



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Luís Miguel Marinho Novais

Monitorização de Variáveis  
em Culturas Agrícolas

Luís Miguel Marinho Novais · Monitorização de Variáveis em Culturas Agrícolas

UMinho | 2015

outubro de 2015





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Luís Miguel Marinho Novais

Monitorização de Variáveis  
em Culturas Agrícolas

Dissertação de Mestrado  
Engenharia Electrónica Industrial e Computadores

Trabalho efectuado sob a orientação do  
Professor Doutor Paulo José Guimarães Garrido

## DECLARAÇÃO

Luís Miguel Marinho Novais

Endereço eletrónico: luismarinhonovais@gmail.com      Telefone: 934146341

Número do Bilhete de Identidade: 13541048

Título da Tese:

### **Monitorização de Variáveis em Culturas Agrícolas**

Orientador:

Doutor Paulo José Guimarães Garrido

Ano de conclusão: 2015

Tese submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS  
PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO  
INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

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

# Agradecimentos

A realização do trabalho aqui apresentado não teria sido possível sem o apoio e a contribuição de algumas pessoas.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais Manuel Novais Teixeira e Teresa Teixeira Marinho e irmãos Ricardo Novais e Pedro Novais, pelo apoio incondicional que me foram dando ao longo deste percurso académico.

Ao professor Paulo Garrido que ao longo deste ano me acompanhou de perto, incentivou e acreditou no desenvolvimento deste projeto.

Um especial agradecimento a Tomé Silva e João Sousa membros da empresa detus. Para além de financiarem o projeto, auxiliaram no desenvolvimento do mesmo para que após a entrega da dissertação este possa ser continuado.

Um cumprimento especial para o pessoal das oficinas Sr. Carlos, Sr. Joel e D.<sup>a</sup> Ângela, que não só neste projeto mas também ao longo do meu percurso académico estiveram sempre presentes e dispostos para ajudar.

Por fim um grande abraço a todos os colegas e amigos que tive oportunidade de conhecer ao longo deste percurso escolar.

A todos, um muito obrigado!



# Resumo

O incremento da procura de produtos alimentares leva as produções agrícolas a aumentarem a sua dimensão, para conseguirem satisfazer as necessidades da população. De há uns anos a esta parte, o setor alimentar tem-se transformado radicalmente, tornando-se altamente tecnológico. A aposta em tecnologia fez com que houvesse maior produtividade e qualidade de produto, a um preço substancialmente mais baixo. Ainda assim, existe um importante potencial de melhoria face a fatores prejudiciais para as culturas, tais como pragas, défices de nutrientes, níveis desadequados de humidade e clima. Atualmente, existem duas grandes técnicas de cultivo, sendo elas a tradicional e a hidropónica. Esta última, pelo facto de se realizar em ambientes controlados (estufas), tem como principais vantagens a redução significativa de pragas, bem como de problemas climáticos.

Esta dissertação descreve o desenvolvimento de um sistema de monitorização de variáveis para fins agrícolas. O sistema desenvolvido pode ser usado para monitorizar o solo (culturas em solo), ou soluções nutritivas (culturas hidropónicas). O sistema é composto por uma *Wireless Sensor Network* (WSN) com nós sensores e um nó central. O nó sensor é dotado de três sensores: temperatura, humidade e condutividade. Estes dados, devidamente lidos e processados, são enviados sem fios para o nó central. O nó central deverá estar ligado a um computador onde uma aplicação gráfica estará em execução. Esta aplicação será responsável por processar, guardar e mostrar a informação dos nós ligados em rede. Cada nó sensor pode ser visualizado quanto ao seu estado (ativo, inativo). Podem também ser identificados erros relacionados com os sensores e, por último, pode obter-se uma análise gráfica da evolução de cada uma das variáveis (temperatura, humidade e condutividade).

Pretende-se dar continuidade ao desenvolvimento deste protótipo para o tornar num produto comercializado a breve prazo.

**Palavras-Chave:** Setor Alimentar, Sistema de Monitorização, Culturas Agrícolas.





# Abstract

The increase in demand for food products derives agricultural production to increase their size, in order to satisfy the needs of the population. Since a few years ago, the food industry has changed radically, becoming high-tech. The use of technology in agriculture leads to enhanced productivity and product quality, at a substantially lower price. Yet, there is a significant potential for improvement in what regards harmful factors to crops, such as pests, nutrient deficiencies, inadequate levels of humidity and weather. Currently, there are two major farming techniques: the traditional and hydroponics. The last one, being used in controlled environments (greenhouses), has some advantages such as the significant reduction of pests or weather effects.

This dissertation describes the development of a monitoring system of variables for agricultural purposes. The system developed can be used to monitor the soil (soil cultures), or nutrient solutions (hydroponic cultures). The system uses a Wireless Sensor Network (WSN), composed by sensor nodes and by a coordinator node. The sensor node is composed by three sensors: temperature, humidity and conductivity. These data, properly read and processed, are sent wirelessly to the coordinator node. The coordinator node should be connected to a computer where a graphical application will be running. This application will be responsible for processing, storing and display the information of the nodes connected in a network. The status of each sensor node can be consulted. Errors related with sensors can be identified and a graphical analysis of the evolution of each of the variables (temperature, humidity and conductivity) is possible.

The development of the prototype is expected to continue into a marketed product in the near future.

**Keywords:** Monitoring System, Sensor Node, Coordinator Node.



# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xv</b>
<b>Lista de Siglas e Acrónimos</b> .....	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO 1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Motivações.....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Contribuições.....	3
1.5. Organização da Dissertação .....	3
<b>CAPÍTULO 2 Estado da Arte</b> .....	<b>5</b>
2.1. Evolução da Agricultura e suas Técnicas.....	5
2.1.1. Agricultura em Solo .....	5
2.1.2. Agricultura Hidropónica.....	6
2.1.3. Vantagens e Desvantagens das Culturas Hidropónicas face às Culturas em Solo .....	7
2.2. Elementos Preponderantes no Desenvolvimento de Culturas .....	7
2.2.1. Macronutrientes.....	8
2.2.2. Micronutrientes .....	9
2.2.3. Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	10
2.2.4. Condutividade .....	11
2.2.5. Concentração de Iões de Hidrogénio (pH).....	11
2.2.6. Temperatura.....	11
2.2.7. Água .....	11
2.2.8. Humidade .....	12
2.2.9. Oxigénio .....	12
2.2.10. Osmose.....	12
2.2.11. Iluminação.....	12
2.3. Como Ajustar Soluções Nutritivas Hidropónicas .....	12
2.4. Vantagens da Monitorização de Dados em Culturas Agrícolas .....	13
2.5. Sensores Utilizados em Culturas Agrícolas .....	15
2.5.1. Sensor de Temperatura .....	16
2.5.2. Sensor de Radiação Solar .....	18
2.5.3. Sensor de Humidade Relativa.....	18
2.5.4. Sensor de Medição do Vento (Anemómetro) .....	19
2.5.5. Sensor de Precipitação.....	20
2.5.6. Sensor de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ).....	20
2.5.7. Sensor de Humidade.....	21
2.5.8. Sensor Tensiométrico .....	22
2.5.9. Sensor de Condutividade Elétrica.....	22
2.5.10. Sensor de Concentração de Iões de Hidrogénio (pH) .....	23
2.5.11. Sensor de Transpiração das Folhas .....	24
2.5.12. Sensor Dendrómetro .....	24
2.6. História das Redes de Sensores Sem Fios .....	25
2.6.1. Período da Guerra Fria .....	25
2.6.2. Projetos Avançados de Defesa.....	25
2.6.3. Desenvolvimento de Projetos Militares .....	26
2.6.4. Desenvolvimento Atual .....	26
2.7. Introdução às Redes de Sensores Sem Fios .....	27
2.8. Arquitetura das Redes de Sensores Sem Fios .....	28
2.8.1. Hardware WSN .....	28
2.8.2. Software WSN.....	30
2.9. Normas IEEE para Redes Sem Fios .....	32
2.10. Evolução das Plataformas WSN .....	33
2.11. Aplicações de Redes Sem Fios na Agricultura .....	34
2.11.1. Greenhouse Environment Monitoring System.....	35
2.11.2. The Inov@Douro Model .....	35
2.11.3. Greenhouse Micro Climate Monitoring Based On WSN with Smart Irrigation Technique.....	36

2.11.4.	<i>Wireless Sensor Network-Based Greenhouse Environment Monitoring and Automatic Control System for Dew Condensation Prevention</i> .....	37
2.12.	Conclusão.....	38
<b>CAPÍTULO 3 Especificações do Sistema.....</b>		<b>39</b>
3.1.	Requisitos do Sistema .....	40
3.2.	Seleção da Tecnologia da Rede Sem Fios .....	41
3.3.	ZigBee.....	42
3.3.1.	Características ZigBee .....	42
3.3.2.	Relação da Tecnologia ZigBee com a Norma IEEE 802.15.4.....	43
3.3.3.	Camada Física (Physical Layer).....	44
3.3.4.	Camada de Acesso ao Meio ( <i>MAC layer</i> ).....	46
3.3.5.	Camada de Rede ( <i>NWK layer</i> ) .....	49
3.3.6.	Camada Aplicacional ( <i>APL layer</i> ) .....	50
3.3.7.	Segurança.....	50
3.4.	Seleção da Plataforma ZigBee .....	51
3.5.	Seleção dos Sensores.....	54
3.5.1.	Sensor de Temperatura .....	54
3.5.2.	Sensor de Condutividade .....	56
3.5.3.	Sensor de Humidade .....	57
3.6.	Seleção da Bateria .....	58
3.7.	Seleção do Encapsulamento dos Nós .....	58
3.8.	Conclusão.....	59
<b>CAPÍTULO 4 Implementação .....</b>		<b>61</b>
4.1.	Hardware .....	61
4.1.1.	Plataforma Sem Fios Atmel ATZB-256RFR2-XPRO .....	61
4.1.2.	Sensor de Temperatura DS18B20 .....	65
4.1.3.	Sensor 5TE.....	65
4.1.4.	Conversor USB para comunicação série .....	66
4.1.5.	Nó Sensor.....	66
4.1.6.	Placa Elevadora de Tensão .....	68
4.1.7.	Nó Central.....	70
4.1.8.	Encapsulamento do Nó Sensor.....	71
4.1.9.	Encapsulamento do Nó Central.....	72
4.2.	<i>Firmware</i> .....	72
4.2.1.	Ambiente de Desenvolvimento e Placa Programadora .....	72
4.2.2.	<i>Lightweight Mesh</i> .....	73
4.2.3.	Aplicação WSN .....	74
4.2.4.	Aplicação WSN Nó Sensor.....	77
4.2.5.	Aplicação WSN Nó Central .....	81
4.3.	Software .....	83
4.3.1.	Interface Gráfica .....	84
4.4.	Conclusão.....	89
<b>CAPÍTULO 5 Testes e Resultados.....</b>		<b>91</b>
5.1.	Testes Desenvolvidos.....	91
5.1.1.	Placa Elevadora de Tensão .....	91
5.1.2.	Leituras de Condutividade Elétrica .....	92
5.1.3.	Comunicação Série do Nó Sensor.....	93
5.1.4.	Comunicação de Dados Sem Fios.....	93
5.1.5.	Erro de Desconexão da Comunicação Série (Interface Gráfica) .....	94
5.1.6.	Receção de Dados e Ficheiro de Dados (Interface Gráfica).....	94
5.1.7.	Distância Máxima de Comunicação.....	95
5.1.8.	Medição de Consumo Elétrico .....	96
5.1.9.	Autonomia do Nó Sensor.....	97
5.1.10.	Integração do Sistema .....	99
5.2.	Conclusão.....	100
<b>CAPÍTULO 6 Conclusões e Trabalho Futuro .....</b>		<b>101</b>
6.1.	Conclusões .....	101
6.2.	Trabalho Futuro.....	102
<b>Referências.....</b>		<b>103</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - HydroBuddy software [6].....	13
Figura 2.2 – Princípio de funcionamento do sensor de temperatura semiconductor .....	17
Figura 2.3 - Princípio de funcionamento do termopar .....	17
Figura 2.4 – Sensor de temperatura (a) RTD; (b) Termopar; (c) Termístor; (d) Semiconductor.....	17
Figura 2.5 - Sensor de radiação solar (a) Sensor piranómetro; (b) Sensor pireliómetro .....	18
Figura 2.6 - Sensor de humidade relativa (a) Sensor resistivo; (b) Sensor capacitivo .....	19
Figura 2.7 - Sensor de medição do vento (a) Sensor mecânico “copos”; (b) Sensor fio quente; (c) Sensor de ultrassons.....	20
Figura 2.8 - Sensor de precipitação (a) Sensor mecânico; (b) Sensor de feixes de luz .....	20
Figura 2.9 – Sensor de dióxido de carbono (a) Sensor eletroquímico; (b) Sensor infravermelho não-dispersivo.....	21
Figura 2.10 - Sensor de humidade (a) Sensor resistivo; (b) Sensor capacitivo .....	22
Figura 2.11 - Sensor tensiométrico .....	22
Figura 2.12 - Sensor de condutividade elétrica (a) Sensor de contato; (b) Sensor eletromagnético.....	23
Figura 2.13 - Sensor de pH .....	24
Figura 2.14 - Sensor de transpiração das folhas (a) Sensor resistivo; (b) Sensor capacitivo .....	24
Figura 2.15 - Sensor dendrómetro (a) Sensor mecânico; (b) Sensor ótico.....	25
Figura 2.16 - Hardware nó sensor.....	29
Figura 2.17 - Software nó sensor .....	31
Figura 2.18 - Comparativo das normas IEEE .....	32
Figura 2.19 - Plataformas WSN (a) Telos; (b) Mica2; (c) Iris; (d) SunSPOT .....	33
Figura 2.20 - Arquitetura da rede GEMS [30] .....	35
Figura 2.21 - Arquitetura da rede Inov@Douro [31].....	36
Figura 2.22 - Arquitetura de rede <i>Dew Condensation Prevention</i> [11] .....	38
Figura 3.1 - Arquitetura do protótipo industrial.....	39
Figura 3.2 - Arquitetura ZigBee [35].....	44
Figura 3.3 - Topologias de rede (a) Estrela; (b) Malha; (c) Árvore .....	48
Figura 3.4 – Plataforma Atmel ATZB-256RFR2-XPRO.....	54
Figura 3.5 - Sensor de temperatura DS18B20 .....	56
Figura 3.6 - Sensor 5TE.....	57
Figura 3.7 - Sensor de humidade VH400.....	58
Figura 3.8 - Bateria Saft 14500.....	58
Figura 3.9 - Encapsulamento dos nós (a) Caixa nó sensor; (b) Caixa nó central .....	59
Figura 4.1 - Plataforma e módulo da Atmel (a) ATZB-S1-256-3-0-C; (b) ATZB-256RFR2-XPRO.....	61
Figura 4.2 ATmega256RFR2 Arquitetura [38].....	62
Figura 4.3 - Plataforma Atmel ATZB-256RFR2-XPRO .....	63
Figura 4.4 - Sensor de temperatura DS18B20 (a) <i>Chip pinout</i> ; (b) Encapsulamento .....	65

Figura 4.5 - Sensor 5TE (a) Descrição; (b) <i>Pinout</i> 5TE.....	66
Figura 4.6 - FTDI232.....	66
Figura 4.7 - Diagrama do nó sensor.....	67
Figura 4.8 - Comunicação 5TE.....	67
Figura 4.9 - Esquemático do LM2623.....	68
Figura 4.10 - Esquemático do circuito que permite ligar e desligar o sensor 5TE.....	69
Figura 4.11 - Esquemático da conversão de tensão dos dados do sensor 5TE.....	69
Figura 4.12 - Placa elevadora de tensão (a) Placa <i>top view</i> ; (b) Placa <i>bottom view</i> .....	70
Figura 4.13 - Diagrama do nó central.....	70
Figura 4.14 - Comunicação série entre o FTDI232 e a plataforma sem fios.....	71
Figura 4.15 - Nó sensor (a) Encapsulamento; (b) Ambiente real de operação.....	71
Figura 4.16 - Nó central (a) Encapsulamento; (b) Cabo USB.....	72
Figura 4.17 - Interface Computacional e Placa Programadora (a) Atmel Studio; (b) AVR Dragon.....	73
Figura 4.18 - Arquitetura do <i>firmware</i> Lightweight Mesh.....	73
Figura 4.19 - Função <i>main</i> .....	74
Figura 4.20 - Função <i>APP_TaskHandler</i> .....	75
Figura 4.21 - Código envio de dados sem fios.....	76
Figura 4.22 - Código receção de dados sem fios.....	76
Figura 4.23 - Código de envio de dados da comunicação série.....	77
Figura 4.24 - Código de receção de dados da comunicação série.....	77
Figura 4.25 <i>APP_STATE_INITIAL</i> nó sensor.....	78
Figura 4.26 <i>APP_STATE_SEND</i> nó sensor.....	78
Figura 4.27 Receção de dados do sensor 5TE.....	80
Figura 4.28 - <i>Sleep Mode</i> .....	80
Figura 4.29 - <i>APP_STATE_WAKEUP</i> nó sensor.....	81
Figura 4.30 - <i>APP_STATE_INITIAL</i> nó central.....	81
Figura 4.31 - <i>APP_STATE_SEND</i> nó central.....	82
Figura 4.32 - Comandos DS18B20.....	82
Figura 4.33 - Funções 1Wire.....	83
Figura 4.34 - Função <i>ds18b20_gettemp()</i> .....	83
Figura 4.35 - Qt Creator.....	84
Figura 4.36 - Interface gráfica, visão global.....	85
Figura 4.37 - Interface gráfica, configuração da comunicação série.....	85
Figura 4.38 - Método de receção de dados da comunicação série.....	86
Figura 4.39 - Método <i>data_process()</i> .....	86
Figura 4.40 - Processamento dos dados relativos ao nó sensor.....	87
Figura 4.41 - Métodos classe <i>cnodes</i> .....	87
Figura 4.42 - Método <i>Refresh_Graph()</i> e <i>Draw_Temperature()</i> .....	88
Figura 4.43 - Gráfico de temperatura da classe <i>cbigplot</i> .....	89
Figura 5.1 - Dados 5TE, tensão máxima.....	92
Figura 5.2 - Gráfico Condutividade Elétrica.....	92

