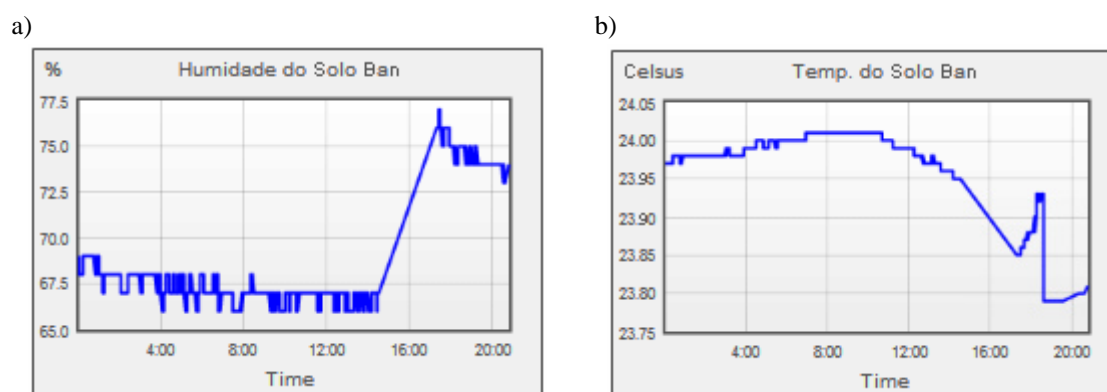
Figura 5.17 - Resultados do teste do sensor de detecção de água: a) *acknowledgement* restituído pela válvula e b) estado do sensor de detecção de água.

Pela análise gráfica da figura 5.17a) verifica-se que, quando a válvula é acionada, esta retorna o *acknowledgement* a confirmar o seu estado (aberto ou fecho). Por outro lado, a figura 5.17b) ilustra o estado do sensor de detecção de água após a passagem de água na tubagem do sistema de irrigação.

É de salientar que, quando o sensor de passagem de água é acionado, o LED do mesmo informa localmente ao utilizador que está sendo efetuado uma irrigação ao cultivo.

5.5.3. Sensores do solo

No caso de ocorrência de uma irrigação, os sensores de monitorização os parâmetros do solo confirmam a ocorrência da mesma. Assim, no teste realizado, analisou-se o comportamento dos sensores presentes no nó sensor do solo correspondente ao cultivo das bananeiras como mostra a figura 5.18.



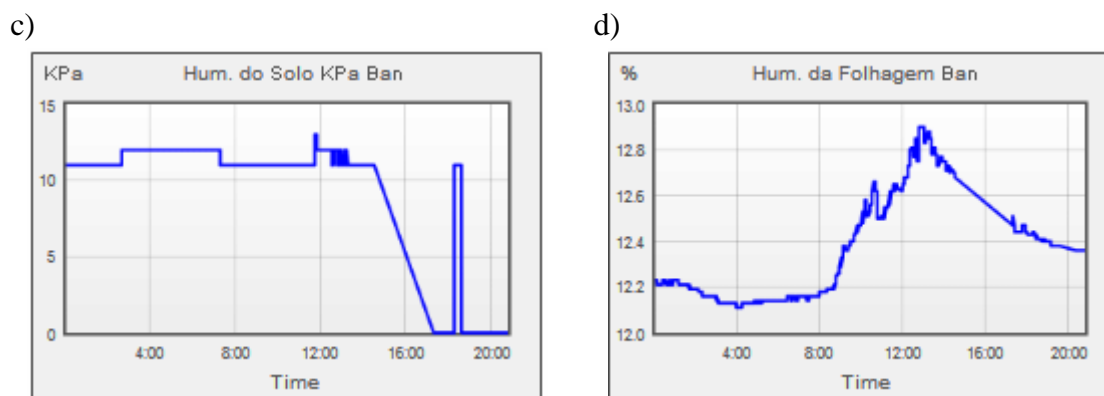


Figura 5.18 - Resultados dos sensores do solo após uma irrigação: a) sensor de humidade do solo (*ECHO-10 Dielectric Aquameter*), b) sensor do teor de água no solo (*Watermark*), c) temperatura do solo e d) humidade da folhagem.

Pela correlação dos resultados obtidos de cada sensor presente na figura 5.18 pode-se verificar que por volta da 14 horas e 30 minutos ocorreu uma irrigação ao cultivo das bananeiras, sendo que que esta irrigação pode ser conferida pelas figuras anteriores 5.16 e 5.17.

No caso de ocorrer uma irrigação, a humidade presente no solo aumentará moderadamente como ilustra a figura 5.18a). Consequentemente, no ato de uma irrigação a temperatura do solo também diminui, como se pode verificar na figura 5.18b). Relativamente ao sensor que mede o teor de água do solo (*Watermark*), o valor deste diminuirá pois segundo as suas características o valor 0 corresponde ao solo húmido.

Quanto ao sensor da humidade da folhagem, como este se encontra colocado a 40 cm acima do solo, ele não transmite informação quando é realizado uma irrigação. Porém, é de interesse estudar o comportamento deste sensor, pois ele informa a ocorrência de orvalho noturno (ou sereno).

Por último, o nó atuador do sistema encontra-se em absoluto funcionamento desde fevereiro de 2015.

5.6. Estado da rede

O protótipo desenvolvido possibilita também a monitorização do nível do sinal de rádio frequência (RSSI) para cada ligação. Neste ponto do trabalho é necessário ter em consideração da sensibilidade do XBee, que segundo a folha de características é de -96 dBm. No caso de as ligações com um valor de RSSI inferior ao valor admitido pelo XBee, a ocorrência de erros ou a perda de pacotes é muito frequente. A figura 5.19 mostra o nível do sinal de rádio frequência para cada nó do protótipo.

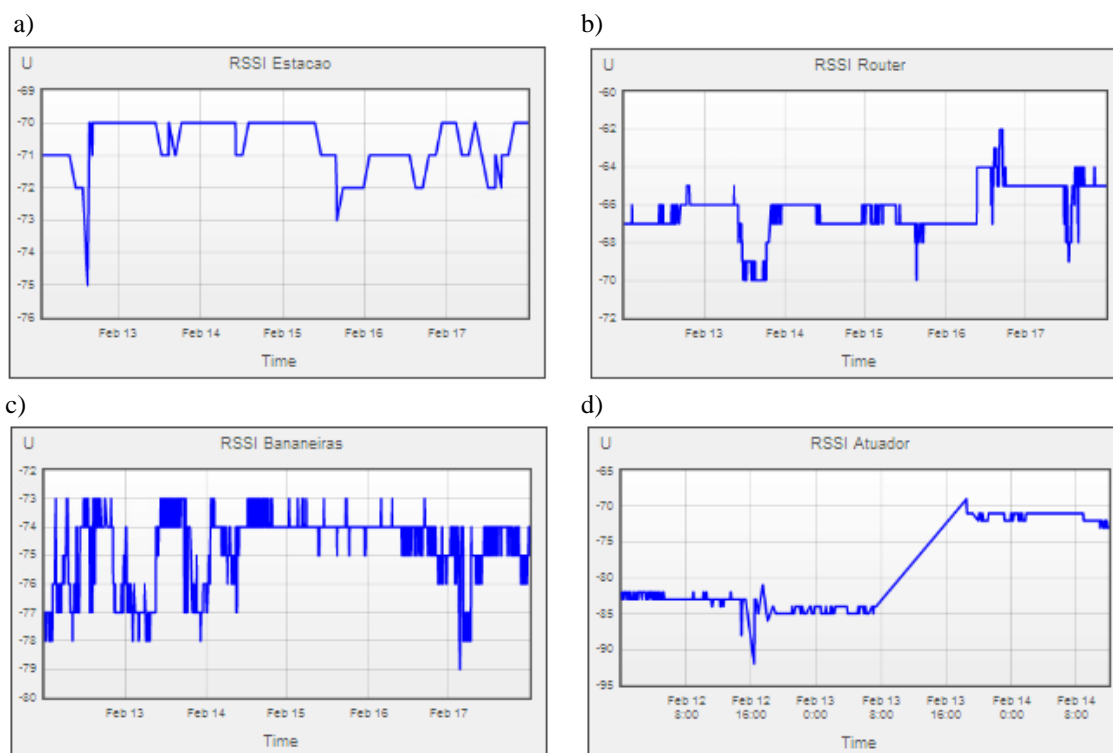


Figura 5.19 - RSSI: a) estação meteorológica, b) router, c) nó das bananeiras e d) nó atuador.

Analisando os dados da rede desenvolvida, verificou-se pela figura 5.19 que as ligações dos respetivos nós da rede na sua maior encontram-se acima do valor limite do rádio XBee, o que significa que se tratava de uma rede que assegura o correto envio de dados para o coordenador.

Porém, na ligação do nó sensor do solo dos morangueiros como o nó *router*, o RSSI do nó sensor encontra-se o pior resultado (-90 dBm) como é possível observar na figura 5.20. Por isso, colocou-se mais um nó *router* na rede de modo a permitir o reencaminhamento de dados com bom desempenho.

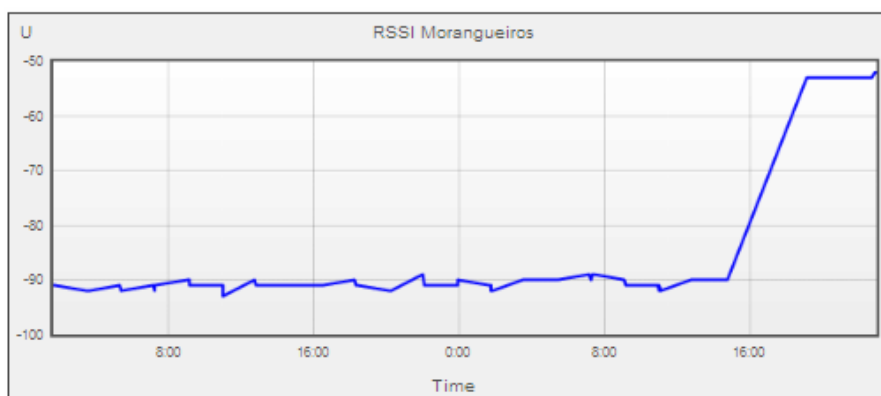


Figura 5.20 - RSSI do nó sensor dos morangueiros.

Com a adição de mais um nó *router* na rede, os níveis de RSSI do nó sensor dos morangueiros melhoraram consideravelmente, como é possível constatar na figura 5.20.

6. Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo são abordadas as conclusões ao trabalho do sistema de irrigação, desenvolvido com uma rede de sensores sem fios, e são apresentados alguns dos aspetos que podem ser melhorados e desenvolvidos.