Figura 5.3 - Comunicação série entre o sensor 5TE e plataforma sem fios (a) Dados sensor 5TE; (b) Dados plataforma sem fios .....	93
Figura 5.4 - Comunicação sem fios entre nó sensor e nó central (a) Dados do nó sensor; (b) Dados do nó central .....	94
Figura 5.5 - Mensagem de erro de desconexão da comunicação série.....	94
Figura 5.6 - Dados recebidos .....	95
Figura 5.7 - Ficheiro de dados .....	95
Figura 5.8 – Gráfico da distância máxima de comunicação .....	96
Figura 5.9 - Consumo da placa elevadora de tensão com o sensor 5TE .....	97
Figura 5.10 - Consumo elétrico do nó sensor .....	98
Figura 5.11 - Evolução da temperatura, teste de integração do sistema.....	99
Figura 5.12 Evolução da humidade, teste de integração do sistema .....	99
Figura 5.13 - Evolução da condutividade, teste de integração do sistema .....	100
Figura 5.14 - Interface gráfica, teste de integração do sistema .....	100





## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características do nitrogénio .....	8
Tabela 2.2 - Características do fósforo .....	8
Tabela 2.3 - Características do potássio.....	8
Tabela 2.4 - Características do enxofre.....	9
Tabela 2.5 - Características do magnésio.....	9
Tabela 2.6 - Características do cálcio .....	9
Tabela 2.7 - Características do boro .....	9
Tabela 2.8 - Características do cobre.....	9
Tabela 2.9 - Características do cobalto .....	10
Tabela 2.10 - Características do ferro .....	10
Tabela 2.11 - Características do manganês .....	10
Tabela 2.12 – Características do <i>molibdénio</i> .....	10
Tabela 2.13 - Características do zinco .....	10
Tabela 2.14 - Materiais usados nos sensores resistivos .....	16
Tabela 2.15 - Evolução dos nós sensores.....	27
Tabela 2.16 - Características Nós Sensores .....	34
Tabela 3.1 - Comparativo das tecnologias sem fios ZigBee, Bluetooth e WiFi .....	41
Tabela 3.2 - Comparativo de bandas de frequência ZigBee .....	45
Tabela 3.3 - Tipos de dispositivos ZigBee.....	47
Tabela 3.4 - Plataformas ZigBee <i>transceiver</i> .....	52
Tabela 3.5 - Plataformas ZigBee solução integrada.....	53
Tabela 3.6 - Comparativo de sensores de temperatura.....	55
Tabela 3.7 - Estudo de sensores de temperatura .....	55
Tabela 3.8 - Estudo de sensores de condutividade.....	56
Tabela 3.9 - Estudo de sensores de humidade.....	57
Tabela 3.10 - Grau de proteção IP .....	59
Tabela 4.1 - Pinout Plataforma ATmega J1 e J3 (a) Conector J1; (b) Conector J3 .....	63
Tabela 4.2 - Conector JTAG.....	64
Tabela 4.3 – Conector extensor .....	64
Tabela 4.4 - Declaração de Constantes .....	75
Tabela 4.5 - Estrutura de dados.....	77
Tabela 4.6 - Trama do sensor 5TE.....	79
Tabela 5.1 - Consumo elétrico da plataforma sem fios.....	97



## Lista de Siglas e Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
APL	<i>Application Layer</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CO <sub>2</sub>	<i>Carbon dioxide</i>
CS	<i>Carrier Sense</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance</i>
DIP	<i>Dual In-line Package</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ED	<i>Energy Detection</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read Only Memory</i>
FDR	<i>Frequency Domain Reflectometry</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
I <sup>2</sup> C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union-Radio</i>
JTAG	<i>Joint Test Action Group</i>
LQI	<i>Link Quality Indicator</i>
LR-WPAN	<i>Low Rate Wireless Personal Area Network</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
NWK	<i>Network</i>
OQPSK	<i>Orthogonal-Quadrature Phase Shift Keying</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PH	Concentração de Iões de Hidrogénio
PHY	<i>Physical Layer</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PPM	Partes por milhão
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>

RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
SOC	<i>System On Chip</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>

# CAPÍTULO 1

## Introdução

Neste capítulo é apresentado o âmbito e a contextualização da dissertação, bem como as motivações e objetivos traçados para o desenvolvimento deste trabalho. Por fim são apresentadas as contribuições da dissertação e a forma como a mesma se encontra organizada.

### 1.1. Contextualização

Os inúmeros programas televisivos de cozinha, a crise nacional e internacional e o aumento dos incentivos para modernizar a agricultura são algumas das causas para o regresso à agricultura. Em Portugal, mais de 200 novos jovens agricultores têm entrado mensalmente no sector da agricultura [1]. Estes jovens trazem novas ideias, pontos de vista diferentes do atual e, acima de tudo, novos projetos com base tecnológica. Apenas 2% da classe trabalhadora dos agricultores têm menos de 35 anos, sinal este que tem vindo a mudar nestes últimos anos [1]. Em 2012 Portugal importou menos mil milhões de euros de produtos agrícolas do que no ano anterior [1], embora em 2013 o saldo da balança comercial tenha continuado a ser negativo, correspondendo a um défice de 3,7 mil milhões de euros [2]. Em 2014 Portugal produziu cerca de 70% dos produtos necessários, esperando-se que até 2020 este sector de atividade se torne autossuficiente [1]. A aposta em tecnologia incrementou a produtividade e qualidade dos produtos, a preços substancialmente mais baixos. Esta baixa de preços faz com que produtos nacionais possam ser exportados para mais mercados, contribuindo de forma positiva para o crescimento do produto interno bruto (PIB) Português. Ainda assim, as produções agrícolas continuam a ser muito voláteis, sendo que há inúmeros fenómenos responsáveis pela destruição total ou parcial das mesmas, tais como pragas, défices de nutrientes, níveis desadequados de humidade e clima. Atualmente, existem duas grandes técnicas de cultivo, sendo elas a tradicional e a hidropónica. Apesar de poderem existir diferentes variantes dentro de cada uma destas técnicas, há características que permitem diferenciar de forma inequívoca cada uma delas. A agricultura tradicional é realizada sempre em contacto com a terra e tipicamente exposta ao clima. Em contrapartida, a agricultura

hidropónica é feita em ambientes controlados e a cultura desenvolve-se normalmente em substratos. Por conseguinte, a cultura hidropónica consegue um maior controlo de pragas e de fatores relacionados diretamente com o clima.

No sentido de mitigar parte dos problemas acima referidos, surge esta dissertação, que tem por finalidade a monitorização de áreas de cultivo. A monitorização de áreas de cultivo pode ser dividida em duas áreas: monitorização do ambiente e monitorização do meio de cultivo. A presente dissertação está orientada para a monitorização do meio de cultivo, sendo que as variáveis a ler são propriedades físicas do solo ou de soluções nutritivas. São desígnios deste sistema a aplicação transversal às técnicas de cultivo tradicional e hidropónica e o baixo preço. As grandes dimensões dos espaços onde as culturas se desenvolvem fazem com que a passagem de cabos até ao local onde se pretende monitorizar dados seja altamente dispendiosa ou mesmo impossível. Desta feita, a utilização de redes sem fios torna-se necessária, sendo os dados enviados para um recetor a distância. Os dados recebidos são guardados, processados e exibidos por um computador. Com base nestes dados, o agricultor poderá intervir na cultura de uma forma mais informada. As atividades de adicionar fertilizantes, aplicar adubos químicos ou mesmo efetuar regas passam a ser baseadas em informação objetiva do estado da cultura.

## 1.2. Motivações

A utilização de tecnologia ao serviço da agricultura é uma realidade presente e futura. Com as necessidades alimentares a serem cada vez maiores a nível mundial, interessa produzir mais e melhor com iguais ou menores recursos. A monitorização das variáveis que interferem com o crescimento das produções agrícolas é determinante na obtenção de produtos agrícolas com qualidade e em quantidade desejáveis.

O desenvolvimento de uma rede de sensores, a integração de sensores, o desenvolvimento de software computacional, são alguns dos trabalhos a serem desenvolvidos no âmbito desta dissertação, os quais irão proporcionar uma aprendizagem em diferentes domínios.

## 1.3. Objetivos

O principal objetivo do projeto que esta dissertação descreve foi desenvolver uma *Wireless Sensor Network* (WSN), capaz de recolher dados do solo ou da solução nutritiva de uma cultura agrícola e enviar os mesmos para um nó central. Para tal, foi desenvolvida uma arquitetura mínima de WSN composta por um nó sensor capaz de adquirir informação das variáveis de temperatura, humidade e condutividade. Este nó, após ter

processado a informação das variáveis lidas, envia os dados para o nó central. Por sua vez, o nó central está ligado a um computador em que um software computacional permite recolher, processar, guardar e mostrar a informação proveniente dos nós sem fios ligados em rede.

Os objetivos acima referidos podem ser resumidos como:

- Desenvolvimento de uma rede sem fios (WSN) mínima composta por um nó sensor e por um nó central;
- Desenvolvimento de um nó sensor com a capacidade de adquirir as variáveis de temperatura, humidade e condutividade do solo ou de uma solução nutritiva;
- Desenvolvimento de um software computacional capaz de armazenar e de visualizar os dados referentes aos nós sensores.

#### **1.4. Contribuições**

Com esta dissertação pretende-se contribuir para uma melhoria da análise das variáveis que influenciam o crescimento das culturas agrícolas. O recurso a redes sem fios de baixo consumo elétrico irá permitir a recolha de dados durante um longo período de tempo sem que seja necessária manutenção. A análise das variáveis de temperatura, humidade e condutividade possibilitará ao agricultor ajustar diferentes parâmetros ao longo das diferentes fases de desenvolvimento da cultura agrícola. Foi objetivo deste projeto realizar um protótipo de grau laboratorial com características já próximas de um protótipo de grau industrial.

#### **1.5. Organização da Dissertação**

O presente documento encontra-se dividido em seis capítulos.

No Capítulo 1 é introduzido e enquadrado o tema desta dissertação, são apresentadas as motivações, objetivos e contribuições do projeto desenvolvido.

O Capítulo 2 é composto pela revisão do estado da arte relativo à agricultura e às tecnologias utilizadas neste projeto. Por fim, são apresentados projetos tecnológicos aplicados à agricultura.

No Capítulo 3 é identificada a arquitetura do sistema que se pretende desenvolver e são realizados estudos de mercado tendo em vista a seleção dos diferentes componentes que compõem o sistema.

O Capítulo 4 é relativo à implementação do sistema. Foi subdividido nas áreas de hardware, *firmware* e software. Foram detalhadas as diferentes tarefas para cada uma das diferentes áreas.

O Capítulo 5 é composto por alguns testes de validação a que o sistema foi submetido. Foram realizados testes a cada componente do sistema e por último foi realizado um teste de integração de todo o sistema.

Por último, o Capítulo 6 é composto pelas principais conclusões da presente dissertação e também pelas perspectivas futuras do trabalho desenvolvido.



# CAPÍTULO 2

## Estado da Arte

Este capítulo apresenta a evolução da agricultura e suas técnicas em culturas hidropónicas e culturas realizadas em solo. É realizada uma revisão do estado da arte da agricultura relativo aos elementos que contribuem para o desenvolvimento das culturas agrícolas. No âmbito da tecnologia, são realizadas revisões ao estado da arte na área dos sensores e redes sem fios. Por último, são apresentadas aplicações práticas de redes sem fios orientadas ao sector agrícola.

### 2.1. Evolução da Agricultura e suas Técnicas

Desde a formação do planeta Terra que a evolução produziu milhões de espécies vivas das quais a maioria já desapareceu. Inicialmente os cientistas dividiam os seres vivos em dois reinos: o das plantas e o dos animais. Contudo, o avanço tecnológico permitiu identificar seres microscópicos. Em 1969, Whittaker agrupou os seres vivos em cinco reinos: bactérias, algas, fungos, plantas e animais.

As plantas são seres com capacidade autotrófica, ou seja, conseguem produzir o seu próprio alimento. Em contrapartida, animais e humanos não têm essa capacidade, sendo seres heterotróficos. Animais e humanos ao longo da história utilizaram diferentes técnicas para satisfazerem as suas necessidades alimentares. A agricultura surge no Neolítico [3] quando seres humanos começaram a cultivar plantas e a criar animais. Esta evolução provocou uma alteração do ecossistema natural. Desde então, a agricultura expandiu-se e os ganhos de produção acentuaram-se, graças à utilização de técnicas cada vez mais avançadas.

#### 2.1.1. Agricultura em Solo

A agricultura realizada em solo foi a primeira técnica utilizada pelo ser humano para produzir o seu próprio alimento. Esta técnica tem por base a utilização da terra como substrato. A terra tem as funções de meio de germinação, suporte das raízes e meio de diluição de nutrientes. A concentração adequada de nutrientes é conseguida à custa de fatores naturais ou então recorrendo a fertilizantes.

Desde os primórdios da agricultura, a utilização de utensílios na ajuda da realização das tarefas agrícolas tem-se massificado. Tal tem como consequência ganhos de qualidade e quantidade de produto. O aparecimento de máquinas ao serviço da agricultura fez com que a mão-de-obra neste sector diminuísse consideravelmente. Esta mudança permitiu que atualmente as produções sejam realizadas e controladas por uma só pessoa.

Na agricultura realizada em espaços abertos, as culturas estão expostas a fatores ligados ao clima e a pragas. Na tentativa de combater parte ou a totalidade das pragas, os agricultores utilizaram técnicas como a rotação das culturas, o uso de cinzas ou o cultivo de diferentes espécies de plantas num espaço próximo. Atualmente, são usados pesticidas para combater as pragas e estufas para minimizar os efeitos do clima.

### **2.1.2. Agricultura Hidropónica**

A técnica de cultivo hidropónica remonta a várias centenas de anos antes de Cristo. Os jardins suspensos da Babilónia ou os jardins flutuantes no México do tempo dos Aztecas são alguns dos exemplos de culturas realizadas sem recurso ao solo [4]. O termo “hidroponia” deriva do grego “hydro”, que significa água e “ponos”, que significa trabalho. Em 1936, o nome hidroponia aparece pela primeira vez numa revista científica num texto da autoria de W. F. Gericke [4].

Na agricultura realizada em solo, as plantas utilizam a terra enriquecida de nutrientes para saciarem as suas necessidades. Na técnica de cultivo hidropónica, os nutrientes dissolvidos na água circulam ao longo de toda a produção, garantindo alimentação à cultura desenvolvida. Graças a este controlo de nutrientes dissolvidos em determinada percentagem de água, as culturas são mais saudáveis e as quantidades vitamínicas da cultura garantidas. O desenvolvimento dos sistemas hidropónicos fez com que o consumo de água viesse a ter reduções significativas, por via da redução do fenómeno de evaporação, bem como por uma melhor gestão das necessidades da cultura.

Atualmente, o desenvolvimento da técnica hidropónica tem sido de tal forma explorada que levou a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) a apostar fortemente neste tipo de agricultura [4]. O objetivo é permitir o crescimento de culturas em viagens que se realizem fora do planeta Terra. Para além de garantir a alimentação aos astronautas, esta técnica faz com que o equilíbrio entre oxigénio e dióxido de carbono do habitáculo seja regulado naturalmente.

### **2.1.3. Vantagens e Desvantagens das Culturas Hidropónicas face às Culturas em Solo**

O facto de a cultura hidropónica não se realizar em solo e de se desenvolver em espaços controlados faz com que esta, comparativamente à cultura realizada em solo, apresente diferenças que podem ser traduzidas em vantagens e desvantagens, sendo que as vantagens são:

- Possibilidade de realização de culturas em solos poluídos ou até mesmo em solos impróprios para a realização de práticas agrícolas;
- Maior densidade de cultura por metro quadrado de espaço comprado;
- Menor área de terreno necessário por via de uma maior produção por metro quadrado;
- Operações necessárias no cultivo em solo, tais como lavrar, são evitadas;
- A utilização da água como recurso torna-se mais eficiente;
- O controlo de pragas é mais eficiente pelo facto de a cultura se realizar num espaço controlado;
- Dispõe-se de controlo total ou parcial sobre variáveis como temperatura, humidade, concentração de iões de hidrogénio (pH), condutividade, entre outras;
- Existe a possibilidade de desenvolvimento de culturas para fins domésticos.

Por outro lado, as desvantagens são:

- Investimento inicial elevado, visto que para além do terreno são necessárias infraestruturas próprias da cultura hidropónica;
- Apesar de a cultura estar menos exposta a pragas, as mesmas propagam-se com maior rapidez visto que a solução nutritiva é comum a toda a cultura;
- Como consequência do anterior, é obrigatório fazer um acompanhamento diário do estado da cultura;
- Pode ser necessário adaptar espécies às práticas hidropónicas.

## **2.2. Elementos Preponderantes no Desenvolvimento de Culturas**

As plantas requerem uma grande variedade de nutrientes. Cada espécie absorve de forma diferente e em percentagens diferentes determinados constituintes de uma solução nutritiva ou de um ambiente de desenvolvimento. Há quatro elementos constituintes da planta que ocorrem naturalmente [5], sendo eles:

- Carbono - Elemento que é fixado do ar através da fotossíntese. Corresponde a 50% do peso da uma planta seca.

- Hidrogénio - É obtido totalmente a partir da água. Este elemento é responsável pela formação de açúcares e por manter a planta com a rigidez certa.
- Oxigénio - Durante o processo de fotossíntese, são produzidos açúcares e oxigénio. Quando não existe luz, a planta deixa de produzir oxigénio e açúcares.
- Nitrogénio - É um elemento fundamental de todas as proteínas.

### 2.2.1. Macronutrientes

São necessários aproximadamente 16 nutrientes minerais para o desenvolvimento ótimo de uma planta. Contudo, nem todos os nutrientes têm a mesma importância [5], sendo que nitrogénio, fósforo e potássio são os que têm o papel mais importante na alimentação das plantas. São conhecidos por macronutrientes. Estes três elementos são encontrados no ar, na água e também no solo. Enxofre, magnésio e cálcio fazem também parte dos macronutrientes, embora não sejam colocados nas soluções nutritivas para fins hidropónicos.

Tabela 2.1 - Características do nitrogénio

Nutriente	<i>Nitrogénio</i>
<b>Função</b>	Garante a formação de aminoácidos, coenzimas, clorofila.
<b>Baixa quantidade</b>	Má formação da planta, folhas amarelas.
<b>Alta quantidade</b>	Folhagem verde escuro, atraso no amadurecimento do fruto.

Tabela 2.2 - Características do fósforo

Nutriente	<i>Fósforo</i>
<b>Função</b>	Produção de açúcar, ajuda no desenvolvimento da raiz.
<b>Baixa quantidade</b>	Folhagem verde escuro, crescimento atrofiado, planta roxa.
<b>Alta quantidade</b>	Menor assimilação de cobre e zinco.

Tabela 2.3 - Características do potássio

Nutriente	<i>Potássio</i>
<b>Função</b>	Desenvolvimento da raiz, robustez, fabrico de açúcar e amido.
<b>Baixa quantidade</b>	Desenvolvimento lento, folhagem com manchas, fungos.
<b>Alta quantidade</b>	Deficiências de magnésio.

Tabela 2.4 - Características do enxofre

<b>Nutriente</b>	<i>Enxofre</i>
<b>Função</b>	Absorção das proteínas, da água, frutificação, fungicida natural.
<b>Baixa quantidade</b>	Nova folhagem amarelada com a sua base roxa.
<b>Alta quantidade</b>	Crescimento lento, folhagem pequena.

Tabela 2.5 - Características do magnésio

<b>Nutriente</b>	<i>Magnésio</i>
<b>Função</b>	Usada na clorofila, produção de enzimas.
<b>Baixa quantidade</b>	Folhagem velha, ondulada e amarelada entre folha e veios.
<b>Alta quantidade</b>	Não é usual.

Tabela 2.6 - Características do cálcio

<b>Nutriente</b>	<i>Cálcio</i>
<b>Função</b>	Promove o desenvolvimento da parte aérea, paredes celulares.
<b>Baixa quantidade</b>	Folhagem pequena e enrugada, novos rebentos morrem.
<b>Alta quantidade</b>	Análise difícil.

### 2.2.2. Micronutrientes

A maioria das plantas contêm uma pequena quantidade e variedade de micronutrientes [5]. Estes são: boro, cobre, cobalto, ferro, manganês, molibdénio e zinco.

Tabela 2.7 - Características do boro

<b>Nutriente</b>	<i>Boro</i>
<b>Função</b>	Promove o desenvolvimento das paredes celulares.
<b>Baixa quantidade</b>	Caule quebradiço, fraco crescimento, muitos caules.
<b>Alta quantidade</b>	Pontas da folhagem amarelas até ao ponto de caírem.

Tabela 2.8 - Características do cobre

<b>Nutriente</b>	<i>Cobre</i>
<b>Função</b>	Necessário para fotossíntese, respiração e enzimas.
<b>Baixa quantidade</b>	Folhas com manchas amarelas.
<b>Alta quantidade</b>	Reduz a quantidade de ferro disponível.

Tabela 2.9 - Características do cobalto

<b>Nutriente</b>	<i>Cobalto</i>
<b>Função</b>	Ajuda a fixação do nitrogénio.
<b>Baixa quantidade</b>	Diminuição da produtividade

Tabela 2.10 - Características do ferro

<b>Nutriente</b>	<i>Ferro</i>
<b>Função</b>	Formação da clorofila, produção de energia
<b>Baixa quantidade</b>	Novos rebentos morrem, cor amarela entre veios e folhas.
<b>Alta quantidade</b>	Não é usual.

Tabela 2.11 - Características do manganês

<b>Nutriente</b>	<i>Manganês</i>
<b>Função</b>	Ajuda ao crescimento, formação de oxigénio na fotossíntese.
<b>Baixa quantidade</b>	Cor amarela entre veios e folhas, flores não aparecem.
<b>Alta quantidade</b>	Reduz a quantidade de ferro disponível.

Tabela 2.12 – Características do molibdénio

<b>Nutriente</b>	<i>Molibdénio</i>
<b>Função</b>	Ajuda a fixação do nitrogénio.

Tabela 2.13 - Características do zinco

<b>Nutriente</b>	<i>Zinco</i>
<b>Função</b>	Formação da clorofila, respiração.
<b>Baixa quantidade</b>	Folhagem pequena e onduladas nas extremidades.
<b>Alta quantidade</b>	Reduz a quantidade de ferro disponível.

### 2.2.3. Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

Durante o processo de fotossíntese, as plantas utilizam o dióxido de carbono, a iluminação e o hidrogénio para produzirem os hidratos de carbono que são o seu alimento. Em espaços fechados, os níveis de CO<sub>2</sub> estão tipicamente numa gama de valores entre 325 a 425 partículas por milhão (ppm) [5]. O aumentar destes valores para uma gama de 1000 a 1500 ppm torna o desenvolvimento de determinada cultura mais rápido.

#### **2.2.4. Condutividade**

A condutividade elétrica do meio de desenvolvimento de uma cultura permite identificar a quantidade de sais minerais existentes [5]. A condutividade da água destilada tem um valor muito baixo. Quanto maior for a concentração de sais minerais, maior será o valor da condutividade da água. A medida da condutividade pode ser realizada quer em culturas em solo, quer em culturas hidropónicas. Esta medida não permite especificar qual dos nutrientes de determinada solução está em falta: apenas se consegue obter um valor global da solução nutritiva.

#### **2.2.5. Concentração de Iões de Hidrogénio (pH)**

O pH é a medida da concentração de iões de hidrogénio positivos numa solução nutritiva ou em solo. As medidas de pH estão numa gama de valores compreendida entre 0 a 14, onde 0 é o valor máximo referente a uma solução ácida, 7 é o valor relativo a uma solução neutra e, por fim, o valor 14 é referente ao estado máximo de alcalinidade. Em termos físicos, uma solução abaixo do valor 7 corresponde a uma concentração com um maior número de iões de hidrogénio do que hidroxilo. Quando o valor de pH é superior ao valor 7, as concentrações de iões de hidroxilo são superiores às de hidrogénio. Os valores de pH afetam a absorção de sais minerais por parte da planta [5]. Estes valores dependem do tipo de cultura que se pretende desenvolver, do meio em que a mesma se desenvolve e da temperatura. A gama de valores entre 5,8 e 6,5 é a que mais se adequa na generalidade das culturas.

#### **2.2.6. Temperatura**

Uma temperatura adequada à cultura faz com que a mesma se desenvolva de forma saudável e com as performances esperadas. A temperatura ambiente não deve ser muito diferente da temperatura da raiz da planta [4]. Quando esta condição não é garantida, problemas como o enfraquecimento da planta, a queda de folhas parcial ou mesmo total, podem surgir. Os problemas associados a esta diferença de temperatura entre ambiente e raiz acontecem especialmente em sistemas hidropónicos, uma vez que a solução nutritiva é aplicada diretamente na raiz da planta.

#### **2.2.7. Água**

Entre 80% a 98% da água absorvida pelas plantas é necessária para o processo de transpiração [5]. Este processo permite uma regulação natural da temperatura da planta. A utilização de água descontaminada permite um desenvolvimento mais saudável da

cultura. Em sistemas hidropónicos, a propagação de doenças por água contaminada é rapidíssima, sendo que nestes sistemas uma análise mais regular da qualidade da água é de extrema importância.

### **2.2.8. Humidade**

A humidade relativa é a percentagem de saturação em vapor de água de um volume de ar a uma temperatura específica [5]. A influência da humidade nas plantas é determinante na escolha da cultura. Excesso de humidade do ar provoca nas plantas uma menor transpiração, que leva a um menor arrefecimento das folhas.

### **2.2.9. Oxigénio**

O oxigénio é libertado das plantas aquando do processo de fotossíntese [4]. Com a ausência de luz, a planta deixa de produzir oxigénio e açúcares.

### **2.2.10. Osmose**

O processo de osmose é facilmente explicável fazendo uma analogia com capsulas de café [5]. A água aplicada num dos lados da capsula é transferida rapidamente para o lado oposto. Nas plantas o processo é parecido, sendo que o transporte de água e nutrientes é feito do solo húmido (meio hipotónico), para o interior da raiz (meio hipertónico). O processo reverso de osmose acontece quando há um excesso de fertilizantes na cultura, podendo levar à morte de culturas inteiras.

### **2.2.11. Iluminação**

A iluminação de culturas agrícolas é uma das maiores preocupações dos produtores agrícolas [5]. O sol emite luz em diferentes comprimentos de onda que são utilizados pelas plantas em diferentes fases do seu crescimento. A utilização de iluminação artificial é uma prática cada vez mais corrente, que tem como principais objetivos aumentar a intensidade da luz e o número de horas de iluminação.

## **2.3. Como Ajustar Soluções Nutritivas Hidropónicas**

Existem estudos com mais de um século orientados para o ajuste de soluções nutritivas em hidroponia [4]. Estes estudos indicam as quantidades percentuais para os macronutrientes e micronutrientes. Ao longo dos anos, têm-se vindo a melhorar estas formulações com base em resultados práticos. Quer nos sistemas hidropónicos de malha aberta, quer nos de malha fechada, é importante preparar as soluções nutritivas em função



das diferentes fases de crescimento da cultura. A constante monitorização dos nutrientes na solução deverá ser realizada por meio de um sensor de condutividade elétrica. O sensor de condutividade elétrica apenas indica qual das famílias de nutrientes está em défice, não conseguindo identificar que nutriente foi mais absorvido pela cultura. Uma análise detalhada por nutriente implica o recurso a equipamento de análise laboratorial, pelo que o sensor de condutividade elétrica é atualmente o sensor de referência no ajuste das soluções nutritivas.

É ainda importante monitorizar os valores de pH de soluções nutritivas para que se garantam níveis aceitáveis [4]. Para elevar o pH são utilizadas soluções de sódio ou hidróxido de potássio. Para diminuir os valores de pH são utilizados ácidos nítricos ou clorídricos. Estas substâncias deverão ser juntas à solução nutritiva nas regas. O constante acerto dos valores de pH não é benéfico para o desenvolvimento da cultura, pelo que muitos autores sugerem que a planta se autorregule naturalmente. Só em casos extremos de flutuações no valor de pH, deverá o agricultor intervir.

Existe atualmente um software computacional, desenvolvido por Daniel Fernandez, que reúne uma série de formulações de diferentes culturas [6]. Este software, de instalação livre, indica quais as percentagens de nutrientes a adicionar na solução nutritiva, bem como os níveis expectáveis de condutividade elétrica.

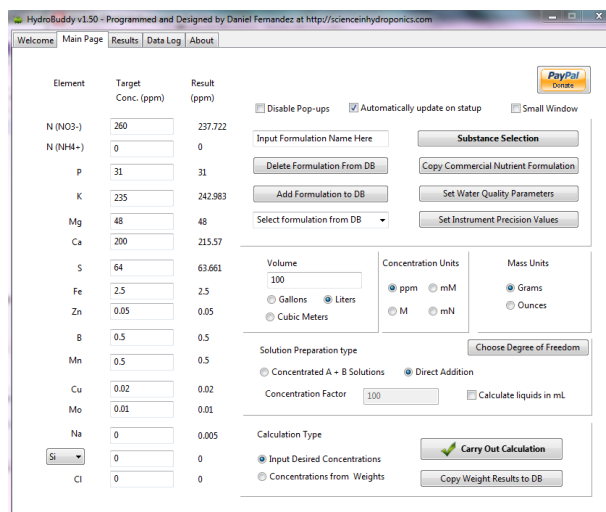


Figura 2.1 - HydroBuddy software [6]

## 2.4. Vantagens da Monitorização de Dados em Culturas Agrícolas

Uma má gestão dos diferentes recursos do sector agrícola poderá trazer perdas elevadas a este sector de atividade [7]. Estas perdas resultam de quebras de produção (diferença entre a produção inicialmente estimada e a produção efetiva) e desperdício de energia.

A falta de conhecimento técnico da grande maioria dos agricultores faz com que os mesmos despendam recursos de um modo ilógico. A utilização de pesticidas, fertilizantes químicos e água tem aumentado significativamente nos últimos anos. Contudo, na maioria dos casos, o aumento da utilização de água e fertilizantes químicos nas culturas não tem trazido o aumento produtivo desejado. A utilização de fertilizantes e pesticidas faz com que os solos e canais de água sejam afetados. A poluição excessiva proveniente deste sector tem consequências para os animais e a vegetação, aumentando a erosão dos solos.

Inúmeros desafios são colocados atualmente à agricultura, sendo que a utilização dos recursos de forma controlada e em função das necessidades da cultura é uma das grandes preocupações atuais. Surge então o conceito de agricultura de precisão, intrinsecamente ligado ao conceito de sustentabilidade. A ideia de produzir as quantidades certas no tempo certo e com recursos controlados caracteriza a agricultura de precisão [8]. A agricultura de precisão utiliza a tecnologia mais recente para monitorizar e atuar nas culturas agrícolas, com o objetivo de obter soluções de problemas como:

- Redução do uso de pesticidas e fertilizantes químicos;
- Redução da pegada ecológica;
- Aumento em qualidade e quantidade da produção;
- Redução dos custos de produção;
- Garantir informação da cultura.

Na prática, a agricultura de precisão baseia-se na análise do meio de cultivo, utilizando sensores de temperatura, humidade e condutividade, entre outros. Estes são utilizados para se adquirir informação das variáveis em diferentes locais de cultivo. As propriedades físicas do solo, texturais (quantidade de argila, quantidade de areia) e estruturais (distribuição das partículas e agregados num dado volume de solo), influenciam outras propriedades físicas do solo, tais como: absorção de água, resistência e riqueza do solo [8]. Tendo por base esta teoria, foram realizados estudos com o objetivo de encontrar a melhor distância entre nós sensores a aplicar na agricultura de precisão. Esta distância baseia-se no tipo de cultura, no grau de precisão que se pretende para o sistema e no investimento que o agricultor pretende fazer [9]. Tipicamente, a distância entre nós sensores deverá ser de 10 a 20 metros [10].

Após a recolha da informação o agricultor poderá decidir qual ação tomar, isto é, regar, aplicar fertilizantes, pesticidas, entre outras.

## 2.5. Sensores Utilizados em Culturas Agrícolas

O crescimento de uma cultura agrícola depende do processo de fotossíntese. Os níveis de fotossíntese aumentam quando é atingida a temperatura certa de determinada cultura (tipicamente entre 20 °C a 25 °C). Os níveis de radiação solar alteram a temperatura da planta, pelo que é conveniente ajustar sempre que possível a temperatura da cultura (se realizada dentro de estufas). Durante a noite, a planta fica inativa e é importante que a temperatura da mesma baixe para os níveis de temperatura de descanso.

Valores excessivos de humidade relativa podem provocar doenças e um desenvolvimento lento nas plantas [11]. Valores baixos de humidade relativa podem levar a um excesso de transpiração causando nas plantas desidratação e, em alguns casos, a morte. O excesso de transpiração faz com que o processo de fotossíntese diminua e, conseqüentemente, que os níveis de assimilação de CO<sub>2</sub> baixem.

Durante as diferentes fases de crescimento da planta, as necessidades de água, fertilizante e temperatura variam. Como tal, os valores de humidade, condutividade, temperatura e de alcalinidade do solo deverão ser observados de forma contínua para que se possa intervir de forma adequada na cultura.