6.1. Conclusão

Com a execução deste projeto verificou-se que, apesar de existir alguns sistemas de irrigação comerciais, estes apresentam algumas limitações na inclusão de sensores no sistema, na comunicação bidirecional e a nível energético. O presente trabalho estudou e desenvolveu soluções para resolver algumas destas limitações.

No protótipo desenvolvido, o protocolo utilizado na rede foi o *Zigbee*. Este protocolo tem em consideração as baixas taxas de transferência de dados, o baixo consumo de energia, a baixa complexidade de implementação, o baixo custo, entre outros fatores.

A técnica de adormecimento aplicada aos nós sensores terminais permite uma maior autonomia do nó em causa, visto que possibilita minimizar o consumo de energia.

Comparativamente ao modelo de carregamento ON-OFF, verificou-se que este, a médio/longo prazo, consegue dar resposta às necessidades energéticas referente aos nós sensores da estação meteorológica e do solo, mesmo nos períodos de outono e inverno.

Pela análise dos gráficos verificou-se que os valores obtidos em relação à temperatura e à humidade relativa do ar tinham o mesmo seguimento que os valores mensurados pelo IPMA. No caso da velocidade do vento os valores divergem pelo facto de as duas estações meteorológicas estarem situadas em localidades diferentes.

Nos testes realizados ao gerador hídrico verificou-se que a produção máxima deste, quando aplicado ao sistema de rega de gota a gota combinado com microaspersores, foi de 109 mW. Porém, o gerador hídrico num ambiente real tem capacidade para gerar muito mais energia, satisfazendo as necessidades energéticas de um ou mais nós sensores.

No trabalho, verificou-se o correto funcionamento dos sistemas de medição dos parâmetros do solo, quando ocorrido uma irrigação ao cultivo.

O sistema de irrigação desenvolvido permite o acionamento das eletroválvulas de forma manual ou de forma automática através do processamento dos dados obtidos. Na forma manual, o utilizador terá de atuar nos botões da aplicação *web* e esperar, aproximadamente, 40 s para o nó atuador receber o comando para abrir ou fechar a eletroválvula. Este é parametrizável, podendo ser alterado para o valor desejado em função do período de amostragem da rede.

Os resultados obtidos, em geral, vão de encontro com o esperado para cada sensor utilizado. Contudo, o período de recolha de dados para o sistema de irrigação foi muito restrigido de modo que não se verificou irregularidades no protótipo.

Em conclusão, conseguiu-se implementar uma rede de sensores sem fios que realiza as funções pretendidas, onde é possível obter os parâmetros de interesse em tempo real e visualizar numa página de Internet.

6.2. Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, pode-se adicionar ao sistema de irrigação desenvolvido um circuito de videovigilância fechado CCTV (*Closed-Circuit Television*), de modo a permitir ao utilizador visitas virtuais à exploração.

Instalar o sistema de irrigação desenvolvido num ambiente real para avaliar o acréscimo que este poderá ter a nível do desenvolvimento e crescimento do cultivo.

Explorar outro tipo de energia como, por exemplo, a energia eólica para alimentar os nós sensores e avaliar a relação produção/consumo.

Adicionar novos sensores na estação meteorológica como, por exemplo, um barómetro, pois este possibilita ao utilizador a previsão das alterações climáticas.

Por último, adicionar um sistema de alertas na aplicação *web* para que esta possa prevenir o utilizador, através de mensagens telefónicas ou por correio eletrónico, em caso de ocorrência de falha do sistema de irrigação ou de alterações climáticas.

Referências

- [1] Philippe Rekacewicz, UNEP/GRID-Arenda, “Trends and forecasts in water use, by sector”, 2005, From collection: Vital Water Graphics, [Online]. <http://www.grida.no/graphicslib/detail/trends-and-forecasts-in-water-use-by-sector_f884>. Consultado em: 15 Março 2014.
- [2] “2nd UN World Water Development Report. (World bank 2002) ” [Online]. <http://wwf.panda.org/what_we_do/footprint/agriculture/impacts/water_use/>. Consultado em: 15 março 2014.
- [3] M. H. Ali, *Practices of Irrigation & On-farm Water Management: Volume 2*. Springer, 2011.
- [4] Eugênio Ferreira Coelho, Maurício Antônio Coelho Filho e Sizernando Luiz de Oliveira., *Agricultura irrigada eficiencia de irrigacao e de uso de agua_2005*.
- [5] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes e M. Smith, *Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, Roma: FAO, 2006.
- [6] Rodrigues, M. S. e Azevedo, J. A. R., "Manual de boas práticas de Irrigação", projeto AQUASENSOR, Universidade da Madeira, Julho de 2010.
- [7] “Evapotranspiration” The Encyclopedia of Earth [Online]. <<http://www.eoearth.org/article/Evapotranspiration>>. Consultado em: 26 Março 2014.
- [8] *ÁREA DE HIDRÁULICA E IRRIGAÇÃO DA UNESP Ilha Solteira*, [Online]. <<http://irrigacao.blogspot.pt/2011/08/boletim-do-clima-10-de-agosto-de-2011.html>>. Consultado em: 26 Março 2014.
- [9] Kc Coeficiente de cultura Disponível, “Curva típica do Kc para culturas de ciclo anual”, [Online]. <<http://www.abid.org.br/kc/curva.html>>. Consultado em: 27 Março 2014.
- [10] Holger Karls e Andreas Willing, “Protocols and architectures for wireless sensor networks”, Editora: John Wiley & Sons, Ltd.
- [11] Sinem Coleri Ergen , ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary, “Chapter 2 IEEE 802.15.4WPAN”, “Chapter 3 IEEE 802.15.4 PHY” e “Chapter 4 IEEE 802.15.4 MAC” September 10, 2004
- [12] Farahani S, "ZigBee Wireless Networks and Transceivers", Editora: ELSEVIER, 2008.

- [13] Braga, T. C., "Monitorização Ambiental em Espaços Florestais com Rede de Sensores sem Fios", Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, Novembro de 2010.
- [14] Karl, H and Willig, A., "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks", John Wiley & Sons, 2005.
- [15] Rui castro, "Uma Introdução às Energias Renováveis Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica", Editor: Instituto Superior Técnico, 2010.
- [16] Oxford in association with The Open University, Milton Keynes Oxfors University Press, *Renewable Energy, Power for a sustainable future*, 2nd ed., Boyle Godfrey, Ed. United Kingdom: The Open University, 2004.
- [17] Azevedo, J.A.R. e Santos, F.E.S. "Energy harvesting from wind and water for autonomous wireless sensor nodes". Universidade da Madeira - 2012.
- [18] Azevedo, J. A.R., "Redes Inalámbricas de Sensores para la Optimización de Recursos Hídricos" (AQUASENSOR, MAC/1/C121) – Madeira, 2012
- [19] Camelie Networks "Wireless Agricultural Monitoring and Control", [Online]. <<http://camalienetworks.com>>. Consultado em: 07 Abril 2014.
- [20] eKo Pro Series User's Manual. Rev. C, May 2009. PN: 7430-0710-01, [Online]. <http://99.115.132.118/html/eKo_Pro_Series_Users_Manual.pdf>. Consultado em: 10 Abril 2014.
- [21] Ranch Systems, "Monitoring & Control Solutions For Growers" , [Online]. <<http://www.ranchsystems.com/wp/>>. Consultado em: 12 Abril 2014.
- [22] Rain Bird ClimateMinder "Monitoring and Control System" , [Online]. <<http://www.rainbird.com/ag/products/ClimateMinder/index.htm#>>. Consultado em: 16 Abril 2014.
- [23] SensorCloud "Enables Condition Based Agriculture at Shelburne Vineyard" , [Online]. <<http://www.microstrain.com/applications/environmental/sensorcloud-enables-condition-based-agriculture-shelburne-vineyard>>. Consultado em: 20 Abril 2014.
- [24] i-Farm, [Online]. <www.i-farm.pt>. Consultado em: 26 Abril 2014.
- [25] Neto, M. C. e Fernandes, L. M. "i-Farm: A exploração agrícola inteligente da sociedade da informação e do conhecimento". I Congresso Ibérico IV Congresso Espanhol de AgroEngenharia, Albacete, Espanha, 4-6. Setembro 2007.
- [26] COMPLETE, Programa Operacional Factores de Competitividade, "Apollo | Projeto da PT Inovação e da Universidade de Aveiro aposta em tecnologia do

- futuro”, [Online]. <<http://www.pofc.qren.pt/media/noticias/entity/apollo--projeto-da-pt-inovacao-e-da-universidade-de-aveiro-aposta-em-tecnologia-do-futuro>> Consultado em: 02 Maio 2014.
- [27] Jornal Online – Universidade de Aveiro, “Projeto da UA e PT leva tecnologia do futuro à agricultura”, [Online]. <<https://uaonline.ua.pt/pub/detail.asp?c=35654>> Consultado em: 02 Maio 2014.
- [28] Arduino Fio Bird ClimateMinder “Arduino”, [Online]. <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardFio>>. Consultado em: 13 Outubro 2013.
- [29] XBee/XBee-PRO OEM RF Modules. datasheet, [Online]. <<http://www.adafruit.com/datasheets/XBee%20ZB%20User%20Manual.pdf>> Consultado em: 15 Outubro 2013.
- [30] “5 dBi RP-SMA Antenna ” [Online]. <http://webshop.zolertia.com/product_info.php/products_id/44> Consultado em: 16 Outubro 2013.
- [31] ENERGIZER NH15-2500. datasheet, [Online]. <<http://data.energizer.com/PDFs/nh15-2300.pdf>>. Consultado em: 23 Outubro 2013.
- [32] Farnell, [Online]. <<http://www.farnell.com/datasheets/54658.pdf>>. Consultado em: 18 Outubro 2013.
- [33] Farnell, [Online]. <<http://www.farnell.com/datasheets/77437.pdf>>. Consultado em: 20 Outubro 2013.
- [34] Datasheet SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15)., [Online]. <http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf>. Consultado em: 23 Outubro 2013.
- [35] Davis anemometer 7911 datasheet, "For Monitor and Wizard Stations", [Online]. <http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/7911_SS.pdf>. Consultado em: 25 Outubro 2013.
- [36] Davis Vantage Pro & Vantage Pro 2 Wind Sensor, [Online]. <<http://www.lexingtonwx.com/anemometer/>>. Consultado em: 29 Outubro 2013.
- [37] 6450, Solar Radiation Sensor., [Online]: >http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/6450_SS.pdf>. Consultado em: 03 Novembro 2013.

- [38] 7852, Rain Collector 0.01" or 0.2 mm Increments [Online]. <http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/7852_SS.pdf>. Consultado em: 05 Novembro 2013.
- [39] Open source weather station development, [Online]. <<http://www.wetter-garching.de/howto.html>> Consultado em: 03 Novembro 2013.
- [40] Spectrum Technologies, Inc., Leaf Wetness Sensor Manual: [Online]: <http://www.specmeters.com/assets/1/22/3666_LWSensor.pdf>. Consultado em: 15 Maio 2014.
- [41] Spectrum Technologies, Inc., WaterScout, SM100 Soil Moisture Sensor Manual, [Online]: <<http://www.specmeters.com/weather-monitoring/sensors-and-accessories/sensors/soil-moisture-sensors/sm100/>>. Consultado em: 19 Maio 2014.
- [42] NTCASCWE3 datasheet., [Online]: <<http://www.vishay.com/docs/29065/ntcascw.pdf>>. Consultado em: 22 Maio 2014.
- [43] Watermark Soil Moisture Sensor Manual, [Online]: <<http://www.specmeters.com/assets/1/22/6450WD.pdf>>. Consultado em: 26 Maio 2014.
- [44] SMX., Electrical Interface for Watermark™ or Gypsum Block Sensors, [Online]: <<http://www.emesystems.com/pdfs/SMX.pdf>>. Consultado em: 29 Maio 2014.
- [45] Irrometer., WATERMARK DIGITAL METER, [Online]: <<http://www.irrometer.com/pdf/sensors/407%20%20Meter%20%20%20Web4.pdf>>. Consultado em: 01 Junho 2014.
- [46] Datasheet MAX9928-MAX9929F, [Online]. <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX9928-MAX9929F.pdf>>. Consultado em: 22 Novembro 2013.
- [47] J3-L55, Model., [Online]: <<http://www.jjautomation.com/documents/J3-L55-Rev7-KW.pdf>>. Consultado em: 16 Junho 2014.
- [48] Rain Bird., DV-075, [Online]: <http://www.rainbird.pt/17-6325-Fiche-prodruit.php?id_produits=19>. Consultado em: 12 Junho 2014.
- [49] California Rare Fruit Growers. Banana Fruit Facts. [Online]. <<http://www.crfg.org/pubs/ff/banana.html>>. Consultado em: 06 Julho 2014.
- [50] Jains.com, "HI-Tech banana production practices," 2003.

- [51] DICA Divulgação de informação Comércio Agroalimentar, [Online]: <<http://www.sra.pt/DICA/index.php/producao-vegetal/fruticultura/240-o-consumo-de-agua-na-cultura-da-bananeira>>. Consultado em: 08 Junho 2014.
- [52] Direcção Regional de Agricultura de Entre Douro e Minho, "Manual de boas práticas - morangueiro," 2002.
- [53] B. Black, R. Hill, and G. Cardon, "Strwberry Irrigation," Utah University, 2008.
- [54] Department of Biological and Agricultural Engineering, "Strawberry Irrigation," NC State University.
- [55] J. Atwood, "Strawberry Fertigation in the UK," 2005
- [56] PC-D-275 Task Group (D-31b), "Generic Standard on Printed Board Desing," The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, 1998.
- [57] DGGE, "RTIEBT - Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão ", Editora: CERTIEL, 2006.
- [58] Datasheet relé NEC EP2-3N1S, [Online]. <<http://www.mouser.com/ds/2/283/ep2-5730.pdf>>. Consultado em: 06 Novembro 2014.
- [59] Stephen J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals 5th Edition. McGRAW-HILL Inernational Edition, 2012.
- [60] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr. and Stephen D. Umans, Electric Machinery 6th Edition. Bookman, 2011.
- [61] J. Guerreiro Gonçalves, C. Pereira Cabrita, Maria R. Calado, L. Mesquita Nunes, and Davide B. Fonseca, "Estudo de Algumas Harmónicas em Circuitos de Rectificação para Cargas Resistivas," Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, Portugal,.
- [62] Cálculo do campo magnético gerado por um íman, [Online]. <<http://www.kjmagnetics.com/calculator.asp?calcType=block>>. Consultado em: 06 Dezembro 2014.
- [63] Teixeira, L. M. F., "Sistema Autónomo de Alimentação para Monitorização Ambiental ", Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, Novembro de 2010.

Anexo A - Circuito de carregamento do nó *router*

No circuito de carregamento do nó *router* teve-se em consideração as características do painel solar MSX-005F de 0,5 W, das baterias *Energizer* NiMH-HR6 e do rádio XBee S2. Deste modo, realizou-se o circuito de carregamento do nó *router* ilustrado na figura A1.1.

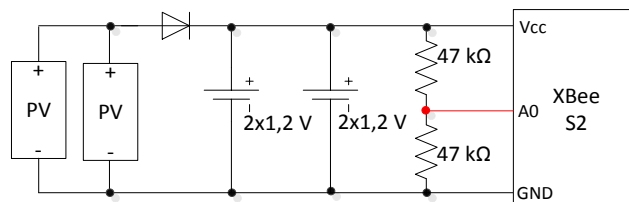


Figura A1.1 - Circuito de carregamento do nó *router*.

Observando o circuito da figura A1.1, verifica-se que a alimentação de rádio XBee é concretizada por 4 baterias de 1,2 V, sendo que duas delas então estão ligadas em série juntamente com mais duas baterias ligadas em paralelo. Esta configuração de baterias possibilita uma tensão de alimentação de 2,4 V e uma capacidade de 4600 mAh.

Como o consumo do rádio XBee é de 40 mA e considerando que as baterias não devem ser descarregas até 20% da sua carga, pela equação (4.1) o tempo de operacionalidade do nó *router* é de:

$$Duração_{nó\ router} = \frac{4600\ mAh \times 0,8}{40\ mA} = 92\ horas$$

o que corresponde, aproximadamente, a 3 dias e 20 horas.

Como o rádio XBee, tem um consumo de corrente elevado e este é alimentado por uma tensão de 2,4 V, optou-se por colocar dois painéis solares ligados em paralelo. Na configuração em paralelo, os painéis solares mantêm a tensão típica em carga (3,3 V) mas, por outro lado, aumenta a produção de corrente. No circuito da figura A.1.1, o diodo utilizado possui uma queda de tensão de 0,4 V, o que reduz para 2,9 V a tensão aplicada pelos painéis solares nas baterias, sendo este um valor adequado ao carregamento das baterias.

Por último, como a alimentação do rádio XBee pode ser efetuada numa gama de valores a oscilar entre os 2,1 e 3,6 V, em que no caso da tensão aplicada ser inferior a 2,1 V o XBee desliga-se, não descarregando as baterias abaixo dos 20% da sua carga.

Anexo B - Calibração da velocidade do vento

Anexo B1 - Calibração da velocidade do vento de 10 em 10 s.

A tabela B1.1 engloba os valores obtidos no valor da calibração da velocidade do vento a cada 10 s.

Tabela B1.1 - Resultados obtidos na calibração da velocidade do vento de 10 em 10 s.

Anemómetro EXTECH AN400	Anemómetro Consola	Osciloscópio
Velocidade (m/s)	Velocidade (m/s)	Frequência (Hz)
5,1	4,66	4,184
5,2	4,71	4,167
5,2	4,71	4,314
5,5	4,85	4,492
5,7	5,18	4,73
6,1	5,55	5,219
6,3	5,88	5,314
6,6	6,20	5,549
6,9	6,34	5,721
7,2	6,48	6,002
7,3	6,76	6,097
7,3	6,76	6,25
7,4	6,81	6,234
7,4	6,81	6,353
7,5	6,86	6,281
7,5	6,86	6,21
7,4	6,81	6,25
7,5	6,86	6,211
7,8	7,18	6,46
7,9	7,23	6,258
8,5	7,51	6,65
8,6	7,74	6,73
8,8	8,07	6,925
9,2	8,26	7,342
9,6	8,86	7,649
10	9,05	7,949
10,4	9,42	8,278
11	9,93	8,945
11,6	10,40	9,38
11,8	10,73	9,488
12	10,82	9,921
12,4	11,19	10,33
12,5	11,24	10,33
12,7	11,57	10,57
12,6	11,52	10,55

12,7	11,57	10,68
13	11,89	10,82
13,1	11,94	10,85

Com base nos valores obtidos na tabela B1.1 obteve-se a curva de calibração da velocidade do vento a cada 10 s.

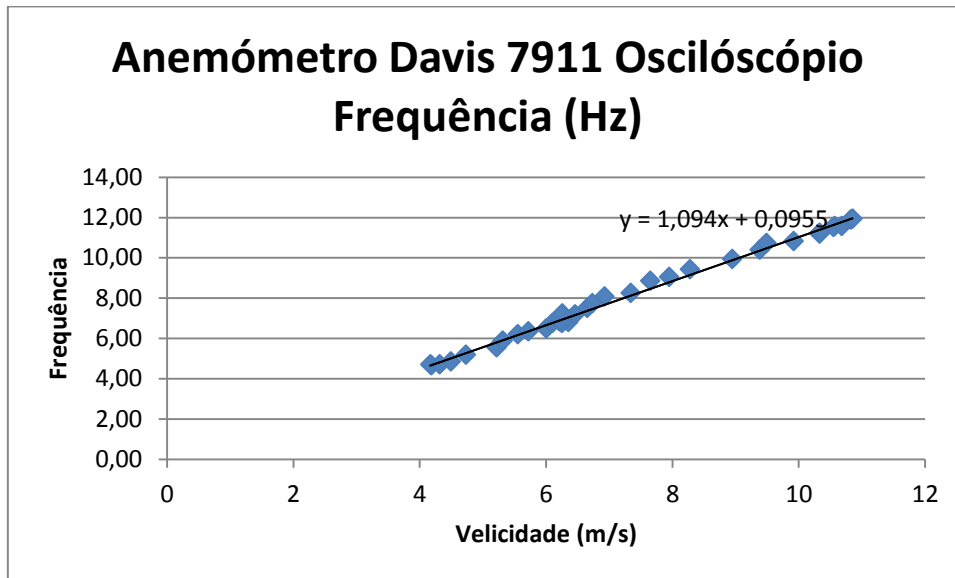


Figura B1.1 - Gráfico da calibração da velocidade do vento de 10 em 10 s.

Após o ajuste do valor de calibração para 1,094 no código do Arduino fio, mediu-se novamente os valores da velocidade do vento, sendo estes apresentados na tabela B3.1.

Anexo B2 - Código realizado no Arduino na calibração dos sensores

Anexo B2.1 - Velocidade do vento

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Criar ligação com o XBee
  pinMode(RPMsensor, INPUT);
  digitalWrite(RPMsensor, HIGH);
  interrupts();
  attachInterrupt(0, rpmCount, HIGH); // pino 2 => INT2
}

void pluvCount()
{
  if(digitalRead ( pluviometro )){
    delayMicroseconds(100);
    contagem++;
  }
}
```

Anexo B2.2 - Pluviosidade

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Criar ligação com o XBee
  pinMode(pluviometro, INPUT);
  digitalWrite(pluviometro, HIGH);
  interrupts();
  attachInterrupt(1, pluvCount, HIGH); // pino 3 => INT1
}

void pluvCount()
{
  if(digitalRead ( pluviometro )){
    delayMicroseconds(100);
    contagem++;
  }
}
```

Anexo B3 - Calibração da velocidade do vento

Tabela B3.1 - Resultados obtidos na calibração da velocidade do vento de 10 em 10 s.