Para ajudar a resolver e a controlar alguns dos problemas enumerados anteriormente, existem diferentes tipos de sensores utilizados em agricultura. Podem ser divididos em duas grandes áreas de medida: monitorização do ambiente e monitorização do meio de cultivo (solo ou solução hidropónica).

Os sensores de monitorização do ambiente (estação meteorológica) são:

- Sensor de temperatura;
- Sensor de radiação solar;
- Sensor de humidade relativa;
- Sensor de velocidade de vento (anemómetro);
- Sensor de precipitação;
- Sensor de CO<sub>2</sub>.

Os sensores de monitorização do meio de cultivo são:

- Sensor de temperatura;
- Sensor de humidade;
- Sensor tensiométrico;
- Sensor de condutividade;
- Sensor de pH;
- Sensor de transpiração das folhas;

- Sensor dendrómetro.

### 2.5.1. Sensor de Temperatura

Existem atualmente diferentes tipos de sensores de temperatura: resistivos (*Resistance Temperature Detector* RTD), termístores, semicondutores e termopares [12].

#### **Resistivos (RTD)**

Os sensores de temperatura do tipo resistivo (RTD), Figura 2.4(a), têm uma elevada precisão. O seu princípio de funcionamento baseia-se no facto da resistência medida nos terminais do sensor aumentar quando a temperatura aumenta e diminuir quando a temperatura diminui [12]. A escolha do tipo de metal para o sensor deverá ser muito cuidadosa para que a sua resistência não se altere ao longo do tempo de vida por via dos ciclos de aquecimento e arrefecimento. Tipicamente, os sensores RTD são construídos à custa de materiais como a platina, o níquel, o cobre ou o tungsténio. Para que se possa determinar a sua resistência é aplicada uma tensão que gera uma corrente. Estes sensores, para além da precisão de medida são também caracterizados por serem muito estáveis, lineares e por terem uma gama de medida ampla.

Tabela 2.14 - Materiais usados nos sensores resistivos

<b>Material</b>	<b>Linearidade</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Coefficiente de Temperatura (%/°C)</b>
Platina	Alta	-200 a 850	0,39
Níquel	Baixa	-80 a 320	0,67
Cobre	Alta	-200 a 260	0,38
Tungsténio	Média	-70 a 2700	0,45

#### **Termístores**

Os termístores, Figura 2.4(c), também pertencem à família dos sensores resistivos, porém, ao contrário dos RTD, são construídos em material cerâmico, o que lhes confere uma maior gama de temperatura [12]. Existem dois tipos de termístores: os PTC e os NTC. Os PTC têm um coeficiente de temperatura positivo e os NTC um coeficiente de temperatura negativo, isto é, a sua resistência diminui com o aumento de temperatura.

São caracterizados por terem uma boa estabilidade, por apresentarem uma gama de temperatura ampla, por serem difíceis de calibrar e por serem não lineares.

#### **Semicondutores**

Os sensores de temperatura do tipo semicondutor, Figura 2.4(d), são normalmente construídos à custa de um transístor bipolar ligado como um díodo, em que o coletor e a base estão curto-circuitadas [12]. Quando uma corrente constante atravessa a junção *pn*,

uma tensão é gerada aos terminais ( $V_{BE}$ ). A relação entre temperatura e tensão poderá ser considerada linear.

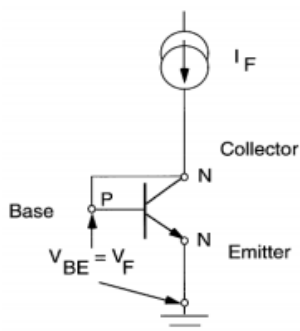


Figura 2.2 – Princípio de funcionamento do sensor de temperatura semiconductor

São caracterizados por serem lineares, por apresentarem uma ampla gama de temperatura e por terem um custo baixo (igual ou inferior a 1 €).

### Termopares

Os termopares, Figura 2.4(b), são utilizados pela sua versatilidade aliada ao baixo custo (aproximadamente 5 €). Através da junção de dois fios com características termoelétricas diferentes, uma tensão ( $e_{AB}$ ) é produzida pela diferença de temperatura existente na junção [12]. Do valor desta tensão pode ser determinado o valor da temperatura. A diferença de potencial que resulta de uma diferença de temperatura tem o nome de tensão de *Seebeck*.

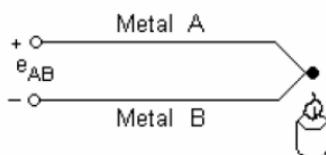


Figura 2.3 - Princípio de funcionamento do termopar

Apesar do seu baixo custo, os termopares não são muito utilizados devido à sua constante necessidade de calibração e por apresentarem baixa linearidade e precisão.

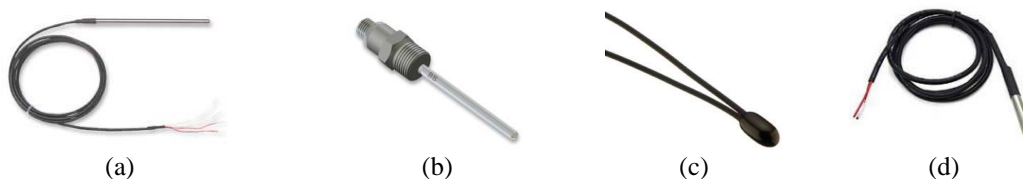


Figura 2.4 – Sensor de temperatura  
(a) RTD; (b) Termopar; (c) Termistor; (d) Semicondutor

### 2.5.2. Sensor de Radiação Solar

As duas tecnologias mais utilizadas na medição da radiação solar são a termopar e a fotovoltaica [13]. Com base nestas tecnologias, foram desenvolvidos dois sensores: o piranómetro, Figura 2.5(a), e o pireliómetro, Figura 2.5(b). O piranómetro mede a radiação direta e difusa, tendo um ângulo de abertura de 180 graus. O pireliómetro é usado para a medição de radiação direta, tendo um ângulo de abertura de 5 graus. Este último é construído à custa dos sensores piranómetros, mas com um tubo que lhe confere 5 graus de abertura e um equipamento capaz de o orientar na direção do sol.

O piranómetro de termopar é constituído por um disco dividido em diferentes partes. Uma série de termopares são colocados na parte inferior do disco, sendo que as junções quentes representam a parte preta do disco e a junção fria a parte branca. Este aquecimento diferencial gera uma força eletromotriz proporcional à radiação solar.

O piranómetro fotovoltaico é constituído por células de silício que geram uma corrente proporcional à variação da radiação solar.



Figura 2.5 - Sensor de radiação solar  
(a) Sensor piranómetro; (b) Sensor pireliómetro

### 2.5.3. Sensor de Humidade Relativa

Existem algumas técnicas de medição de humidade relativa, contudo a resistiva e a capacitiva são as mais utilizadas [14].

O sensor resistivo, Figura 2.6(a), baseia-se na variação da resistência elétrica aos seus terminais [15]. Os eléctrodos, formados por um metal nobre, são envolvidos num material com características dielétricas capazes de absorver a humidade presente no ar. Esta ação provoca uma dissociação dos grupos iónicos que resulta num aumento da condutividade elétrica. O tempo de resposta dos sensores resistivos convencionais situa-se numa faixa entre 10 a 30 segundos para 63% de humidade relativa. Caracterizam-se por ter uma saída em tensão, por serem lineares e por não necessitarem de circuitos para acondicionamento de sinal.

Os sensores de humidade relativa do tipo capacitivo, Figura 2.6(b), são revestidos por um material dielétrico (silício, cerâmica, entre outros) que é colocado entre dois

elétrodos condutivos, formando um condensador [15]. Com a mudança de humidade relativa do ar o material dielétrico altera as suas propriedades, provocando uma alteração do valor de capacitância do sensor. O circuito eletrónico associado a este sensor mede a capacitância e converte-a para humidade relativa. Caracterizam-se pela sua rápida resposta, pela sua linearidade e por necessitarem de um circuito para o acondicionamento de sinal.



Figura 2.6 - Sensor de humidade relativa  
(a) Sensor resistivo; (b) Sensor capacitivo

#### 2.5.4. Sensor de Medição do Vento (Anemómetro)

Anemómetro é o nome do dispositivo que mede a velocidade e a direção do vento. Existem diferentes tipos de anemómetros; porém, as técnicas de rotação, fio quente e ultrassons são as mais utilizadas.

A técnica de rotação utiliza normalmente uns “copos”, Figura 2.7(a), acoplados ao eixo. A velocidade que este sistema atinge é proporcional à do vento. A leitura da velocidade é realizada por um motor que funciona em modo gerador. Quanto maior é a velocidade de rotação, maior é a tensão aos terminais do motor.

A técnica de fio quente, Figura 2.7(b), baseia-se no princípio de arrefecimento de um material, que varia em função da velocidade do ar. Um fio (normalmente é usado o tungsténio) com dimensões na ordem dos micrómetros é aquecido acima da temperatura ambiente. A passagem do ar a uma determinada velocidade provoca uma diminuição da temperatura do fio que se traduz numa variação da resistência elétrica. Este valor lido poderá ser convertido em velocidade do vento.

A técnica de ultrassons, Figura 2.7(c), utiliza a relação do vento com a velocidade de propagação das ondas sonoras. Tipicamente, é utilizada uma frequência de 20 kHz, em que as ondas sonoras são enviadas de um ponto A para um ponto B. O tempo de propagação das ondas é calculado na ausência de vento (valor de referência). Assim sendo, a velocidade do vento pode ser obtida pela diferença entre a velocidade de propagação da onda esperada e a velocidade lida.

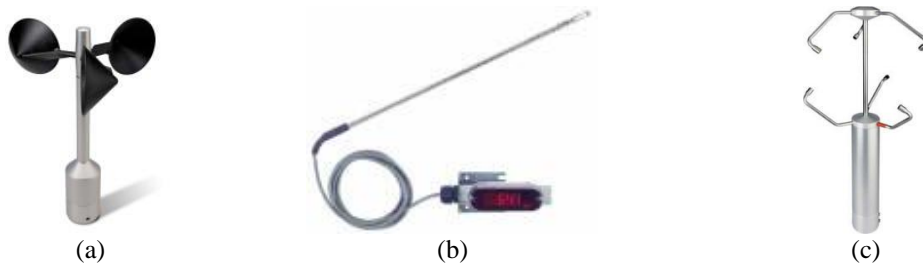


Figura 2.7 - Sensor de medição do vento  
(a) Sensor mecânico “copos”; (b) Sensor fio quente; (c) Sensor de ultrassons

### 2.5.5. Sensor de Precipitação

O sensor de precipitação é usado para medir localmente a quantidade de chuva em determinado período de tempo. São usados dois princípios para a deteção da chuva, um de carácter mecânico, que se baseia no movimento de um pêndulo, e um outro que utiliza feixes de luz a incidirem diretamente num invólucro de vidro.

O sensor de chuva mecânico, Figura 2.8(a), utiliza dois pequenos baldes que estão assentes num pivô. No topo do sensor existe um tubo afunilado que canaliza a água da chuva para o interior do mesmo. Esta água entra no primeiro balde até ser atingida a medida previamente calibrada. O segundo balde encontra-se em posição baixa segurado por um íman. Quando a medida de chuva é atingida no primeiro balde, o íman é libertado provocando um movimento do pêndulo. Todos os movimentos ascendentes e descendentes são contados e indicam a quantidade de precipitação num período de tempo.

O sensor de chuva de feixes de luz, Figura 2.8(b), é composto por um invólucro normalmente de vidro e usa o princípio de reflexão interna total. Uma luz infravermelha é irradiada a 45 graus para o vidro e a quantidade de luz refletida é monitorizada. Na presença de chuva a quantidade de luz refletida é menor. É com base neste princípio que se determinam o tamanho e a quantidade de gotas de água à superfície do vidro.



Figura 2.8 - Sensor de precipitação  
(a) Sensor mecânico; (b) Sensor de feixes de luz

### 2.5.6. Sensor de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

Os sensores de medição de dióxido de carbono são divididos em duas categorias: sensores eletroquímicos e sensores de infravermelhos não-dispersivos.



Os sensores eletroquímicos, Figura 2.9(a), são subdivididos em três tipos: potenciométrico, amperométrico e condutométrico [16]. O potenciométrico é o mais utilizado da família dos sensores eletroquímicos e utiliza um eletrólito sólido entre dois elétrodos. A força eletromotriz medida entre os dois elétrodos permite determinar a quantidade de dióxido de carbono. Caracteriza-se pela sua elevada precisão, e pelo seu elevado consumo de energia elétrica.

Os sensores de infravermelhos não-dispersivos, Figura 2.9(b), utilizam o princípio da absorção de luz num determinado comprimento de onda por um dado gás [17]. Os sensores existentes no mercado usualmente são constituídos por emissor e recetor de infravermelhos e por um tubo de luz. Quando o gás atravessa o tubo, a luz resultante é medida, determinando-se a quantidade de gás presente no ar. Conseguem efetuar leituras muito rápidas e pertencem aos sensores de baixo consumo.

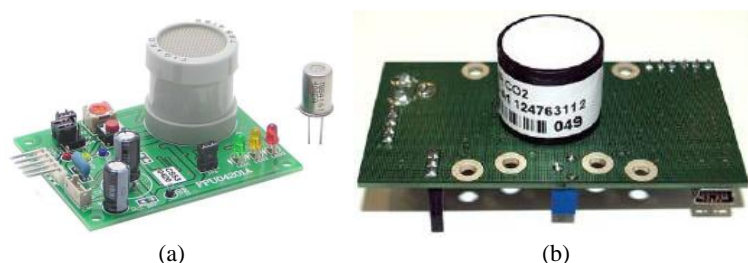


Figura 2.9 – Sensor de dióxido de carbono  
(a) Sensor eletroquímico; (b) Sensor infravermelho não-dispersivo

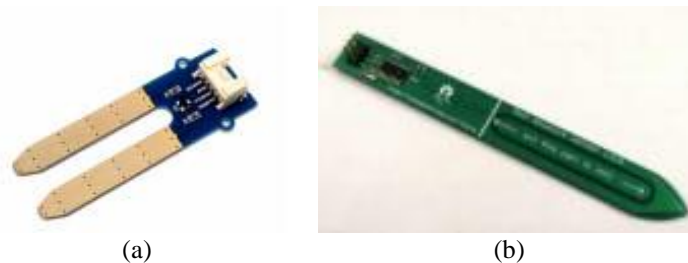
### 2.5.7. Sensor de Humidade

As tecnologias existentes para sensores de humidade de análise de culturas (solo, hidropónicas) são a resistiva e a capacitiva.

O sensor de humidade do tipo resistivo, Figura 2.10(a), utiliza dois elétrodos expostos. Estes elétrodos são revestidos com um material condutivo de baixa oxidação. A sua medida é baseada na alteração da resistência entre os dois elétrodos. Em contacto com o meio de cultivo húmido, a resistência à passagem da corrente elétrica irá ser menor e a diferença de tensão aos terminais do sensor, maior [18]. É caracterizado por apresentar baixa precisão de leituras, rápida oxidação do material que está em contacto com o solo (influência nas leituras com o passar dos anos) e baixo custo (inferior a 4 €).

O sensor de humidade do tipo capacitivo, Figura 2.10(b), mede as alterações da constante dielétrica do meio de cultivo. Este método é também conhecido por *Frequency Domain Reflectometry* (FDR). O sensor é composto por dois elétrodos separados por um material dielétrico (substrato do meio de cultivo) É gerado um sinal eletromagnético com uma frequência que pode variar de 50 MHz a 150 MHz (dependendo do fabricante). Este

sinal é encaminhado pelo primeiro elétrodo e o sinal de retorno recebido pelo segundo elétrodo. A diferença entre o sinal de saída e o sinal recebido permite determinar o valor de humidade. Têm um grau de precisão elevado, apresentam uma excelente estabilidade de leituras mesmo com o passar dos anos e têm um custo compreendido entre os 30 € a 150 €.



(a) (b)  
 Figura 2.10 - Sensor de humidade  
 (a) Sensor resistivo; (b) Sensor capacitivo

### 2.5.8. Sensor Tensiométrico

Este tipo de sensor é utilizado para medir a quantidade de água existente no solo. O sensor é constituído por um tubo de plástico cheio de água e hermeticamente selado. A parte inferior do tubo é constituída por uma cápsula cerâmica porosa. Estes sensores têm normalmente um manómetro que indica a pressão (kilopascal ou centibar) criada no interior do tubo. Em solo seco, a água sai do interior do sensor para o solo através da cápsula cerâmica. Nestas condições a pressão é máxima. Em solo húmido, a água é assimilada pela cápsula cerâmica do tensiómetro fazendo com que a pressão seja mínima. São dispositivos precisos, com um tempo de vida assinalável e apresentam um custo aproximado de 100 €.



Figura 2.11 - Sensor tensiométrico

### 2.5.9. Sensor de Condutividade Elétrica

Condutividade é a capacidade que um material tem para conduzir corrente elétrica [19]. Os sensores de condutividade elétrica podem ser divididos em dois tipos: sensores de contacto e sensores sem contacto.