EXTECH AN400	Arduino fio
Velocidade (m/s)	Velocidade (m/s)
7,9	7,90
8,2	8,21
9,2	9,32
9,7	9,72
10,6	10,64
11,3	11,24
11,9	11,89
12,2	12,16
12,8	12,76

Anexo B.4 - Calibração da direção do vento.**Tabela B4.1 - Resultados obtidos na calibração da direção do vento.**

Ângulo (°)	Tensão do impulso (V)
0	0,76
40	0,34
50	0,44
60	0,52
70	0,66
80	0,7
90	0,78
100	0,86
110	0,96
120	1,04
130	1,16
140	1,22
150	1,28
160	1,38
170	1,48
180	1,6
190	1,66
200	1,7
210	1,78
220	1,96
230	1,96
240	2,08
250	2,2
260	2,24
270	2,4
280	2,4
290	2,56
300	2,6
310	2,76
320	2,8
330	2,88
340	3,04
350	3,16

Pela tabela B4.1 verifica-se que o impulso de tensão em função do ângulo tem um comportamento linear.

Anexo C - Comparação dos valores obtidos entre o sensor de temperatura *Center 315* com o SHT11.

Neste ponto do trabalho utilizou-se uma fonte de calor externa, da qual permitia aumentar a temperatura até 100 °C.

Tabela C1.1 - Resultados obtidos na comparação do sensor de temperatura SHT11 com o Center 315.

Sensor <i>Center 315</i> (°C)	Sensor SHT11 (°C)
18,8	18,7
20,1	20,2
23,3	23,4
25,4	25,3
27,9	27,7
33,5	33,6
35,6	35,6
38,9	38,8
43,4	43,6
44,4	44,4
47,1	47,2
52,3	52,3
58,5	58,4

Na tabela C1.1 a pequena diferença de valores deve-se ao facto de a fonte de calor estar mais próxima de um dos sensores. Porém, é possível visualizar que os resultados obtidos de ambos os sensores estão muito próximos, o que leva a concluir que ambos estão devidamente calibrados.

Anexo D - Potência produzida por dois painéis ligados em série sem controlo de carga (modelo ON-OFF).

O painel solar MSF-005F, segundo o seu fabricante, produz uma potência em torno dos 0,5 W. Contudo, no projeto realizou-se um estudo com a aplicação do modelo de carregamento ON-OFF sobre a produção diário do painel solar. No estudo realizado foram utilizados dois painéis solares de 0,5 W ligados em série, onde se mediu ao longo de um dia com muito sol a tensão e a corrente produzida pelos painéis. Com base na informação recolhida ao longo de um dia desenhou-se a curva de produção teórica.

Pela análise da curva de produção teórica verificou-se que a produção dos dois painéis solares ligados em série, com o modelo de carregamento ON-OFF é de aproximadamente 0,27 W.

A figura D1.1 ilustra a produção teórica dos dois painéis solares ligados em série ao longo de um dia com muito sol.

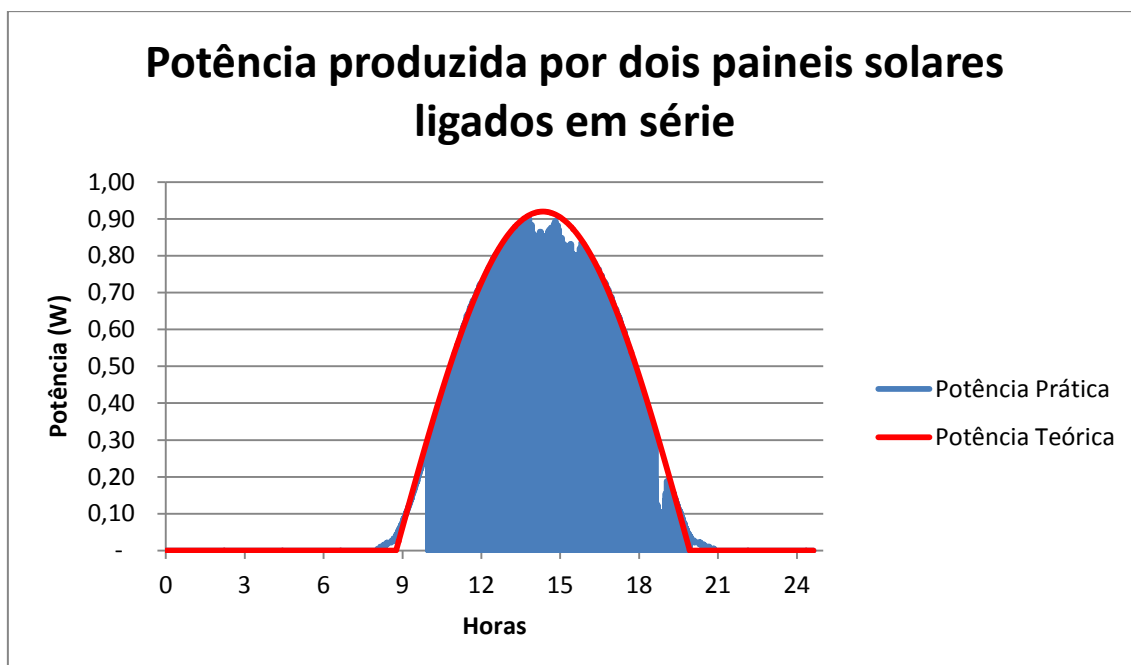
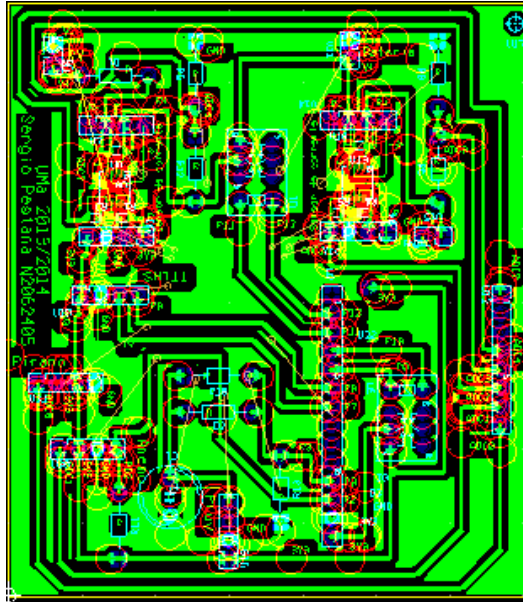


Figura D1.1 - Estudo da potência produzida por dois painéis solares ligados em série.

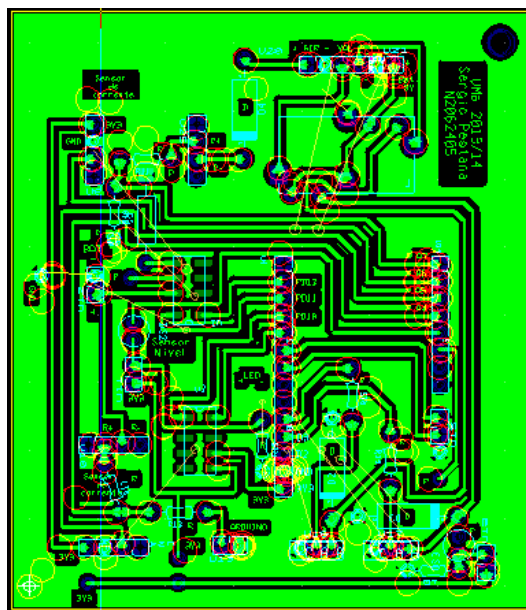
Na figura D1.1 o gráfico da potência prática, tem algumas descontinuidades nos seus valores. Esta situação acontece devido ao facto, de o sistema utilizado ser o da estação meteorológica, que no caso de as baterias estarem completamente carregadas o relé de proteção das baterias é acionado provocando assim as descontinuidades dos valores.

Anexo E - Circuitos desenhados no *Ultiboard 12* referentes à construção do sistema de irrigação.

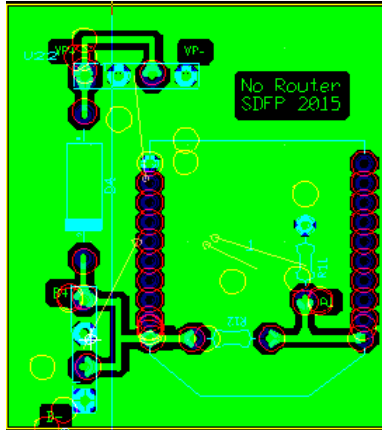
Anexo E1 - Circuitos desenhados no *Ultiboard 12* referente ao nó da estação meteorológica.



Anexo E2 - Circuitos desenhados no *Ultiboard 12* referente ao nó atuador.



Anexo E5 - Circuito desenhado no *Ultiboard 12* referente ao nó *router* utilizado no trabalho.



Anexo F - Testes do gerador hídrico como modelo de pás do tipo hélice.

O Anexo F mostra os resultados obtidos durante os vários testes realizados ao gerador hídrico, nomeadamente, a diferentes níveis do solo. Sendo os respetivos apresentados nas tabelas F1.1, F1.2, e F1.3.

Tabela F1.1 - Resultados obtidos para uma altura de 0,5 metros e um caudal de $6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Carga (Ω)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
0	14,52	-	-
10,1	0,56	57,18	32,02
21,9	1,08	50,5	54,54
32,5	1,47	48,07	70,66
46,1	1,97	47,25	93,08
54,6	2,36	43,93	103,67
67,1	2,74	44,11	120,86
80,4	3,13	40,18	125,76
99,1	3,87	38,42	148,69
119,7	4,39	39,85	174,94
148,6	5,04	35,37	178,26
218	6,45	32,54	209,88
325	7,57	25,66	194,25
469	9,14	20,57	188,01

Tabela F1.2 - Resultados obtidos para uma altura de 1 metro e um caudal de $6,84 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Carga (Ω)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
0	15,96	-	-
10,1	0,71	71,5	50,77
21,9	1,43	67,3	96,24
32,5	2,1	68,9	144,69
46,1	2,7	62,4	168,48
54,6	3,17	59,7	189,25
67,1	3,75	56,1	210,30
80,4	4,15	53,16	220,61
99,1	4,77	49,49	236,07
119,7	5,42	46,91	254,25
148,6	6,18	43,77	270,50
218	7,42	35,36	262,37
325	8,82	28,18	248,55
469	10,48	23,66	247,96

Tabela F1.3 - Resultados obtidos para uma altura de 1,5 metro e um caudal de $7,34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Carga (Ω)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
0	16,18	-	-
10,1	0,88	120,2	105,78
21,9	2,24	102,5	229,60
32,5	2,91	92,3	268,59
46,1	3,79	84,9	321,77
54,6	4,23	77,8	329,09
67,1	4,96	75,6	374,98
80,4	5,62	69,9	392,84
99,1	6,37	64,5	410,87
119,7	6,95	59,6	414,22
148,6	7,88	53,3	420,01
218	9,47	46,7	442,25
325	10,24	34,9	357,38
469	11,53	25,4	292,86

Pela análise numérica das tabelas F1.1, F1.2, e F1.3 verifica-se que o gerador desenvolvido produz uma potência máxima de 209,88 mW para uma carga de 218 Ω para um caudal de $6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. No caso do caudal de $6,84 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ a potência máxima de 270,50 mW para uma carga de 148,6 Ω . Por último, para um caudal de $7,34 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ a potência máxima é de 442,25 mW para uma carga de 218 Ω .

Anexo G - Análise financeira dos componentes do protótipo

Na concretização de um protótipo é indispensável realizar uma análise financeira ao custo de produção do produto. Assim, nas tabelas G.1, G.2 e G.3 são apresentados alguns dos componentes utilizados no protótipo, com uma breve descrição, referência e preço comercial. Os preços datam do mês de Dezembro de 2014 das empresas *Farnell*, *Inmotion*, *davisnet*, *Mouser Electronics Aquamatic* e *Hubel*. É ainda de salientar que a seleção dos componentes vai de encontro com a descrição efetuada nas folhas de características.

Tabela G1.1 - Descrição e preços dos componentes da estação meteorológicas

Qt.	Descrição	Referência	Preço/1u (€)	Obs.
1	Resistor, RESISTOR, CARBON , 10K, 1W, 5% Carbon, 10K, 1W, 5%	TE Connectivity CFR100J10K	0,101	Farnell
1	Resistor, Carbon film, 470 ohm, 1W, 5%	Multicomp mccfr01sj0471a10	0,036	Farnell
4	Resistor, Carbon, 47K, 1W, 5%	TE Connectivity CFR100J47K	0,0905	Farnell
1	Resistor, Carbon, 1MO, 1W, 5%	TE Connectivity CFR100J1M0	0,057	Farnell
2	Diode, schottky, 1A, 20V	Vishay Formerly I.R. Vs-1n5817	0,207	Farnell
1	Battery, Nimh 2450mAh AA Pk. 4	Energizer 625997	13,79	Farnell
2	Relay, SMD, Dpdt, 3Vdc, Latching	Omron Electronic Components G6-JU-2FS-Y 3dc	2,53	Farnell
1	Antenna, 2.4 GHz, 1/4 Dipole, RPSMA	Pulse engineering w100	3,74	Farnell
2	Solar Panel, 0.5w	BP solar MSX-005f	30,82	Farnell
1	ZigBee Module, XBee ZB, RPSMA conn	Digi international XB24-Z7SIT-004	20,71	Farnell
1	Sensor, Humidity & Temp. 3.3V	Sensirion SHT11	24,50	Farnell
1	Arduino fio – Xbee ready	Model INM-0028	24,60	Inmotion
1	Capacitor, 100nF, 50V	Panasonic Eca1hhg0r1CAP, ALU ELEC, RAD	0,21	Farnell
2	Socket, Vertical, 1row, 10way	Harwin M22-7131042	1,045	Farnell
1	Holder, Battery, 4xAA, Snap Term	Pro Power – Bh343-1B	4,53	Farnell
2	Current Cense Amp. 0.1~28V, 8UMAX	Maxim Integrated MAX9929FFAUA	3,02	Farnell
1	Anemometers (7911)	Davis Instruments	115,21	<i>davisnet</i>
1	Solar Radiation Sensor (6450)	Davis Instruments	154,50	<i>davisnet</i>
1	Rain Collector (7857)	Davis Instruments	75,04	<i>davisnet</i>
TOTAL			512,84 euros	

Pela tabela G1.1 pode-se verificar que o custo do nó sensor referente à estação meteorológica é de aproximadamente 513 euros.

Tabela G1.2 - Descrição e preços dos componentes do nó atuador.

Qt.	Descrição	Referência	Preço/1u (€)	Obs.
2	Resistor, Carbon, 100K, 1W, 5%	TE Connectivity CFR100J100K	0,059	Farnell
4	Resistor, Carbon film, 1K ohm, 1W, 5%	Multicomp MCF 1W 1K	0,056	Farnell
4	Resistor, Carbon, 47K, 1W, 5%	TE Connectivity CFR100J47K	0,09	Farnell
2	Resistor, Carbon, 100 ohm, 2W, 5%	Multicomp MCCFR02SJ01A19	0,054	Farnell
1	Resistor, Carbon, 100MO, 1W, 5%			Farnell
5	Diode, schottky, 1A, 20V	Vishay Formerly I.R. Vs-1n5817	0,207	Farnell
1	Battery, Nimh 2300mAh AA Pk. 4	Energizer 635730	13,58	Farnell
2	Relay, SMD, Dpdt, 3Vdc, Latching	Omron Electronic Components G6-JU-2FS-Y 3dc	2,53	Farnell
1	Antenna, 2.4 GHz, 1/4 Dipole, RPSMA	Pulse engineering w100	3,74	Farnell
1	ZigBee Module, XBee ZB, RPSMA conn	Digi international XB24-Z7SIT-004	20,71	Farnell
1	Arduino fio – Xbee ready	Model INM-0028	24,60	Inmotion
4	transistor			Farnell
2	Socket, Vertical, 1row, 10way	Harwin M22-7131042	1,045	Farnell
1	Holder, Battery, 4xAA, Snap Term	Pro Power – Bh343-1B	4,53	
1	Header, Straight, 2x3way	TE Connectivity / Amp 826942-3	0,67	Farnell
1	Connector Battery, PP3 Type 145mm, PK10	Multicomp 440006P		Farnell
2	Eletroválvula	Rainbird DV075 – 3/4" c/ solenoide 9V	39,06	aquamatic
2	Fairchild Semicondutor BS270 Mosfet	BS270 Mosfet, NCH, 60V, 400mA, TO-92	0,187	Farnell
2	Current Cense Amp. 0.1~28V, 8UMAX	Maxim Integrated MAX9929FFAUA	3,02	Farnell
2	Relay NEC	NEC-Tokin 551-EP2-3N1S	3,27	Mouser
2	LED, 3mm, green, 1.6MCD, 585NM	Avago Technologies HLMP-1640	0,536	Farnell
TOTAL			Euros 168.543	

Na tabela G1.2 pode-se verificar que o custo do nó atuador é de aproximadamente 169 euros.

Tabela G1.3 - Descrição e preços dos componentes do nó sensor do solo.

Qt.	Descrição	Referência	Preço/1u (€)	Obs.
1	Resistor, Carbon, 150K, 1W, 5%	TE Connectivity CFR100J150K	0,0998	Farnell
2	Resistor, Carbon film, 1K ohm, 1W, 5%	Multicomp MCF 1W 1K	0,111	Farnell
4	Resistor, Carbon, 47K, 1W, 5%	TE Connectivity CFR100J47K	0,09	Farnell
1	Resistor, Carbon, 100 ohm, 1W, 5%	Multicomp MCCFR01FR01A10	0,039	Farnell
1	Resistor, Carbon, 56K, 1W, 5%	TE Connectivity CFR100J56K	0,0685	Farnell
4	Diode, schottky, 1A, 20V	Vishay Formerly I.R. Vs-1n5817	0,207	Farnell
1	Battery, Nimh 2300mAh AA Pk. 4	Energizer 635730	13,58	Farnell
2	Solar Panel, 0.5w	BP solar MSX-005f	30,82	Farnell
2	Relay, SMD, Dpdt, 3Vdc, Latching	Omron Electronic Components G6-JU-2FS-Y 3dc	2,53	Farnell
1	Antenna, 2.4 GHz, 1/4 Dipole, RPSMA	Pulse engineering w100	3,74	Farnell
1	ZigBee Module, XBee ZB, RPSMA conn	Digi international XB24-Z7SIT-004	20,71	Farnell
1	Arduino fio – Xbee ready	Model INM-0028	24,60	Inmotion
4	Socket, 2.5mm Jack, Stereo	Pro Signal PSG01539	0,816	Farnell
2	Socket, Vertical, 1row, 10way	Harwin M22-7131042	1,045	Farnell
1	Holder, Battery, 4xAA, Snap Term	Pro Power – Bh343-1B	4,53	
1	Header, Straight, 2x3way	TE Connectivity / Amp 826942-3	0,67	Farnell
3	CAP, FILM, PET, 4.7UF, 100V, RAD	Vishay BC Components BFC246804475	2,27	Farnell
1	IC, TIMER CMOS, DIP8, 555	Texas Instruments LMC555CN	0,624	Farnell
2	Current Cense Amp. 0.1~28V, 8UMAX	Maxim Integrated MAX9929FFAUA	3,02	Farnell
1	Sensor Watermark 200	200SS-5	35,00	Hubel
1	Sensor WaterScout modelo SM100	6460	110	Hubel
1	Sensor de Humidade foliar	3666	139	Hubel
TOTAL			444,43 euros	

Pela tabela G1.3 pode-se verificar que o custo de um nó sensor do solo é de aproximadamente 444,43 euros. No entanto, como são utilizados dois nós sensores do solo no sistema, o custo final é de 888.86 euros.

Tabela G1.4 - Descrição e preços dos componentes do nó router.

Qt.	Descrição	Referência	Preço/1u (€)	Obs.
1	Resistor, Carbon, 100K, 1W, 5%	TE Connectivity CFR100J100K	0,0593	Farnell
1	Resistor, Carbon film, 33K ohm, 1W, 5%	TE Connectivity CFR100J33K	0,0998	Farnell
1	Diode, schottky, 1A, 20V	Vishay Formerly I.R. Vs-1n5817	0,207	Farnell
2	Socket, Vertical, 1row, 10way	Harwin M22-7131042	1,045	Farnell
1	Battery, Nimh 2300mAh AA Pk. 4	Energizer 635730	13,58	Farnell
1	Antenna, 2.4 GHz, 1/4 Dipole, RPSMA	Pulse engineering w100	3,74	Farnell
1	ZigBee Module, XBee ZB, RPSMA conn	Digi international XB24-Z7SIT-004	20,71	Farnell
2	Holder, Battery, 2xAA, Snap Term	Pro Power – Bh322-1B	3,79	
2	Solar Panel, 0.5w	BP solar MSX-005f	30,82	Farnell
TOTAL			109,706 euros	

Pela tabela G1.4 pode-se verificar que o custo de um nó router é de aproximadamente 109,70 euros.