O princípio de funcionamento dos sensores de contacto, Figura 2.12(a), é baseado na quantidade de corrente elétrica que flui de um ponto A para um ponto B. Para que a corrente elétrica possa fluir convenientemente entre dois pontos separados fisicamente, é necessário que a água ou o solo sejam ricos em sais minerais [19]. Aplicando uma corrente DC à solução nutritiva, as moléculas que conduzem a corrente elétrica afastam-se e as leituras não são válidas. Aplicando uma tensão com frequência superior a 1 kHz à solução nutritiva, as moléculas não têm tempo de se afastarem fazendo com que as medidas de condutividade elétrica sejam as reais. Esta tecnologia apresenta uma precisão e estabilidade assinaláveis a um custo compreendido entre os 200 € a 600 €.

Os sensores sem contacto, Figura 2.12(b), utilizam o princípio do eletromagnetismo entre dois pontos separados fisicamente. Duas bobines de cobre são colocadas numa estrutura de policloreto de vinilo (pvc) separadas fisicamente, mas ligadas eletricamente. A primeira bobine emite um campo eletromagnético que é recebido pela segunda bobine. A potência de sinal recebida pela segunda bobine irá depender da capacidade que o solo tem para conduzir corrente elétrica. Estes sensores conseguem monitorizar áreas significativas de terreno num tempo assinalável, atingem profundidades na ordem dos 2 metros, são precisos, e têm um custo aproximado de 15 mil €.



Figura 2.12 - Sensor de condutividade elétrica  
(a) Sensor de contato; (b) Sensor eletromagnético

### 2.5.10. Sensor de Concentração de Iões de Hidrogénio (pH)

Existem algumas técnicas para identificar a concentração de iões de hidrogénio, pelo que a mais utilizada é a de eléctrodos com membrana de vidro [20]. Este sensor mede a diferença de tensão entre dois eléctrodos afastados fisicamente. O primeiro eléctrodo serve como referência e o segundo como indicador. Os eléctrodos são colocados numa única ponta de medição, sendo que o indicador está dentro de uma membrana de vidro com um valor de referência 7 (solução neutra). A troca de iões de hidrogénio, entre a solução de referência e a solução medida, gera um sinal elétrico que indica a concentração de iões de hidrogénio. Requerem uma constante calibração, são muito frágeis e têm um custo aproximado de 60 €.



Figura 2.13 - Sensor de pH

### 2.5.11. Sensor de Transpiração das Folhas

A monitorização da transpiração das folhas ajuda na deteção prévia de doenças e no controlo do processo de fotossíntese. O excesso de água à superfície da folha contribui para o aumento de doenças [21]; também atrasa o efeito de transpiração das plantas e potencia a pressão de turgescência nas folhas importante no processo de fotossíntese. Os sensores utilizados atualmente na medição da humidade à superfície da folha utilizam tecnologia resistiva, Figura 2.14(a), ou dielétrica, Figura 2.14(b). A tecnologia resistiva apresenta mais erro de medição face ao dielétrico, porém o seu custo é inferior.

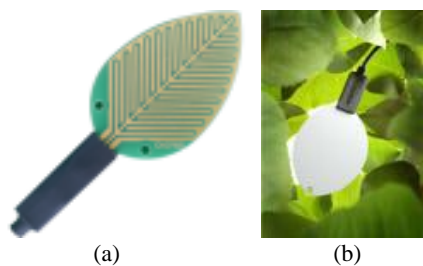


Figura 2.14 - Sensor de transpiração das folhas  
(a) Sensor resistivo; (b) Sensor capacitivo

### 2.5.12. Sensor Dendrómetro

Os dendrómetros são utilizados para medir o crescimento das plantas. Permitem identificar o nível de *stress* das plantas através da monitorização do seu crescimento. Existem sensores que estão em contacto direto com a planta e sensores sem contacto [22].

Nos sensores de contacto, Figura 2.15(a), a estrutura do sensor é suportada pelo tronco ou pelo caule da planta. O sensor é fixado mecanicamente e com o crescimento da planta a parte móvel do sensor sofre um deslocamento. Este deslocamento permite identificar o crescimento da planta.

Os sensores óticos, Figura 2.15(b), são os mais usuais na categoria dos sensores sem contacto. Estes projetam duas linhas paralelas na direção da planta, sendo que a distância entre as duas linhas determina a dimensão do tronco ou caule.

Os sensores mecânicos são significativamente mais baratos do que os sensores óticos, porém os seus níveis de precisão são incomparavelmente inferiores.

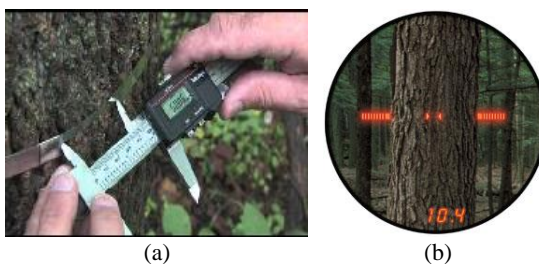


Figura 2.15 - Sensor dendrómetro  
(a) Sensor mecânico; (b) Sensor ótico

## 2.6. História das Redes de Sensores Sem Fios

As redes de sensores sem fios (WSN) são compostas por dispositivos ligados em rede, sem conexão galvânica. São dispositivos autónomos com a capacidade de recolher informação do meio que os envolve. A evolução das WSN poderá ser dividida em quatro espaços temporais: Período da Guerra Fria (década de 50), Projetos Avançados de Defesa (década de 80), Desenvolvimento de Projetos Militares (década de 80 e 90), Desenvolvimento Atual (século XXI) [23].

### 2.6.1. Período da Guerra Fria

Na década de 50 foi desenvolvido um projeto na área de vigilância oceânica que pretendia detetar a presença de navios soviéticos. O projeto *sound surveillance system* (SOSUS) utilizava uma rede de sensores acústicos colocados estrategicamente no fundo do oceano. Ao longo dos anos a evolução das redes de sensores acústicos foi-se acentuando, pelo que, atualmente, este projeto está a ser utilizado na monitorização da atividade animal e sísmica. Durante esta mesma época, foram desenvolvidas redes de radares para defesa aérea do território dos Estados Unidos da América e Canadá.

### 2.6.2. Projetos Avançados de Defesa

Na década de 80 a investigação sobre redes de sensores torna-se efetiva quando a *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) decide iniciar o projeto *Distributed Sensor Networks* (DSN) [24]. Nesta época a ARPAnet (antecessora da Internet) já operava há vários anos entre universidades e institutos de pesquisa. O seu inventor participou no projeto DSN e pretendia descobrir se a abordagem utilizada na ARPAnet poderia ser aplicada nas redes de sensores distribuídos. Pretendia-se que o sistema DSN tivesse uma arquitetura de baixo custo, fosse autónomo e tivesse capacidade

cooperativa (capacidade da rede para escolher qual o melhor nó para tratar a informação). Naquela época, pouca informação estava disponível, sendo que o desenvolvimento de ferramentas computacionais, técnicas de processamento de sinal e testes de validação foram desenvolvidos ao longo deste projeto. Na validação prática do projeto, foram utilizados sensores acústicos.

Também na década de 80, o *Advanced Decision Systems* (ADS) desenvolveu um algoritmo de múltiplas hipóteses que visava solucionar problemas relacionados com a procura. Este algoritmo de procura é ainda utilizado atualmente.

### **2.6.3. Desenvolvimento de Projetos Militares**

Na década de 80, as redes de sensores eram vistas por parte da área militar como uma tecnologia que trazia grandes vantagens, sendo que inúmeros projetos de carácter militar foram desenvolvidos. O projeto *Cooperative Engagement Capability* (CEC) foi um dos projetos desenvolvidos naquela época pela marinha dos EUA. O CEC é um sistema composto por hardware e software que permite a partilha de dados de radares e sistemas de armamento aéreo entre navios e aviões da marinha dos EUA.

Com um elevado número de organizações a investirem fortemente no desenvolvimento das redes de sensores para a área militar, é na década de 90 que esta tecnologia começa a surgir de forma massificada noutras áreas de aplicação.

### **2.6.4. Desenvolvimento Atual**

Os avanços da computação e comunicação feitos na década de 90 e nos inícios do século XXI permitiram o avanço tecnológico das redes sem fios.

O desenvolvimento de sensores e microprocessadores cada vez mais pequenos, com maiores capacidades e a um preço mais baixo, permitiu a expansão desta tecnologia. Pretende-se a breve prazo que este tipo de tecnologia possa ser descartável. Contudo, para tal, os custos totais associados a um nó sensor terão ainda que baixar.

Na Tabela 2.15 são apresentadas três gerações dos nós sensores.

Tabela 2.15 - Evolução dos nós sensores

	<b>Primeira Geração (1980 a 1990)</b>	<b>Segunda Geração (2000 a 2003)</b>	<b>Terceira Geração (2003 a 2015)</b>
<b>Tamanho</b>	Caixa de sapatos ou maior	Baralho de cartas	Grão de areia
<b>Peso</b>	Quilogramas	Gramas	Desprezável
<b>Arquitetura do Nó</b>	Processamento e comunicação separados	Processamento e comunicação integrada	Processamento e comunicação integrada
<b>Protocolos</b>	Proprietário	Proprietário	Wi-Fi, ZigBee, etc
<b>Topologia</b>	Ponto a ponto e estrela	Peer to peer	Peer to peer, estrela, árvore, malha.
<b>Alimentação</b>	Baterias de grandes dimensões	Baterias AA	Baterias de lítio, energia solar, energia eólica, etc
<b>Autonomia</b>	Horas, dias	Dias, semanas	Meses, anos

## 2.7. Introdução às Redes de Sensores Sem Fios

As redes de sensores sem fios (WSN) são compostas por inúmeros dispositivos que cooperam entre si. Estes dispositivos autónomos têm como principal objetivo a recolha de informação do meio que os rodeia. A informação recolhida é enviada para uma estação base que garante o processamento dos dados recebidos [25]. Geralmente os dados recebidos são mostrados em ambientes gráficos, fazendo com que a análise por parte do ser humano seja mais fácil.

São colocados alguns desafios no desenvolvimento de redes sem fios, tais como: tolerância a falhas, escalabilidade, custos de produção, requisitos de hardware, topologia, autonomia, meio de transmissão, segurança da rede [26].

### Tolerância a Falhas

O protocolo de *routing* deve ter a capacidade de encontrar caminhos alternativos disponíveis para que os dados possam ser transmitidos convenientemente. É fundamental que este algoritmo funcione de forma correta, visto que estes sistemas são muitas vezes instalados em locais de difícil acesso, sendo que a sua robustez e tolerância às falhas são extremamente importantes.

### Escalabilidade

A rede de sensores deverá ser projetada para agregar centenas ou milhares de nós sensores. É importante que o desempenho da rede se mantenha elevado mesmo que o número de nós sensores aumente consideravelmente.

### **Custos de Produção**

A utilização das redes de sensores sem fios é atualmente uma das áreas tecnológicas em maior expansão. Contudo, para que a expansão seja ainda maior é necessário que o custo de produção baixe. Este baixar de custo de produção fará com que os dispositivos sejam descartáveis.

### **Requisitos de Hardware**

As necessidades mínimas de um nó sensor são: sensor, unidade de processamento, unidade de comunicação sem fios e alimentação. Inúmeras funcionalidades poderão ser adicionadas aos nós sensores tais como: capacidade de atuar no meio envolvente, sistema de localização (GPS), entre outras. Todas estas funcionalidades deverão ser equacionadas em função do custo final do nó sensor, bem como da sua autonomia.

### **Protocolo MAC**

O protocolo MAC está diretamente ligado com a autonomia da rede de sensores sem fios.

### **Autonomia**

Normalmente os módulos são alimentados por baterias. O uso desta fonte de energia limita todo o sistema quanto à autonomia.

### **Meio de Transmissão**

As bandas ISM são definidas pelo (International Telecommunication Union-Radio) ITU-R. Estas bandas ISM são utilizadas na maioria das redes de sensores sem fios. Para além da comunicação rádio, é também possível comunicar sem fios através da tecnologia ótica (infravermelhos).

### **Segurança da Rede**

Ao contrário das redes cabladas, os dados das redes sem fios podem ser acedidos por um qualquer utilizador. Para que se consiga garantir a segurança dos dados na rede foram desenvolvidos algoritmos que encriptam os dados que circulam na rede [23].

## **2.8. Arquitetura das Redes de Sensores Sem Fios**

As redes de sensores sem fios (WSN) poderão ser separadas em duas áreas de estudo: hardware (Figura 2.16) e software (Figura 2.17) [23].

### **2.8.1. Hardware WSN**

Uma arquitetura de nó de hardware (Figura 2.16) típica para redes de sensores sem fios é normalmente composta por um processador de baixo consumo, por uma área de



armazenamento de dados, por um transmissor sem fios (*Transceiver*), por uma unidade de sensorização, e pela alimentação [23].

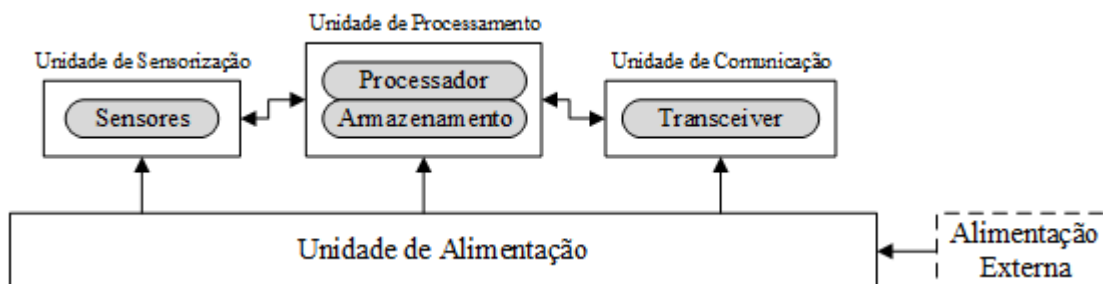


Figura 2.16 - Hardware nó sensor

### **Processador de Baixo Consumo**

Os processadores utilizados nestas redes têm a tarefa de processar informação do próprio nó e a informação de um possível nó sensor vizinho dessa mesma rede. A dimensão e desempenho destes processadores é limitada tendo em conta razões financeiras. Nestes processadores são colocados sistemas operativos muito leves que, entre outras, dispõem de técnicas avançadas para poupança de energia.

### **Armazenamento de Dados**

A memória de armazenamento pode ser dividida em duas partes: memória de código e memória de dados. Atualmente é possível encontrar no mercado uma inúmera quantidade de memórias do tipo *Flash* e memórias do tipo *Random Access Memory* (RAM). Apesar de o custo de produção das memórias ter vindo a diminuir, ainda é um aspeto a considerar na definição do sistema.

### **Transmissor Sem Fios**

As WSN caracterizam-se por ter uma baixa taxa de transmissão de dados e por comunicarem a médias distâncias. Os transmissores têm evoluído nos últimos anos a diferentes níveis, sendo que a redução de custo, a imunidade a ruídos, o alcance de transmissão, entre outras, são algumas das melhorias efetuadas.

O transmissor de dados é, na maioria dos casos, o componente que mais energia depende nas redes de sensores sem fios, pelo que a introdução de técnicas de poupança de energia é uma das preocupações atuais.

### **Unidade de Sensorização**

As redes de sensores sem fios normalmente só dão suporte a sensores com baixo volume de dados, por razões de autonomia. Os sensores podem utilizar interfaces analógicas ou digitais. No caso dos sensores analógicos, é necessária uma unidade para

converter estes dados em sinais digitais (ADC). Os sensores digitais normalmente disponibilizam um protocolo para aceder aos seus dados (I<sup>2</sup>C, SPI, UART, entre outros).

### **Alimentação**

Tipicamente os nós sensores são alimentados com recurso a baterias, contudo existem alguns nós que pela necessidade de estarem constantemente ligados utilizam energias renováveis ou estão permanentemente ligados (rede de energia elétrica).

A autonomia de uma bateria é a sua duração a um nível de corrente de carga especificada. Se uma bateria tiver 1000 mAh e a corrente média fornecida pela mesma for de 100 mA, terá à partida uma autonomia de 10 horas. Contudo, a duração das baterias não depende exclusivamente do consumo do circuito, pelo que a temperatura ambiente, humidade relativa, a forma como a energia é extraída, entre outros, são fatores que condicionam fortemente a autonomia.

Existem atualmente diferentes tecnologias de baterias no mercado [27]: *Nickel-Cadmium* (NiCd), alcalinas, *Nickel Metal Hydride* (NiMH) e lítio.

As baterias de *Nickel-Cadmium* (NiCd) são baterias muito utilizadas para nós de sensores e aplicações domésticas. Aceitam grandes descargas de energia sem que isso afete a sua autonomia, são tolerantes a um uso pouco regular e apresentam um custo elevado.

As baterias alcalinas são as mais utilizadas nas redes de sensores sem fios. Apesar de apresentarem um preço muito baixo, a autonomia destas baterias pode diminuir drasticamente quando picos de corrente são solicitados.

As baterias de *Nickel Metal Hydride* (NiMH) mantêm as características entre recargas. Sendo parecidas às alcalinas, são também mais pesadas e dispõem de menor capacidade de energia no mesmo espaço físico, porém funcionam melhor a baixas temperaturas.

Por último, as baterias de lítio têm atualmente a melhor relação entre dimensão e autonomia. Estas baterias caracterizam-se pela grande capacidade que têm no fornecimento de corrente, por apresentarem ótimos desempenhos numa gama de temperatura ampla, por terem peso e dimensões reduzidas e por apresentarem um custo médio a alto.

### **2.8.2. Software WSN**

Uma arquitetura de software (Figura 2.17) típica para redes de sensores sem fios pode ser dividida em cinco subsistemas [23]: sistema operativo, drivers dos sensores,

módulo de gestão de comunicações sem fios, drivers de comunicação sem fios e mini-aplicações.

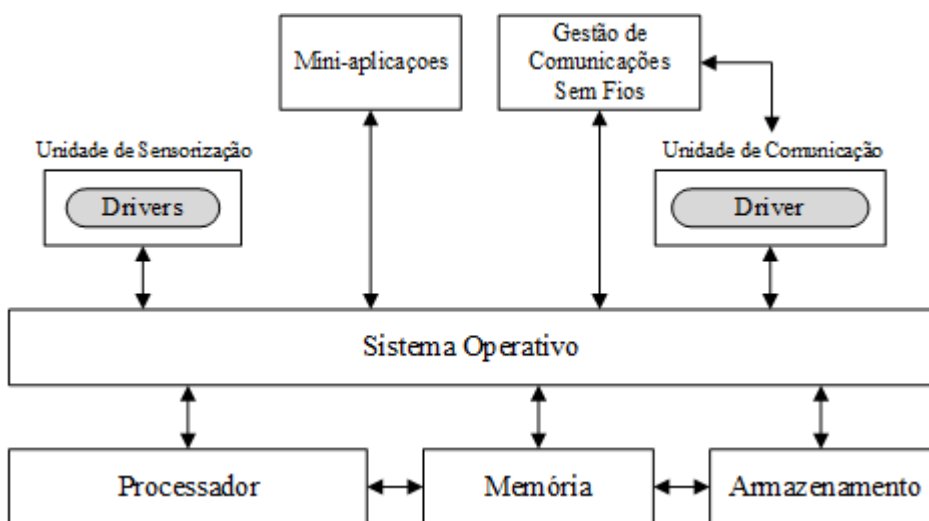


Figura 2.17 - Software nó sensor

### **Sistema Operativo**

O sistema operativo pode ser visto como a camada de *middleware*. Esta camada permite o acesso ao código de baixo nível (linguagem máquina, ao nível do processador), mas também dá suporte ao software de alto nível (nível do utilizador). Um exemplo de sistema operativo para aplicações de redes sem fios é o TinyOS.

### **Drivers dos Sensores**

São blocos de código que fazem a gestão da atividade dos sensores. Funções como ler, escrever, configurar, permitem um controlo ótimo do sensor.

### **Módulo de Gestão de Comunicações Sem Fios**

A gestão de todos os processos ligados à comunicação sem fios é feita por um módulo dedicado. Este módulo gere os processos de encaminhamento, dimensão dos pacotes, encriptação, entre outros.

### **Drivers de Comunicação**

O acesso ao canal de transmissão, tipo de encriptação, número de bits, potência de sinal, entre outros, estão disponíveis através de funções.

### **Mini-aplicações**

Aplicações muito básicas são permitidas dentro da rede sem fios tais como: processamento de dados, configurações do sistema, entre outros.

## 2.9. Normas IEEE para Redes Sem Fios

O IEEE definiu uma hierarquia de normas para redes sem fios, sendo que foram divididas em quatro estágios: *Wireless Personal Area Network* (WPAN), *Wireless Local Area Network* (WLAN), *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN) e *Wireless Wide Area Network* (WWAN) [28].

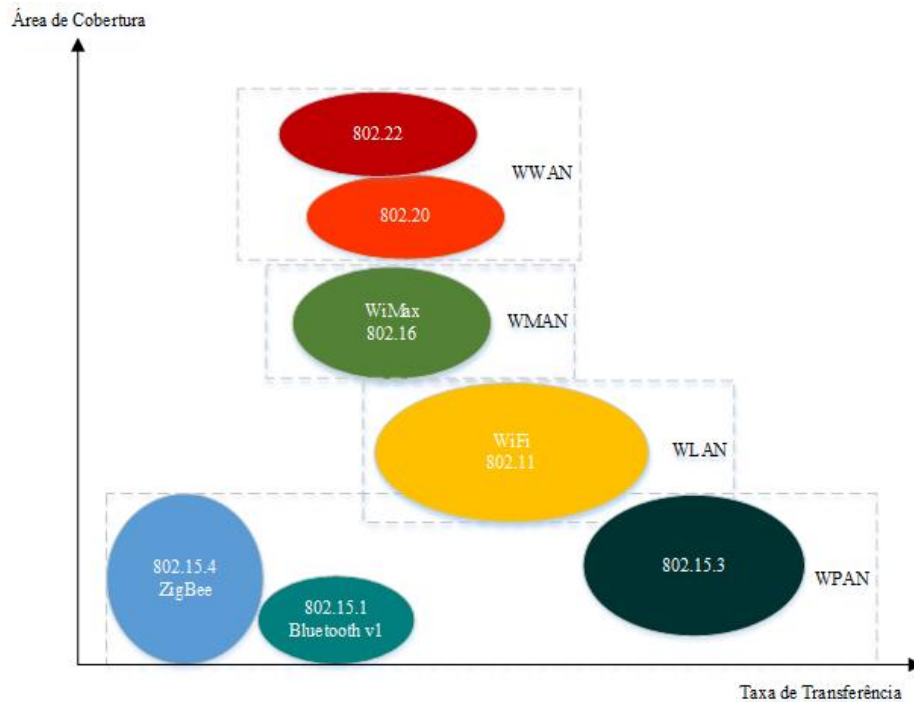


Figura 2.18 - Comparativo das normas IEEE

O tipo de rede WPAN tem como principais características o seu baixo consumo e o seu baixo custo. É um tipo de rede utilizado para fins pessoais e permite a conexão entre dispositivos próximos. Estão presentes neste tipo de rede as tecnologias Bluetooth e ZigBee. Cada uma delas segue uma norma IEEE diferente, sendo que o Bluetooth v1 segue a norma 802.15.1 e o ZigBee a norma 802.15.4. Note-se que o Bluetooth na versão 4 deixou de seguir a norma IEEE. Ainda dentro das redes WPAN existe a norma 802.15.3 que mantém as características das redes pessoais, mas que permite taxas de transferências muito elevadas, embora o seu consumo seja superior às tecnologias ZigBee e Bluetooth.

As WLAN seguem a norma IEEE 802.11 e foram inicialmente criadas para estabelecerem comunicação sem fios entre dois computadores. Caracterizam-se pelo seu médio consumo e por uma média a alta taxa de transferência. O sinal sem fios normalmente abrange uma área correspondente a uma casa, tem uma grande largura de banda e são estruturas com uma segurança assinalável.

As redes WMAN também conhecidas por *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) seguem a norma IEEE 802.16 e entram no segmento de banda larga. Têm como ideia principal disponibilizar o acesso sem fios a longas distâncias para empresas, residências, entre outros. A redução do custo de infraestruturas secundárias e de mão-de-obra são as principais vantagens desta rede. Caracterizam-se por ter uma taxa de transferência média e por permitir centenas de utilizadores ligados em rede.

As WWAN utilizam as infraestruturas das redes de telecomunicações móveis, pelo que abrangem grandes áreas geográficas. Foi criada a norma IEEE 802.20 com o objetivo de normalizar o *Mobile Broadband Wireless Access* (MBWA).

## 2.10. Evolução das Plataformas WSN

Inúmeras plataformas de nós sensores genéricos foram desenvolvidas desde o início do século XXI. A Universidade de Berkeley foi das principais impulsionadoras no desenvolvimento de nós sensores genéricos, sendo que muito do conhecimento obtido através de projetos universitários foi utilizado por diversas empresas. A família de nós sensores TelosB/Tmote Sky foi desenvolvida em Berkeley e atualmente esta família de plataformas é comercializada pela CrossBow Technology [29]. Esta empresa tem ainda em comercialização as plataformas pertencentes à família Mica2/MicaZ e a Iris, que tem por base as plataformas Mica, mas com melhorias na distância de comunicação. O SunSPOT pertence à empresa Sun Microsystems, tendo a particularidade de ser uma plataforma, quer em software, quer em hardware do tipo *open source*.

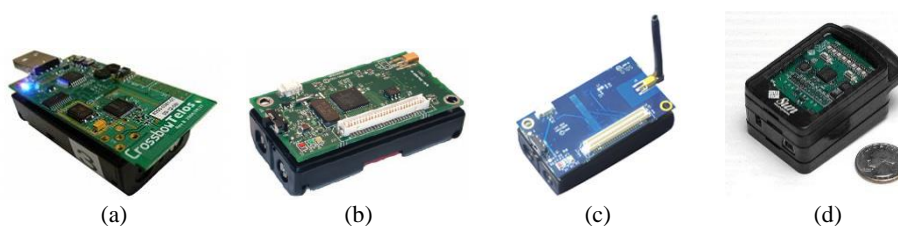


Figura 2.19 - Plataformas WSN  
(a) Telos; (b) Mica2; (c) Iris; (d) SunSPOT

Tabela 2.16 - Características Nós Sensores

Plataforma	Telos	Mica2	Iris	SunSpot
CPU	TI MSP430F1611	Atmel Atmega 128L	Atmel Atmega 1281	Atmel AT91RM9200
Relógio (MHz)	4-8	8	8	180
RAM/Flash	10K/48K	4K/128K	8K/640K	512K/4M
Transceiver	TI CC2420	TI CC1000	Atmel AT86RF230	TI CC2420
Taxa de Transferência (kbps)	250	38,4	250	250
Frequência (MHz)	2400	900	2400	2400
Consumo Transceiver (Sleep/Rx/Tx)	426 uA/18,8 mA/ 17,4 mA	0,2 uA/7,4 mA/ 10,4 mA	20 nA/15 mA/ 16,5 mA	426 uA/18,8 mA/ 17,4 mA
Sensores	Humidade, Temperatura, Luminosidade	Possível através de placa extensora	Possível através de placa extensora	Acelerómetro, Temperatura, Luminosidade
Alimentação	2xAA	2xAA	2xAA	Lítio 3,7 V, 750 mAh recarregável
Sistema Operativo	TinyOS	TinyOS	TinyOS	Squawk VM (Java)
Ano Lançamento	2004	2002	2007	2005

A evolução dos processadores para este propósito está muito baseada na gestão de energia (*sleep mode*, *hibernate mode*, entre outros). Apesar de atualmente existirem processadores com frequências de 200 MHz, o caminho das redes de sensores é outro. Com frequências elevadas, o consumo de energia dos nós sensores é maior e o preço do processador também. A tendência atual é desenvolver nós sensores com um processador a funcionar com uma frequência baixa, conseguindo baixos consumos e baixos preços.

Ao nível dos transmissores sem fios, a preocupação constante por diminuir o consumo de energia, imunidade a ruídos e construção de transmissores com tecnologias Bluetooth, ZigBee e WiFi no mesmo chip, tem sido o caminho seguido pelas grandes marcas.

## 2.11. Aplicações de Redes Sem Fios na Agricultura

Nesta secção serão apresentados alguns projetos desenvolvidos para ambientes agrícolas utilizando as redes sem fios. A seleção adequada de sensores para análise do ambiente a estudar, bem como a tecnologia dos nós sensores serão abordados na maioria dos projetos abaixo apresentados.

### 2.11.1. Greenhouse Environment Monitoring System

Para que se pudesse conhecer melhor o microclima da zona norte da China, onde foi construída uma estufa para produção de tomate, foi desenvolvido um projeto de *Wireless Sensor Networks* [30]. A diminuição dos consumos dos nós, a diminuição da complexidade do sistema desenvolvido por via da redução das cabelagens entre outros e o acesso remoto às informações da estufa foram os principais objetivos do sistema desenvolvido.

A arquitetura usada no projeto da WSN, (Figura 2.20), é constituída por módulos sem fios que fazem a aquisição das variáveis a controlar. Estes, depois de adquirirem os dados do ambiente em que estão inseridos, enviam a informação para o *gateway* correspondente. O *gateway* pode ou não comunicar com os diferentes nós que constituem o sistema. Para este projeto foram recolhidos dados de sensores de temperatura/humidade ambiente (SHT15), temperatura/humidade do solo (SHT10P), intensidade luminosa (S1087) e de um sensor que mede a concentração de dióxido de carbono (C20E).



Figura 2.20 - Arquitetura da rede GEMS [30]

Conseguiu-se com este projeto monitorizar dados em diferentes pontos da estufa de uma forma satisfatória e ter acesso a todos estes dados remotamente. O preço final de cada módulo sensor rondou os 150 €, conseguindo-se uma redução de quase metade do preço para produtos concorrentes disponíveis em mercado.

### 2.11.2. The Inov@Douro Model

Com o intuito de aumentar a competitividade e a precisão, com que se desenvolve a agricultura na região demarcada do Douro, foi desenvolvido um projeto que pretende obter melhorias no plano da produção vitivinícola e no plano turístico [31]. Por serem

zonas extensas de áreas vinícolas e por as mesmas se localizarem num tipo de relevo acidentado, o desenvolvimento deste projeto torna-se ainda mais exigente. Pretende-se observar ou monitorizar dados que interferem no desenvolvimento das produções vinícolas. Para tal, serão usados sensores de temperatura, humidade e câmaras. O visionamento em tempo real irá permitir ao agricultor detetar pragas existentes na cultura.

A arquitetura de rede (Figura 2.21) desenvolvida para este propósito é composta por um centro de operações, módulos remotos (WSN), uma Cluster Head e por acesso à rede sem fios para o agricultor (intranet) ou para fins turísticos.

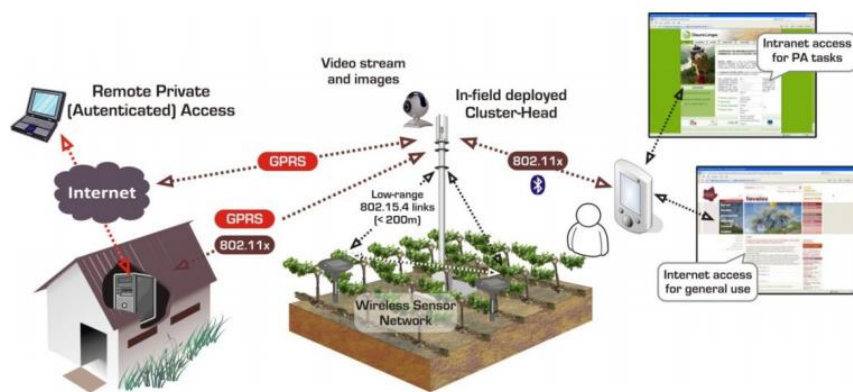


Figura 2.21 - Arquitetura da rede Inov@Douro [31]

O centro de operações é composto por uma base de dados e por uma aplicação computacional ligada à Internet. Esta base de dados é composta por toda a informação adquirida pelos módulos remotos e por regras que são impostas à Cluster Head. Esta, por sua vez é responsável por juntar todos os componentes da arquitetura da rede. É na Cluster Head que é feita a coordenação da WSN. A informação a enviar para o centro de operações é previamente tratada na Cluster Head. Por fim, o acesso remoto à Cluster Head é possível através de um qualquer dispositivo com acesso a redes sem fios. As informações que são possíveis visualizar por parte do agricultor podem ou não ser manipuladas por forma a alterar regras do sistema.

### 2.11.3. Greenhouse Micro Climate Monitoring Based On WSN with Smart Irrigation Technique

Este projeto pretende adquirir, monitorizar e controlar culturas agrícolas que estão inseridas em estufas. Por serem espaços de dimensões consideráveis, a cablagem de um sistema deste tipo torna-se complexa e em muitos casos impossível. Com a utilização de redes sem fios WSN, este tipo de projetos passam a ser possíveis. O sensor de temperatura e humidade selecionado foi o DHT22 [32]. Foi também utilizado o sensor EC-5 para



adquirir dados relativos à humidade do solo. Para a comunicação sem fios, foi utilizado um módulo XBee. O sistema é composto por dois tipos de nós: o primeiro tipo adquire dados do sistema e o segundo tipo permite atuar o sistema. Foi utilizada a topologia em estrela entre os diferentes nós. Apenas existe um nó atuador que é responsável por controlar as válvulas da rega, bem como por iniciar e gerir o tráfego da rede. Os nós de aquisição de dados foram colocados dentro da estufa para medirem diferentes pontos da cultura. Estes nós são responsáveis por ler e enviar os dados adquiridos até ao nó atuador.

#### ***2.11.4. Wireless Sensor Network-Based Greenhouse Environment Monitoring and Automatic Control System for Dew Condensation Prevention***

O excesso de condensação no topo das estufas potencia a formação de fungos que são prejudiciais ao desenvolvimento das culturas [11]. Na tentativa de resolver este problema, surge este projeto que tem por base a utilização de redes sem fios. O fenómeno de condensação surge quando a temperatura de ponto de orvalho é superior à temperatura da cultura.