Em análise, o custo de implementação de todo o sistema a nível de material é de 1720,79 euros. Todavia, a este valor ainda falta acrescentar outros custos adicionais, nomeadamente, o custo de produção do gerador hídrico, as caixas com a norma IP65, a fita de velcro, o tubo de PVC, o filtro, junta tórica, silicone, estrutura de metal (suporte

da estação), estrutura de madeira (suporte do atuador e do nó sensor do solo), mão-de-obra, placa PCB e a instalação.

Anexo H - Código implementado no Arduino Fio

O Anexo H contém a globalidade do código implementado no Arduino fio referente ao sistema de irrigação.

Anexo H1 - Código implementado no nó sensor da estação meteorológica

```

/*
 *Universidade da Madeira 2014/2015
 *Projeto de Mestrado: Sistema de Gestão de Rega com uma Rede de Sensores sem Fios
 *Autor: Sérgio Pestana
 *código: Estação Meteorológica
 */

#include <avr/sleep.h>
#include <SHT1x.h>

/* Timer2 reload value, globally available */
unsigned int tcnt2;

/* Toggle HIGH or LOW digital write */
int seconds = 10; // Período em segundos
int start = seconds*30;
int counter = 0;
int i=0;

// Inicializar a mensagem
byte trama[] = {

0x7E,0x00,0x54,0x10,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xFF,0xFE,0x00,0x00,'?', 'T', '=',
0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 'H', '=',0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 'D', '=',0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 'R' //40

, '=',0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 'K', '=',0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 'X', '=',0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 'Y', '=',0x00,
0x00,0x00,0x00 //66

, '&', 'Z', '=',0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 'P', '=',0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 'V', '=',0x00,0x00,0x00,0x00,0x00}; //
88

int valorSensor = 0;

byte checksum = 0;

int xbeeSleep = 4;

//Definir as portas DATA e Clock e ainda estanciar o object SHT1x
#define dataPin 7
#define clockPin 8
SHT1x sensor (dataPin, clockPin);

// SHT11
int temp_c;

```

```
int humidity;

//Direção do vento
int Angulo; // Angulo do vento
volatile int Valor = 0;

//Índice Radiação Solar
int fotodiodo; // the analog reading from the sensor divider

//Velocidade do Vento
volatile int velcount = 0; // RPM tops counter in interrupt routine
volatile int ContactTime = 15; // Timer to avoid conatct bounce in interrupt routine
int RPM = 0; // RPM count
#define RPMsensor 2 //The pin location of the anemometer sensor

//Pluviometro
int pluviometro = 3;
volatile int contagem = 0;
unsigned long Tempo = 0;

//Relé controlo de bateria
int tensao;
int corrente;
int PIN12 = 12;
int PIN11 = 11;
int PIN10 = 10;
int PIN9 = 9;
volatile unsigned long relefechado;
volatile unsigned long relefechado1;

// Potência de consumo
int C_sensores;
int T_sensores;

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Criar ligação com o XBee
  pinMode(PIN12, OUTPUT);
  pinMode(PIN11, OUTPUT);
  pinMode(PIN10, OUTPUT);
  pinMode(PIN9, OUTPUT);
  pinMode(pluviometro, INPUT);
  digitalWrite(pluviometro, HIGH);
  pinMode(RPMsensor, INPUT);
  digitalWrite(RPMsensor, HIGH);

  interrupts();
  attachInterrupt(1, pluvCount, HIGH); // pino 3 => INT1
  attachInterrupt(0, rpmCount, HIGH); // pino 2 => INT2

  pinMode(13, OUTPUT); // LED as output
  pinMode(xbeeSleep, OUTPUT);
  digitalWrite(xbeeSleep, LOW);
```

```

/* First disable the timer overflow interrupt while we're configuring */
TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);

/* Configure timer2 in normal mode (pure counting, no PWM etc.) */
TCCR2A &= ~((1<<WGM21) | (1<<WGM20));
TCCR2B &= ~(1<<WGM22);

/* Select clock source: internal I/O clock */
ASSR &= ~(1<<AS2);

/* Disable Compare Match A interrupt enable (only want overflow) */
TIMSK2 &= ~(1<<OCIE2A);

/* Now configure the prescaler to CPU clock divided by 1024 */
TCCR2B |= (1<<CS22) | (1<<CS21) | (1<<CS20); // Set bits
//TCCR2B &= ~(1<<CS21); // Clear bit

/* We need to calculate a proper value to load the timer counter.
 * The following loads the value 131 into the Timer 2 counter register
 * The math behind this is:
 * (CPU frequency) / (prescaler value) = 125000 Hz = 8us.
 * (desired period) / 8us = 125.
 * MAX(uint8) + 1 - 125 = 131;
 */
/* Save value globally for later reload in ISR */
tcnt2 = 0;

/* Finally load and enable the timer */
TCNT2 = tcnt2;
TIMSK2 |= (1<<TOIE2);

set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_SAVE);
sleep_enable();
}

/*
 * Install the Interrupt Service Routine (ISR) for Timer2 overflow.
 * This is normally done by writing the address of the ISR in the
 * interrupt vector table but conveniently done by using ISR() */
ISR(TIMER2_OVF_vect) {
  /* Reload the timer */
  TCNT2 = tcnt2;
  /* Write to a digital pin so that we can confirm our timer */
  //digitalWrite(2, toggle == 0 ? HIGH : LOW);
  //toggle = ~toggle;
  counter++;
}

void pluvCount()
{
  if(digitalRead ( pluviometro )){
    delayMicroseconds(100);

```

```
    contagem++;
  }
}

void rpmCount()
{
  if(digitalRead ( RPMsensor )){
    delayMicroseconds(100);
    velcount++;
  }
  delay(15); // para ler até 150km/h
}

void readAndSend(){
  char acBuf[4 + 1]; // adiciona 1 para terminação NULL e 1 para o sinal negativo
  // Ler valores do sensor multiplicados por 1000, para precisão de 4 casas decimais
  // Temperatura; // Amostra o valor da temperatura
  temp_c = 10*sensor.readTemperatureC(); // Temperatura em graus Celcius
  sprintf( acBuf, "%4d", temp_c ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
  trama[20] = acBuf[0];
  trama[21] = acBuf[1];
  trama[22] = acBuf[2];
  trama[23] = acBuf[3];

  // Humidade; // Amostra o valor da humidade
  humidity = 10*sensor.readHumidity(); // Humidade em percentagem
  sprintf( acBuf, "%4d", humidity ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
  trama[27] = acBuf[0];
  trama[28] = acBuf[1];
  trama[29] = acBuf[2];
  trama[30] = acBuf[3];

  // Direção do vento
  Valor = analogRead(1);
  Angulo = map(Valor, 0, 1023, 0, 359);
  sprintf( acBuf, "%4d", Angulo ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
  trama[34] = acBuf[0];
  trama[35] = acBuf[1];
  trama[36] = acBuf[2];
  trama[37] = acBuf[3];

  // Radiação solar (Piranómetro)
  fotodiodo = analogRead(0);
  fotodiodo = map(fotodiodo, 0, 1023, 0, 1800);
  sprintf( acBuf, "%4d", fotodiodo ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
  trama[41] = acBuf[0];
  trama[42] = acBuf[1];
  trama[43] = acBuf[2];
  trama[44] = acBuf[3];

  // Potencia produzida pelos painéis solares
  tensao = analogRead(4); // Amostra o ADC 3
  tensao = map(tensao, 0, 1023, 0, 3300);
  tensao = tensao*2;
```

```
corrente = analogRead(7); // Amostra o ADC 7
corrente= map(corrente, 0, 1023, 0, 611);

// Envio dos dados pela rede XBee
//Amostra o valor da corrente no painel
sprintf( acBuf, "%4d", corrente ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[48] = acBuf[0];
trama[49] = acBuf[1];
trama[50] = acBuf[2];
trama[51] = acBuf[3];

//Amostra o valor da tensão no painel
sprintf( acBuf, "%4d", tensao ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[55] = acBuf[0];
trama[56] = acBuf[1];
trama[57] = acBuf[2];
trama[58] = acBuf[3];

//Consumo de corrente nas baterias
T_sensores = analogRead(3); // Amostra o ADC 3
T_sensores = map(T_sensores, 0, 1023, 0, 3300);
T_sensores = T_sensores*2; // tensão nas baterias em miliVolts
C_sensores = analogRead(2); // Amostra o ADC 2
C_sensores = map(C_sensores, 0, 1023, 0, 611);

if(T_sensores < 4750){ //tensão da bateria inferior a 4,75V
  if (relefechado ==1 ){
    Abre_rele();
  }
  relefechado = 0;
}

else if(T_sensores > 4850){ //tensão da bateria inferior a 4,75V
  if (relefechado == 0){
    Fecha_rele();
  }
  relefechado = 1;
}

if(T_sensores > 5600){ //tensão da bateria superior a 5,6V
  if (relefechado1 ==1 ){
    Abre_rele1();
  }
  relefechado1 = 0;
}

else if(T_sensores < 5500){ //tensão da bateria superior a 5,5V
  if (relefechado1 == 0){
    Fecha_rele1();
  }
  relefechado1 = 1;
}

//Amostra o valor da corrente nas baterias
```

```
printf( acBuf, "%4d", C_sensores); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[62] = acBuf[0];
trama[63] = acBuf[1];
trama[64] = acBuf[2];
trama[65] = acBuf[3];

//Amostra o valor de tensão nas baterias
printf( acBuf, "%4d", T_sensores ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[69] = acBuf[0];
trama[70] = acBuf[1];
trama[71] = acBuf[2];
trama[72] = acBuf[3];

//Pluviometro
printf( acBuf, "%4d", contagem ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[76] = acBuf[0];
trama[77] = acBuf[1];
trama[78] = acBuf[2];
trama[79] = acBuf[3];
contagem = 0;

// Anemómetro
// Início da medição das RPM (velocidade do vento)
RPM = velcount * 10.94;

printf( acBuf, "%4d", RPM ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[83] = acBuf[0];
trama[84] = acBuf[1];
trama[85] = acBuf[2];
trama[86] = acBuf[3];
velcount = 0;

// Wake up XBee
digitalWrite(xbeeSleep, LOW); // Liga xbee
delay(20); // Espera que acorde

// Cálculo do checksum
checksum = 0;

for ( i = 3; i < sizeof(trama)-1; i++) {
  checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}
trama[sizeof(trama)-1] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento para 2
Serial.write(trama, sizeof(trama)); // Envia a trama pela porta série
delay(100);
// Sleep XBee
digitalWrite(xbeeSleep, HIGH);
}

/* Main loop. Empty, but needed to avoid linker errors */
void loop() {
  if(counter == start){
    TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);
    // executa tarefa
```

```
    readAndSend();
    counter = 0;
    TCNT2 = tcnt2;
    TIMSK2 |= (1<<TOIE2);
}
// Sleep
sleep_enable();
sleep_mode();
sleep_disable();
}

// Rotina de interrupção para abrir o relé
void Abre_rele(){
    digitalWrite(PIN9, HIGH);
    digitalWrite(PIN10, LOW);
    delay(15);
    digitalWrite(PIN9, LOW);
}

void Abre_rele1(){
    digitalWrite(PIN12, HIGH);
    digitalWrite(PIN11, LOW);
    delay(15);
    digitalWrite(PIN12, LOW);
}

// Rotina de interrupção para fechar o relé
void Fecha_rele(){
    digitalWrite(PIN9, LOW);
    digitalWrite(PIN10, HIGH);
    delay(15);
    digitalWrite(PIN10, LOW);
}

void Fecha_rele1(){
    digitalWrite(PIN12, LOW);
    digitalWrite(PIN11, HIGH);
    delay(15);
    digitalWrite(PIN11, LOW);
}
```