Na Figura 2.22 é possível visualizar a arquitetura utilizada para a realização do projeto de controlo de condensação nas estufas. O sistema é composto por nós sensores que são responsáveis por recolher os dados da temperatura da folha, da humidade e temperatura do ar. Os dados recolhidos são enviados sem fios para a estação base. Na estação base, os dados correspondentes a cada nó sensor são enviados através de comunicação série para o *Environment Server*. Este, é responsável por gerir todo o sistema, sendo que os dados provenientes do nó relé são processados e enviados de volta os sinais de decisão e controlo. O nó relé é responsável pela atuação do sistema, permitindo ligar ou desligar dispositivos tais como: janelas, ventiladores ou mesmo a caldeira de aquecimento. É desta forma que se consegue controlar o ponto de condensação ao nível das folhas. Toda esta informação pode ainda ser consultada através de um qualquer dispositivo com ligação sem fios.

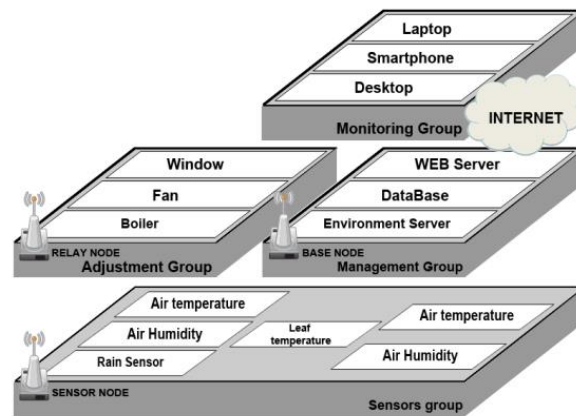


Figura 2.22 - Arquitetura de rede *Dew Condensation Prevention* [11]

## 2.12. Conclusão

Ao longo deste capítulo, para além do estado da arte relativo à agricultura, foram identificadas tecnologias que ajudam a potenciar esta atividade. Foram também apresentados quatro projetos de redes sem fios aplicados à agricultura. É comum em todos os projetos a utilização de tecnologia para melhorar e potenciar aspetos relativos à agricultura. Contudo, o projeto *Inov@Douro* tem a particularidade de utilizar a rede sem fios não só para a monitorização dos processos agrícolas, mas também para o propósito turístico.

# CAPÍTULO 3

## Especificações do Sistema

O protótipo industrial que se pretende construir e comercializar a breve prazo vai permitir a monitorização de variáveis do ambiente (temperatura, radiação solar, humidade relativa, velocidade e orientação do vento, precipitação e dióxido de carbono) e a monitorização de variáveis do meio de cultivo (temperatura, condutividade, humidade, concentração de iões de hidrogénio). A Figura 3.1 ilustra a arquitetura do protótipo industrial. É utilizada uma rede de sensores sem fios que fica encarregue de enviar os dados adquiridos pelos nós sensores até ao destino (nó central). Estes nós sensores, distribuídos ao longo da cultura, recolhem informação de diferentes pontos. Os nós sensores são autónomos, mas limitados pela capacidade da bateria. Como as culturas agrícolas são realizadas em áreas extensas, a comunicação direta entre os nós sensores e o nó central é muitas vezes impossível. Sendo assim, a arquitetura desenvolvida para este protótipo industrial pressupõe a utilização de nós extensores de sinal. Estes nós estão permanentemente ligados e têm um alcance de sinal superior à dos nós sensores. O nó central é responsável por receber informação dos nós extensores ou dos nós sensores. O nó central está ligado a um computador que recebe os dados dos diferentes nós que compõem o sistema. O computador tem um software que permite visualizar a evolução das variáveis lidas por cada um dos nós.

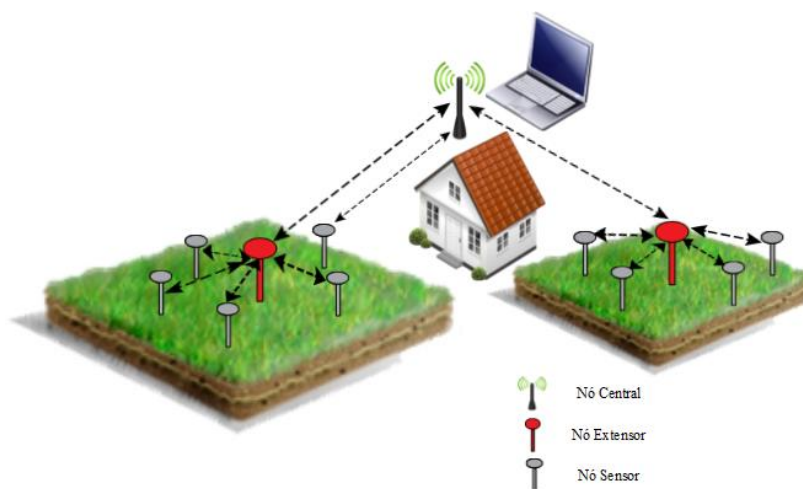


Figura 3.1 - Arquitetura do protótipo industrial

Sendo impossível realizar a totalidade deste sistema em tempo de dissertação, optei por desenvolver uma rede de sensores composta por dois nós. Um nó sensor e um nó central. Foram utilizados os sensores de temperatura, humidade e condutividade para adquirir informação do meio de cultivo. Apenas foram estudados os sensores de monitorização do meio de cultivo por apresentarem uma maior dificuldade de estudo e de o seu preço poder condicionar a futura comercialização deste protótipo. Por último, foi desenvolvido um software que permite guardar e visualizar a informação das variáveis de temperatura, humidade e condutividade do nó sensor.

Neste capítulo são identificados os requisitos do sistema. É também selecionada a tecnologia sem fios e feito um estudo detalhado sobre a mesma. São ainda realizados estudos de mercado para a plataforma de desenvolvimento sem fios e para os sensores de temperatura, humidade e condutividade.

### 3.1. Requisitos do Sistema

No projeto de dissertação decidi endereçar os seguintes requisitos do sistema final a desenvolver:

- Cada nó sensor deve ser capaz de adquirir informação de pelo menos um dos seguintes sensores:
  - Temperatura;
  - Humidade;
  - Condutividade.

Estes sensores deverão ser utilizados quer em agricultura desenvolvida em solo, quer em culturas hidropónicas.

- Os sensores deverão estar em contato permanente com o meio de cultivo (substrato ou solução nutritiva).
- Os nós sensores devem ser de fácil instalação.
- Os módulos remotos deverão ter autonomia igual ou superior a 1 ano.
- O sistema sem fios seguirá as regulamentações do *Industrial, Scientific and Medical* (ISM)
- O sistema sem fios deve conseguir comunicar num raio de 20 metros.
- O software computacional deve permitir a visualização da evolução temporal de cada uma das variáveis lidas pelos módulos remotos.
- Os componentes escolhidos para o sistema deverão ter em consideração fatores como o preço, suporte técnico, longevidade, entre outros.

### 3.2. Seleção da Tecnologia da Rede Sem Fios

As redes sem fios podem ser agrupadas em quatro tipos (tal como pode ser consultado no capítulo anterior): WPAN, WLAN, WMAN e WWAN.

Apesar de as redes WPAN (802.15) terem as melhores prestações de consumo e custo face aos restantes tipos de redes, foi também analisado a norma 802.11 pertencente às WLAN.

Tabela 3.1 - Comparativo das tecnologias sem fios ZigBee, Bluetooth e WiFi

	<b>ZigBee (802.15.4)</b>	<b>Bluetooth (802.15.1)</b>	<b>WiFi (802.11b)</b>	<b>Requisitos</b>
<u>Bandas de Frequência</u>	2400 MHz	2400 a 2483,5 MHz	2,4GHz e 5 GHz	6 MHz a 5875 MHz
<u>Taxa de Transferência</u>	250 kbps	1 Mbps	300 Mbps	1kbps
<u>Consumos</u>	Tx > 30 mA Standby < 10 uA	Tx > 400 mA Standby < 200 uA	Tx > 400 mA Standby < 2000 uA	Autonomia superior a 1 ano
<u>Pilha Protocolar</u>	32 Kb	250 Kb	1 Mb	
<u>Tipos de ligação de rede</u>	<i>Star, Mesh, Tree</i>	<i>Star</i>	<i>Star</i>	
<u>Número máximo de nós</u>	65000	7	32	
<u>Vantagens</u>	Consumo, número de nós, custo	Tecnologia presente em inúmeros dispositivos	Tecnologia presente em inúmeros dispositivos	
<u>Desvantagens</u>	Inexistência da tecnologia em dispositivos standard	Número de nós (1 <i>master</i> para 7 <i>slaves</i> )	Consumo elevado, número de nós	
<u>Principais Aplicações</u>	Monitorização e controlo	Substituição de comunicação via cabo	Transmissão de vídeo e áudio	
<u>Alcance da transmissão</u>	+ 100 metros	10 metros	+ 100 metros	+ 20 metros

Tendo por base a Tabela 3.1 em que são comparadas as tecnologias ZigBee, Bluetooth e WiFi, facilmente se entende que a tecnologia que melhor se adapta a este sistema é a ZigBee.

Pela imposição relativa à distância de transmissão fixada em 50 metros, a tecnologia Bluetooth fica excluída. A tecnologia WiFi apresenta consumos médios dez vezes superiores à tecnologia ZigBee. Esta condição iria obrigar à escolha de uma bateria com dez vezes mais capacidade do que a bateria necessária para a tecnologia ZigBee. Aumentar a capacidade de autonomia de um nó implicaria aumentar o seu custo, dimensão e peso, pelo que a tecnologia ZigBee é a que melhor se adapta a todos os requisitos deste sistema.

### 3.3. ZigBee

Após ter sido definida a tecnologia sem fios para o desenvolvimento deste projeto, interessa agora detalhar a tecnologia ZigBee. Também conhecida por *Low Rate Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN), esta tecnologia segue a norma 802.15.4, que se caracteriza pelo seu baixo consumo, baixa complexidade e baixa taxa de transferência de dados.

A tecnologia ZigBee foi criada pela organização ZigBee Alliance. Esta, conta com centenas de membros empresariais com valências na indústria de semicondutores, desenvolvimento de software, entre outros [33]. A ZigBee Alliance foi formada em 2002 como organização sem fins lucrativos, porém a tecnologia ZigBee só é apresentada ao público em 2005.

Atualmente a tecnologia ZigBee é utilizada em diversas áreas:

- Sistemas de segurança (camaras de vigilância, sensores de movimento, entre outros);
- Sistemas de rega;
- Controlo de temperatura, luminosidade;
- Videojogos (comandos remotos);
- Sistemas de gestão de energia;
- Sistemas de localização;
- Sistemas ligados à saúde (batimento cardíaco, pressão sanguínea, entre outros).

#### 3.3.1. Características ZigBee

A tecnologia ZigBee possui algumas características que a distingue dos seus mais diretos concorrentes [34]. As principais características são:

- Comunicação com taxas de transferência de 250 kbps;
- Frequência de operação: 2,4 GHz (Global), 868 MHz (Europa), 915 MHz (EUA);
- Diferentes topologias de rede: estrela (*star*), malha (*mesh*), árvore (*tree*);
- Possui técnicas para redução dos consumos de energia;
- Possui funcionalidades como: *Link Quality Indication* (LQI), *Energy Detection* (ED) e *Carrier Sense* (CS);
- Possibilidade de ter mais de 65000 nós ligados em rede;
- Possui mecanismos de deteção de erros;

- Garante segurança de dados através de algoritmos de encriptação (AES 128 bits);
- Garante interoperabilidade entre dispositivos (capacidade de comunicarem entre dispositivos de fabricantes diferentes);
- A arquitetura ZigBee, baseada na norma IEEE 802.15.4, proporciona um baixo custo de produto, implementações rápidas e garante robustez no produto desenvolvido;
- Permite dois tipos de dispositivos físicos: *Full Function Device* (FFD) e *Reduced Function Device* (RFD);
- Possui três tipos de dispositivos lógicos: coordenador, *router* e *end-device*;
- Permite dois modos de operação de rede: *beacon enabled* e *non-beacon enabled*.

### 3.3.2. Relação da Tecnologia ZigBee com a Norma IEEE 802.15.4

O conceito de camadas de rede (*networking layers*) é muito utilizado no desenvolvimento de sistemas de comunicação, com ou sem fios. Cada camada é responsável por gerir uma determinada parte relativa à rede. A divisão em diferentes camadas proporciona algumas vantagens, tais como:

- Quando um protocolo é alterado apenas a camada relativa a essa alteração é modificada;
- Quando se pretende desenvolver uma aplicação, o isolamento entre as camadas protocolares e aplicacionais estão garantidas.

O protocolo ZigBee é baseado no modelo *Open Systems Interconnection* (OSI) que é composto por sete camadas. Contudo, o protocolo ZigBee apenas usa as camadas necessárias para implementar as suas funcionalidades [33]. As duas primeiras camadas, Figura 3.2, camada física (PHY) e camada de acesso ao meio (MAC), são definidas pela norma IEEE 802.15.4. As camadas de rede (NWK) e a camada aplicacional (APL) são definidas pela norma ZigBee. As questões relacionadas com a segurança da rede são asseguradas por estas duas últimas camadas. A comunicação entre as diferentes camadas é realizada através de pontos de acesso SAPs (*Service Access Points*).

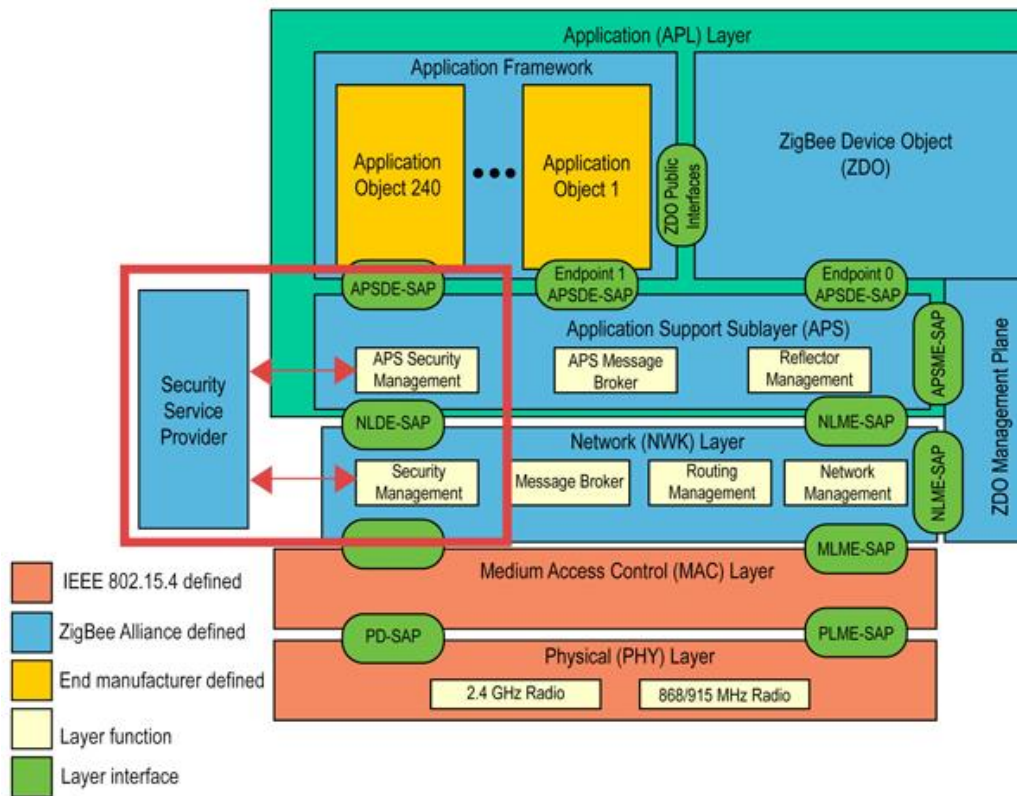


Figura 3.2 - Arquitetura ZigBee [35]

### 3.3.3. Camada Física (Physical Layer)

A camada física (PHY) é a primeira camada, Figura 3.2, da norma IEEE 802.15.4. É também a camada mais próxima do hardware, pelo que os acessos aos dados do *transceiver* são garantidos por esta camada.

A seleção da frequência do canal de transmissão e a verificação do estado (livre ou ocupado) do canal de frequência, por nós da mesma rede, são também asseguradas pela camada física.

Para além destas características, a camada física é também responsável pelos seguintes serviços:

- Detecção de energia do recetor;
- Qualidade da ligação;

#### **Bandas Atribuídas**

A norma IEEE 802.15.4 opera em três bandas ISM. A frequência 868 MHz, destinada à Europa, a frequência 915 MHz, pertencente aos EUA, e a frequência 2,4 GHz, com utilização mundial, são as frequências disponibilizadas nas bandas ISM [34].

Para a banda 868 MHz apenas foi atribuído um canal com débito até 20 kbps. Por ter a frequência mais baixa das três referenciadas, este canal é o que menos perdas por



atenuação tem, conseguindo garantir uma maior área de cobertura. Para a banda 915 MHz estão disponíveis 10 canais com débito máximo de 40 kbps. Por último, a banda mundial 2,4 GHz possui 16 canais com um débito de 250 kbps.