Anexo H2 - Código implementado no nó atuador

```

/*
 *Universidade da Madeira 2014/2015
 *Projeto de Mestrado: Sistema de Gestão de Rega com uma Rede de Sensores sem Fios
 *Autor: Sérgio Pestana
 *código: Nó atuador
 */
#include <avr/sleep.h>
int incomingByte=0; // to catch the incoming bytes
int valor;
int valor1;
int gerador;
int Bateria;
int corrente;
int correntegerador;
int PIN12 = 12;
int PIN11 = 11;
int PIN10 = 10;
int PIN9 = 9;
volatile unsigned long relefechado;
volatile unsigned long relefechado1;
int rega;
int regal;

int PacketArray[20] = {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1}; // to store the validated xbee packet

/* Timer2 reload value, globally available */
unsigned int tcnt2;

/* Toggle HIGH or LOW digital write */
int seconds = 10; // Período em segundos
int start = seconds*30;
int counter = 0;
int i=0;

// Inicializar a mensagem
byte trama[] = {
0x7E,0x00,0x4E,0x10,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xFF,0xFE,0x00,0x00,//16
'?', 'T', 'G', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, '&', 'C', 'G', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, //32
'?', 'T', 'B', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, '&', 'C', 'B', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, //48
'&', 'L', 'B', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, '&', 'L', 'M', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, //64
'&', 'V', '1', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, '&', 'V', '2', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, //81

byte checksum = 0;
int valorSensor = 0;
int xbeeSleep = 2;

void setup() {
  delay (10);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(12, OUTPUT); // define o pin digital 4 como saída
  pinMode(11, OUTPUT); // define o pin digital 5 como saída

```

```

pinMode(10, OUTPUT); // define o pin digital 6 como saída
pinMode(9, OUTPUT); // define o pin digital 7 como saída
pinMode(8, OUTPUT); // define o pin digital 4 como saída
pinMode(7, OUTPUT); // define o pin digital 5 como saída
pinMode(4, OUTPUT); // define o pin digital 6 como saída
pinMode(3, OUTPUT); // define o pin digital 7 como saída
pinMode(xbeeSleep, OUTPUT);
digitalWrite(xbeeSleep, LOW);

/* First disable the timer overflow interrupt while we're configuring */
TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);

/* Configure timer2 in normal mode (pure counting, no PWM etc.) */
TCCR2A &= ~(1<<WGM21) | (1<<WGM20);
TCCR2B &= ~(1<<WGM22);

/* Select clock source: internal I/O clock */
ASSR &= ~(1<<AS2);

/* Disable Compare Match A interrupt enable (only want overflow) */
TIMSK2 &= ~(1<<OCIE2A);

/* Now configure the prescaler to CPU clock divided by 1024 */
TCCR2B |= (1<<CS22) | (1<<CS21) | (1<<CS20); // Set bits
//TCCR2B &= ~(1<<CS21); // Clear bit

/* We need to calculate a proper value to load the timer counter.
 * The following loads the value 131 into the Timer 2 counter register
 * The math behind this is:
 * (CPU frequency) / (prescaler value) = 125000 Hz = 8us.
 * (desired period) / 8us = 125.
 * MAX(uint8) + 1 - 125 = 131;
 */
/* Save value globally for later reload in ISR */
tcnt2 = 0;

/* Finally load and enable the timer */
TCNT2 = tcnt2;
TIMSK2 |= (1<<TOIE2);

set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_SAVE);
sleep_enable();
}

/*
 * Install the Interrupt Service Routine (ISR) for Timer2 overflow.
 * This is normally done by writing the address of the ISR in the
 * interrupt vector table but conveniently done by using ISR() */
ISR(TIMER2_OVF_vect) {
  /* Reload the timer */
  TCNT2 = tcnt2;
  /* Write to a digital pin so that we can confirm our timer */
  //digitalWrite(2, toggle == 0 ? HIGH : LOW);
  //toggle = ~toggle;

```

```
counter++;
}

void readAndSend(){
char acBuf[4 + 1]; // adiciona 1 para terminação NULL e 1 para o sinal negativo
// Ler valores do sensor multiplicados por 1000, para precisão de 4 casas decimais

// Controlo da Vávula
if (Serial.available()>19) { //checks to make sure that we have received at least one frame worth
of bytes
incomingByte=Serial.read();
if(incomingByte == 0x7E){ // se o byte que chega ao recetor foi 7E, escreve-o como primeiro
da trama
PacketArray[0]=0x7E;
for(int i=1; i<20; i=i++) { //le toda a trama recebida
PacketArray[i] = Serial.read();
}
}

else{
int junk = Serial.read();
}

//Função de abertua da valvula das bananeiras
if(PacketArray[18] == 0xFF){
PacketArray[18] == 0x02;
Abre_rele();
rega = 1;
}

//Função de abertua da valvula das morangueiros
if(PacketArray[18] == 0xEE){
PacketArray[18] == 0x02;
Abre_rele1();
rega1 = 1;
}

//Função de fecho da valvula das bananeiras
if(PacketArray[18] == 0x00) {
PacketArray[18] == 0x02;
Fecha_rele();
rega = 0;
}

//Função de fecho da valvula dos morangueiros
if(PacketArray[18] == 0x11) {
PacketArray[18] == 0x02;
Fecha_rele1();
rega1 = 0;
}
}

// produção do gerador hidrónico Tensão
gerador = analogRead (7);
```

```
gerador = map(gerador,0,1023,0,3300);
gerador = gerador*2;
sprintf( acBuf, "%4d", gerador ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[21] = acBuf[0];
trama[22] = acBuf[1];
trama[23] = acBuf[2];
trama[24] = acBuf[3];

// produção do gerador hidr ico Corrente
correnteGerador = analogRead (6);
correnteGerador = map(correnteGerador,0,1023,0,611);
sprintf( acBuf, "%4d", correnteGerador ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[29] = acBuf[0];
trama[30] = acBuf[1];
trama[31] = acBuf[2];
trama[32] = acBuf[3];

// Bateria de alimenta o do circuito
Bateria = analogRead (4);
Bateria = map(Bateria,0,1023,0,3300);
Bateria = Bateria*2;

if(Bateria > 5600){ //tens o da bateria superior a 5,6V
    if (relefechado1 == 1 ){
        Abre_releb1();
    }
    relefechado1 = 0;
}

if(Bateria < 5400){ //tens o da bateria superior a 5,5V
    if (relefechado1 == 0){
        Fecha_releb1();
    }
    relefechado1 = 1;
}

if(Bateria < 4750){ //tens o da bateria inferior a 4,75V
    if (relefechado == 1 ){
        Abre_releb();
    }
    relefechado = 0;
}

else if (relefechado == 0){
    Fecha_releb();
    relefechado = 1;
}

sprintf( acBuf, "%4d", Bateria ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[37] = acBuf[0];
trama[38] = acBuf[1];
trama[39] = acBuf[2];
trama[40] = acBuf[3];

// produ o do gerador hidr ico Corrente
```

```
corrente = analogRead (5);
corrente = map(corrente,0,1023,0,611);
sprintf( acBuf, "%4d", corrente ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[45] = acBuf[0];
trama[46] = acBuf[1];
trama[47] = acBuf[2];
trama[48] = acBuf[3];

// Sensor de nivel de água das bananeiras
valor = analogRead(3);
if (valor > 1){
    valor = 0001;
}
else{
    pinMode(PIN5, LOW);
    valor = 0000;
}

sprintf( acBuf, "%4d", valor ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[53] = acBuf[0];
trama[54] = acBuf[1];
trama[55] = acBuf[2];
trama[56] = acBuf[3];

// Sensor de nivel de água dos morangueiros
valor1 = analogRead(1);
if (valor1 > 1){
    valor1 = 0002;
}
else{
    pinMode(PIN6, LOW);
    valor1 = 0000;
}

sprintf( acBuf, "%4d", valor1 ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[61] = acBuf[0];
trama[62] = acBuf[1];
trama[63] = acBuf[2];
trama[64] = acBuf[3];

//controlo da Válvula
sprintf( acBuf, "%4d", rega ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[69] = acBuf[0];
trama[70] = acBuf[1];
trama[71] = acBuf[2];
trama[72] = acBuf[3];

//controlo da Válvula
sprintf( acBuf, "%4d", rega1 ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[77] = acBuf[0];
trama[78] = acBuf[1];
trama[79] = acBuf[2];
trama[80] = acBuf[3];
```

```
// Wake up XBee
digitalWrite(xbeeSleep, LOW); // Liga xbee
delay(20); // Espera que acorde

//// Calculo do checksum
checksum = 0;
for (int i = 3; i < sizeof(trama)-1; i++) {
  checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}
trama[81] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento a 2
Serial.write(trama, sizeof(trama)); // Envia a trama pela porta serie
delay(100);
// Sleep XBee
digitalWrite(xbeeSleep, HIGH);
}

/* Main loop. Empty, but needed to avoid linker errors */
void loop() {
  if(counter == start){
    TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);

    // executa tarefa
    readAndSend();
    counter = 0;
    TCNT2 = tcnt2;
    TIMSK2 |= (1<<TOIE2);
  }
  // Sleep
  sleep_enable();
  sleep_mode();
  sleep_disable();
}

// Rotina de interrupção para abrir o relé da Válvula das bananeiras
void Abre_rele1(){
  digitalWrite(7,HIGH);
  delay (15);
  digitalWrite(7,LOW);
}

// Rotina de interrupção para abrir o relé da Válvula dos morangueiros
void Abre_rele(){
  digitalWrite(3,HIGH);
  delay (15);
  digitalWrite(3,LOW);
}

// Rotina de interrupção para fechar o relé da Válvula das bananeiras
void Fecha_rele1(){
  digitalWrite(8,HIGH);
  delay (15);
  digitalWrite(8,LOW);
}
```

```
// Rotina de interrupção para fechar o relé da Válvula dos morangueiros
void Fecha_rele(){
  digitalWrite(4,HIGH);
  delay (15);
  digitalWrite(4,LOW);
}

// Rotina de interrupção para abrir o relé das baterias
void Abre_releb(){
  digitalWrite(PIN10, HIGH);
  digitalWrite(PIN9, LOW);
  delay(15);
  digitalWrite(PIN10, LOW);
}

void Abre_releb1(){
  digitalWrite(PIN11, HIGH);
  digitalWrite(PIN12, LOW);
  delay(15);
  digitalWrite(PIN11, LOW);
}

// Rotina de interrupção para fechar o relé
void Fecha_releb(){
  digitalWrite(PIN10, LOW);
  digitalWrite(PIN9, HIGH);
  delay(15);
  digitalWrite(PIN9, LOW);
}

void Fecha_releb1(){
  digitalWrite(PIN11, LOW);
  digitalWrite(PIN12, HIGH);
  delay(15);
  digitalWrite(PIN12, LOW);
}
```

```

/* Setup phase: configure and enable timer2 overflow interrupt */
void setup() {
  delay(10);
  pinMode(PIN12, OUTPUT);
  pinMode(PIN11, OUTPUT);
  pinMode(PIN10, OUTPUT);
  pinMode(PIN9, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(xbeeSleep, OUTPUT);
  digitalWrite(xbeeSleep, LOW);

  /* First disable the timer overflow interrupt while we're configuring */
  TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);

  /* Configure timer2 in normal mode (pure counting, no PWM etc.) */
  TCCR2A &= ~(1<<WGM21) | (1<<WGM20);
  TCCR2B &= ~(1<<WGM22);

  /* Select clock source: internal I/O clock */
  ASSR &= ~(1<<AS2);

  /* Disable Compare Match A interrupt enable (only want overflow) */
  TIMSK2 &= ~(1<<OCIE2A);

  /* Now configure the prescaler to CPU clock divided by 1024 */
  TCCR2B |= (1<<CS22) | (1<<CS21) | (1<<CS20); // Set bits
  //TCCR2B &= ~(1<<CS21); // Clear bit

  /* We need to calculate a proper value to load the timer counter.
  * The following loads the value 131 into the Timer 2 counter register
  * The math behind this is:
  * (CPU frequency) / (prescaler value) = 125000 Hz = 8us.
  * (desired period) / 8us = 125.
  * MAX(uint8) + 1 - 125 = 131;
  */
  /* Save value globally for later reload in ISR */
  tcnt2 = 0;

  /* Finally load and enable the timer */
  TCNT2 = tcnt2;
  TIMSK2 |= (1<<TOIE2);

  set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_SAVE);
  sleep_enable();
}

/*
* Install the Interrupt Service Routine (ISR) for Timer2 overflow.
* This is normally done by writing the address of the ISR in the
* interrupt vector table but conveniently done by using ISR() */
ISR(TIMER2_OVF_vect) {
  /* Reload the timer */
  TCNT2 = tcnt2;

```

```

/* Write to a digital pin so that we can confirm our timer */
//digitalWrite(2, toggle == 0 ? HIGH : LOW);
//toggle = ~toggle;
counter++;
}

void readAndSend(){
char acBuf[4 + 1]; // adiciona 1 para terminação NULL e 1 para o sinal negativo
// Ler valores do sensor multiplicados por 1000, para precisão de 4 casas decimais

//Sensor de Humidade do Solo
humidadeSensor = analogRead(A2); // Amostra o ADC 0
humidadeSensor = map (humidadeSensor, 0, 1023, 0, 3300);
humidadeSolo = 10.00/99.00*humidadeSensor-3300.00/99.00+25;
sprintf( acBuf, "%4d", humidadeSolo ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[21] = acBuf[0];
trama[22] = acBuf[1];
trama[23] = acBuf[2];
trama[24] = acBuf[3];

//Sensor Wavmark
valorSensor = analogRead(A4); // Amostra o ADC 1
if (valorSensor < 87.00) { // parte inteira de 0,28/3,3*1023
    resistencia=28075.00;
}
else {
    if (valorSensor > 87.00 && valorSensor < 94.00) {
        resistencia=3.00*pow(10.00,8.00)*exp(-33.90*valorSensor*3.300/1023);
    }
    else {
        if (valorSensor >94.00 && valorSensor <166.00) {
            resistencia=39.33*pow(valorSensor*3.300/1023,-4.60);
        }
        else {
            if (valorSensor > 166.00 && valorSensor < 215.00) {
                resistencia=10644.00*pow(valorSensor*3.300/1023,2.00)-
                17196.00*valorSensor*3.300/1023+7130.00;
            }
            else{
                if (valorSensor > 215.00 && valorSensor < 262.00) {
                    resistencia = -1622.00*log(valorSensor*3.300/1023)-
                    275.00;
                }
                else {
                    resistencia = 0.00;
                }
            };
        };
    };
};
if (resistencia < 550.00) {
    solo=0;
}
else {

```

```

if (resistencia > 550.00 && resistencia < 1000.00) {
    solo=0.02*resistencia-11.00;
}
else {
    if (resistencia > 1000.00 && resistencia < 20000.00) {
        solo=7.00*pow(10.00,-
            8.00)*pow(resistencia,2.00)+0.005*resistencia+4.187;
    }
    else {
        solo=200.00;
    }
};
};
sprintf( acBuf, "%4d", solo ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[29] = acBuf[0];
trama[30] = acBuf[1];
trama[31] = acBuf[2];
trama[32] = acBuf[3];

//Sensor de temperatura do Solo (thermister)
valorSensor = 0;
// http://learn.adafruit.com/thermistor/using-a-thermistor
uint8_t i;
float average;
// take 5 samples in a row, with a slight delay
for (i=0; i< 5; i++) {
    samples[i] = analogRead(A0);
    delay(10);
}
// average all the samples out
average = 0;
for (i=0; i< 5; i++) {
    average += samples[i];
}
average /= 5;
// Serial.print("Average analog reading ");
// Serial.println(average);
// convert the value to resistance
average = 1023 / average - 1;
average = 27000 / average;
// Serial.print("Thermistor resistance ");
// Serial.println(average);
float steinhart;
steinhart = average / 10000; // (R/Ro)
steinhart = log(steinhart); // ln(R/Ro)
steinhart /= 3977; // 1/B * ln(R/Ro)
steinhart += 1.0 / (25 + 273.15); // + (1/To)
steinhart = 1.0 / steinhart; // Invert
temperaturaSensor = steinhart*10;
sprintf( acBuf, "%4d", temperaturaSensor ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[37] = acBuf[0];
trama[38] = acBuf[1];
trama[39] = acBuf[2];
trama[40] = acBuf[3];

```

```
//Sensor de Humidade da folha
folhaSensor = analogRead(A1); // Amostra o ADC 3
folhaSensor = map(folhaSensor, 0, 1023, 0, 3300); // na aplicação é necessário dividir por 1000
para obter o valor correto
if (folhaSensor < 140) {
    humidadeFolha=15000;
}
else {
    if (folhaSensor >2710) {
        humidadeFolha=0;
    }
    else {
        humidadeFolha=15200-5.2*folhaSensor;
    }
};
sprintf( acBuf, "%4d", humidadeFolha ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[45] = acBuf[0];
trama[46] = acBuf[1];
trama[47] = acBuf[2];
trama[48] = acBuf[3];

// Bateria de alimentação do nó sensor
Bateria = analogRead (7);
Bateria = map(Bateria,0,1023,0,3300);
Bateria = Bateria*2;

if(Bateria > 5600){ //tensão da bateria superior a 5,6V
    if (relefechado1 ==1 ){
        Abre_rele1();
    }
    relefechado1 = 0;
}

if(Bateria < 5400){ //tensão da bateria superior a 5,5V
    if (relefechado1 == 0){
        Fecha_rele1();
    }
    relefechado1 = 1;
}

if(Bateria < 4750){ //tensão da bateria inferior a 4,75V
    if (relefechado ==1 ){
        Abre_rele();
    }
    relefechado = 0;
}

else if (relefechado == 0){
    Fecha_rele();
    relefechado = 1;
}
```

```
printf( acBuf, "%4d", Bateria ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[53] = acBuf[0];
trama[54] = acBuf[1];
trama[55] = acBuf[2];
trama[56] = acBuf[3];

// Consumo do nó sensor
correntesensor = analogRead (6);
correntesensor = map(correntesensor,0,1023,0,611);
printf( acBuf, "%4d", correntesensor ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[61] = acBuf[0];
trama[62] = acBuf[1];
trama[63] = acBuf[2];
trama[64] = acBuf[3];

// Tensão de produção do painel
painel = analogRead (3);
painel = map(painel,0,1023,0,3300);
painel = painel*2;
printf( acBuf, "%4d", painel ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[69] = acBuf[0];
trama[70] = acBuf[1];
trama[71] = acBuf[2];
trama[72] = acBuf[3];

// Corrente de produção do painel
correntepainel = analogRead (5);
correntepainel = map(correntepainel,0,1023,0,611);
printf( acBuf, "%4d", correntepainel ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[77] = acBuf[0];
trama[78] = acBuf[1];
trama[79] = acBuf[2];
trama[80] = acBuf[3];

// Wake up XBee
digitalWrite(xbeeSleep, LOW); // Liga xbee
delay(20); // Espera que acorde

//// Calculo do checksum
checksum = 0;
for (int i = 3; i < sizeof(trama)-1; i++) {
  checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}
trama[81] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento a 2
Serial.write(trama, sizeof(trama)); // Envia a trama pela porta serie
delay(100);
// Sleep XBee
digitalWrite(xbeeSleep, HIGH);
}

/* Main loop. Empty, but needed to avoid linker errors */
void loop() {
  if(counter == start){
```

```
TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);

// executa tarefa
readAndSend();
counter = 0;
TCNT2 = tcnt2;
TIMSK2 |= (1<<TOIE2);
}
// Sleep
sleep_enable();
sleep_mode();
sleep_disable();
}

// Rotina de interrupção para abrir o relé
void Abre_rele(){
    digitalWrite(PIN9, HIGH);
    digitalWrite(PIN10, LOW);
    delay(15);
    digitalWrite(PIN9, LOW);
}

void Abre_rele1(){
    digitalWrite(PIN12, HIGH);
    digitalWrite(PIN11, LOW);
    delay(15);
    digitalWrite(PIN12, LOW);
}

// Rotina de interrupção para fechar o relé
void Fecha_rele(){
    digitalWrite(PIN9, LOW);
    digitalWrite(PIN10, HIGH);
    delay(15);
    digitalWrite(PIN10, LOW);
}

void Fecha_rele1(){
    digitalWrite(PIN12, LOW);
    digitalWrite(PIN11, HIGH);
    delay(15);
    digitalWrite(PIN11, LOW);
}
```