Tabela 3.2 - Comparativo de bandas de frequência ZigBee

Banda de Frequência (MHz)	Modulação	Taxa de Transferência (Kbps)	Número de canais	Licenciamento
868 – 868,6	BPSK	20	1	Europa
902 - 928	BPSK	40	10	EUA
2400 – 2483,5	O-QPSK	250	16	Global

### **Métodos de Modulação**

Existem dois métodos de modulação associados à norma IEEE 802.15.4, são eles: *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) e *Orthogonal-Quadrature Phase Shift Keying* (OQPSK). Os dois métodos utilizam a modulação de sinal em fase.

A modulação BPSK utiliza a fase da portadora para enviar a informação do sinal digital que pretende transmitir. Utiliza apenas um bit por símbolo, que pode transitar entre os valores binários zero e um. Quando há uma transição ascendente ou descendente do bit a onda portadora sofre uma alteração de fase de 180 graus.

A técnica de modulação QPSK é similar à BPSK, porém são utilizados parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para modular o sinal. Para tal, são utilizados dois bits por símbolo, ao invés de 1 bit por símbolo. Este incremento do número de bits permite aumentar o débito em duas vezes. Em contrapartida, a margem de erro para recuperação do sinal diminui na mesma proporção.

A utilização da técnica *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) permite reduzir a potência do sinal e confere maior robustez ao sistema. Esta técnica de modulação de espalhamento espectral utiliza o sinal original e espalha-o num espectro de frequências maior. Após o espalhamento espectral, o sinal é modulado numa portadora.

### **Detecção de Energia do Recetor**

Este método é utilizado pela camada de rede para seleccionar o canal que se encontra em melhores condições para a transmissão e recepção da mensagem. O resultado do *Energie Detection* (ED) é composto por 8 bits, sendo normalmente representado em numeração hexadecimal numa gama compreendida entre 0x00 a 0xFF. Sinais fracos, por apresentarem níveis de energia muito próximos do nível de sensibilidade do recetor, podem não ser detetados. A norma IEEE 802.15.4 requer leituras de ED a valores superiores em 10 dB ao valor de sensibilidade do recetor. Quer dizer que se o recetor tiver

uma sensibilidade de -90 dBm, a detecção de energia deverá funcionar a partir dos -80 dBm. Tipicamente a gama de medição ED tem uma amplitude de 40 dB, pelo que neste exemplo a gama de leituras estaria compreendida entre -40 dBm a -80 dBm.

### **Carrier Sense (CS)**

É um método similar ao ED e que permite verificar a disponibilidade de um determinado canal. Para transmitir uma mensagem o dispositivo passa para o modo recetor permitindo-lhe detetar a presença de sinais correspondentes ao canal de frequência escolhido. Nesta técnica o canal só é considerado ocupado após a detecção de um sinal com a modulação e características de propagação da norma IEEE 802.15.4.

### **Qualidade da Ligação (LQI)**

O *Link Quality Indicator* (LQI) permite identificar a qualidade e intensidade de sinal de um pacote recebido. A implementação da qualidade da ligação pode ser conseguida à custa da técnica ED e através de uma estimativa da relação entre sinal e ruído.

A medição LQI deve ser realizada para cada pacote recebido e comunicado à camada superior (MAC). Os valores de LQI estão compreendidos entre 0x00 a 0xFF, em que o valor decimal zero corresponde a uma ligação fraca e o valor 255 a uma ligação de alta qualidade.

### **Verificação de Canal Livre**

O *Clear Channel Assessment* (CCA) é um mecanismo que permite detetar canais disponíveis. Este mecanismo pode operar das seguintes formas:

- CCA 1 (Modo ED) - neste modo o valor lido de ED serve como referência. Se o nível de energia for superior ao limiar de ED (definido pelo fabricante), então o canal é considerado ocupado.
- CCA 2 (Modo CS) – usa a técnica CS e o canal só é considerado ocupado após a detecção de um sinal com a modulação e características de propagação da norma IEEE 802.15.4.
- CCA 3 (Modo ED e Modo CS) – Esta técnica utiliza a combinação do primeiro com o segundo modo. O canal só é considerado ocupado quando o nível de energia é superior ao limiar de ED e quando é detetado um sinal com a modulação e características de propagação da norma IEEE 802.15.4.

### **3.3.4. Camada de Acesso ao Meio (MAC layer)**

A camada de acesso ao meio (MAC) (Figura 3.2) garante a interface entre a camada física (PHY) e a camada de rede (NWK). Esta camada é responsável por:

- Garantir suporte para as diferentes topologias de rede e diferentes tipos de dispositivos;
- Gerar tramas beacon;
- Utilizar mecanismos de prevenção de colisões com base no protocolo *Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance* (CSMA-CA);
- Gerir os canais de acesso *Guaranteed Time Slot* (GTS);
- Garantir uma ligação confiável entre duas entidades MAC;
- Gerir a associação e dissociação de dispositivos;
- Garantir suporte de segurança, apesar de as camadas superiores determinarem o nível de segurança da rede.

### **Tipos de Dispositivos e Funções**

A norma IEEE 802.15.4 distingue os seus dispositivos com base na complexidade e capacidade de hardware. Existem duas classes para dispositivos físicos associados a esta norma: *Full-Function Device* (FFD) e *Reduced-Function Device* (RFD).

Os dispositivos físicos FFD podem representar todas as funções na rede. Podem comunicar com qualquer dispositivo presente na rede e dispõem de recursos de hardware capazes de suportar todas as funcionalidades e características exigidas por esta classe.

Os dispositivos físicos RFD dispõem de recursos mais limitados, com vista à diminuição do custo do dispositivo. Ao contrário dos FFD, que podem comunicar com qualquer dispositivo presente na rede, os RFD apenas podem comunicar com dispositivos FFD.

É com base nos dispositivos físicos que os dispositivos lógicos são definidos. Existem três tipos de dispositivos lógicos disponíveis no ZigBee: coordenador, *router* e *end-device*. Estes dispositivos lógicos são distinguidos tendo em conta as capacidades físicas e a função que assumem na rede. A Tabela 3.3 ilustra as possíveis combinações de associação entre os diferentes dispositivos.

Tabela 3.3 - Tipos de dispositivos ZigBee

<b>Dispositivos Físicos</b>	<b>Dispositivos Lógicos</b>		
	<u>Coordenador</u>	<u>Router</u>	<u>End-Device</u>
<u>FFD</u>	Sim	Sim	Sim
<u>RFD</u>	Não	Não	Sim

O coordenador pertence à classe de dispositivos físicos FFD e é responsável pela criação e controlo da rede. Só poderá existir um único coordenador na rede e deverá estar

em permanente execução. O coordenador também é responsável por guardar informação da rede e de ter disponível em memória as chaves de segurança da rede.

O *router*, tal como o coordenador, pertence à classe de dispositivos físicos FFD. A sua principal função é o encaminhamento de mensagens de dispositivos de rede que estejam fora do alcance do coordenador. Para além desta função, estes dispositivos também podem controlar e monitorizar variáveis físicas. Dependendo do tipo de sistema que se pretende implementar, estes dispositivos podem ou não estar em permanente execução.

O *end-device* pertence à classe de dispositivos físicos RFD e são destinados ao controlo e monitorização de variáveis físicas. Estes dispositivos apenas podem comunicar com dispositivos FFD (*router* e coordenador). Dispõem de sistemas de gestão de energia e o seu tempo de funcionamento em rede é reduzido.

### **Topologias de Rede**

Tendo por base os dispositivos lógicos do ZigBee, as redes sem fios podem ser organizadas de três formas diferentes: estrela (*star*), malha (*mesh*) e árvore (*tree*). Cada uma destas estruturas podem estar mais ou menos centralizadas, podem ser mais ou menos robustas e mais ou menos dispendiosas. Na Figura 3.3 é possível observar cada uma das topologias de rede. De seguida serão descritas e identificadas vantagens para cada uma das topologias de rede.

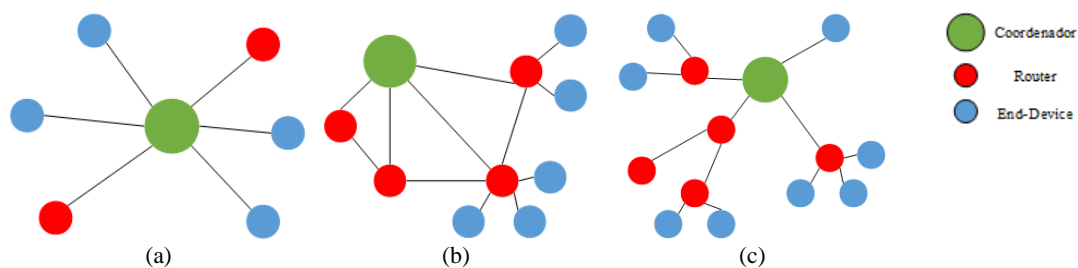


Figura 3.3 - Topologias de rede  
(a) Estrela; (b) Malha; (c) Árvore

Nas redes configuradas em estrela existe um dispositivo central (coordenador) responsável por controlar e gerir toda a rede. Poderão existir *routers* e *end-devices* nesta configuração de rede, contudo as ligações entre dispositivos são sempre diretas para o coordenador. As vantagens são ao nível do custo da rede, simplicidade de rede e baixa latência de dados. Nas configurações em malha todos os nós FFD (coordenador e *routers*) comunicam entre si por forma a enviarem a mensagem ao destino. Esta técnica é muito usada para aumentar a área de cobertura da rede, isto é, como o nós comunicam entre si

podem enviar a mensagem de um nó vizinho que esteja fora do raio de alcance do coordenador. As vantagens são ao nível da escalabilidade e aumento da área de cobertura. A configuração em árvore é semelhante à configuração em malha, porém segue-se uma lógica hierárquica para o encaminhamento da mensagem. O coordenador comunica com os *routers* e estes por sua vez com os *end-devices*. Nesta topologia os *routers* apenas servem para encaminhar mensagens. As vantagens comparativamente à topologia em malha são ao nível da latência, redução de custos e redução dos consumos energéticos do nó.

### **Mecanismo de Prevenção de Colisões (CSMA-CA)**

A norma IEEE 802.15.4 implementa um método que garante a transmissão de dados de vários dispositivos que partilham o mesmo canal de transmissão. O mecanismo de acesso ao canal utilizado é o *Carrier Sense Multiple Access*, que também possui um mecanismo de controlo de colisões *Collision Avoidance*. Quando um dispositivo pretende transmitir dados, primeiro faz uma verificação de canal livre (CCA). Caso o canal esteja livre o dispositivo começa a transmitir o sinal. Caso o mesmo esteja ocupado, o dispositivo entra em *back-off* durante um período de tempo, sendo que volta a verificar a disponibilidade do canal (CCA) findo esse período de tempo.

### **Modos de Operação (Beacon)**

As tramas *Beacon* enviadas periodicamente pelo coordenador garantem a sincronização do relógio do coordenador com os restantes nós da rede. Este modo poderá estar ligado (*modo beacon enabled*) ou desligado (*modo non-beacon enabled*).

Em modo *beacon enabled* o coordenador envia uma trama periódica. Este modo é tipicamente usado quando o nó coordenador utiliza bateria. As desvantagens do uso deste modo estão associados ao consumo de energia. Assim sendo, os nós da rede acordam periodicamente apenas para receberem as tramas *beacon* enviadas pelo coordenador. Neste modo, o consumo de energia da rede de sensores é tipicamente superior ao modo *non-beacon*.

No modo *non-beacon* o coordenador está sempre acordado, pelo que deverá ter uma alimentação permanente (ligado à rede de energia). Neste modo, os dispositivos sensores acordam em intervalos de tempo previamente programados apenas para enviar os dados adquiridos.

### **3.3.5. Camada de Rede (NWK layer)**

A camada de rede (NWK) faz a interligação da camada de acesso ao meio (MAC) com a camada aplicacional (APL) Figura 3.2. Esta camada é responsável pela gestão da

rede e pelos processos de descoberta. O processo de roteamento ou descoberta é responsável por selecionar o caminho pelo qual determinada mensagem vai ser transmitida. Os dispositivos lógicos coordenador e *router* são os responsáveis por descobrir e gerir os caminhos das mensagens.

Esta camada é também responsável pela manutenção da topologia de rede (*mesh*, *star*, *tree*) e por aplicar a camada de segurança.

### 3.3.6. Camada Aplicacional (APL layer)

A camada aplicacional (APL) é a última camada do protocolo ZigBee. Esta camada é composta por três partes (Figura 3.2): *Application Support* (APS), *ZigBee Device Objects* (ZDO) e *Application Framework*.

O APS é responsável por interligar a camada NWK com a camada APL através de pontos de acesso SAPs. O APS é responsável pela manutenção das tabelas de encaminhamento e pelo encaminhamento de mensagens entre os dispositivos ativos.

O ZDO contém as funcionalidades aplicacionais mais comuns do protocolo ZigBee. É responsável por definir o tipo de dispositivo de rede (coordenador, *router* ou *end-device*) e garante uma relação segura entre os diferentes dispositivos.

A *Application Framework* é responsável por alojar os objetos aplicacionais disponibilizados pelos fabricantes. Estes objetos permitem o controlo e gestão das camadas protocolares.

### 3.3.7. Segurança

As mensagens enviadas por uma rede sem fios podem ser interceptadas por intrusos. Existem algumas preocupações neste domínio, sendo a confidencialidade dos dados e a alteração das mensagens em trânsito as mais frequentes.

Para tentar combater o acesso aos dados confidenciais por parte de intrusos, a encriptação das mensagens antes da transmissão é uma das técnicas utilizadas. Os algoritmos de encriptação das mensagens utilizam uma chave de segurança que é utilizada no lado do recetor para descodificar a mensagem. A norma IEEE 802.15.4 suporta o uso de *Advanced Encryption Standard* (AES).

Apesar de as mensagens estarem encriptadas, um intruso pode modificar e reenviar as mensagens em trânsito. Para tentar combater este problema é utilizado um Código de Integridade de Mensagem (MIC). Este código é associado a todas as mensagens enviadas e apenas emissor e recetor conhecem o método.

Apesar de o protocolo ZigBee possuir algumas técnicas que lhe garantem segurança, estes dispositivos foram concebidos para aplicações de baixo consumo e baixo custo. Por conseguinte, a implementação de técnicas mais avançadas para este propósito ficam condicionadas pelos recursos limitados que estes sistemas possuem.

### 3.4. Seleção da Plataforma ZigBee

Após ter sido definida a tecnologia para o desenvolvimento deste projeto tendo em conta os requisitos do sistema, interessa agora selecionar uma plataforma com a tecnologia ZigBee. Existem diferentes plataformas disponíveis para venda, sendo que podem ser separadas em dois tipos: plataformas ZigBee *transceiver* (Tabela 3.4) e plataformas ZigBee solução integrada (Tabela 3.5).

As plataformas ZigBee *transceiver* caracterizam-se por ter apenas um *chip transceiver* que é responsável pela comunicação sem fios. O acesso aos dados do *transceiver* é normalmente possível através dos periféricos SPI ou UART.

Nas plataformas ZigBee solução integrada, o microcontrolador e o *transceiver* podem estar no mesmo *chip* ou então em *chips* separados, mas sempre na mesma plataforma de desenvolvimento.

Tabela 3.4 - Plataformas ZigBee *transceiver*

	<b>ATZB- RF-233-1- CR</b>	<b>MRF24J40 MD</b>	<b>MRF24J40 MA</b>	<b>XBee ZB SMT</b>	<b>XB24- Z7WIT-004</b>
<i>Manufacturer</i>	Atmel	Microchip	Microchip	Digi	Digi
<i>Packaging</i>	Solder Board	Solder Board	Solder Board	Solder Board	DIP
<i>Transceiver Name</i>	AT86RF233	MRF24J40	MRF24J40	X	X
<i>Transceiver Price</i>	4,81€	2,79€	2,79€	X	X
<i>Antenna</i>	Chip antenna	Design	Design	Design	Wire
<i>Range (m)</i>	2000	1200	120	1200	120
<i>Frequency Band</i>	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
<i>Data Rate</i>	250 kb/s	250 kb/s	250 kb/s	250 kb/s	250 kb/s
<i>Operating Voltage</i>	1,8 V to 3,6 V	3 V to 3,6 V	3 V to 3,6 V	2,1 V to 3,6 V	2,1 V to 3,6 V
<i>Interface</i>	SPI	SPI	SPI	UART, SPI	UART
<i>Rx Mode</i>	7.5 mA	32 mA	19 mA	28 mA	38 mA
<i>Tx Mode</i>	157 mA	140 mA	23 mA	33 mA	35 mA
<i>Sleep Mode</i>	0.7 uA	10 uA	2 uA	1 uA	1 uA
<i>End of Life</i>	No	No	No	No	No
<i>Plataform Price</i>	21,37€	15,93€	7,79€	19,99€	20,29€



Tabela 3.5 - Plataformas ZigBee solução integrada

	<b>ATZB-24-A2R</b>	<b>ATZB-A24-UFLR</b>	<b>ATZB-256RFR2-XPRO</b>	<b>CC2530EMK</b>
<u>Manufacturer</u>	Atmel	Atmel	Atmel	Texas Instruments
<u>Packaging</u>	Solder Board	Solder Board	Dip	Specific Connector
<u>Transceiver Name</u>	AT86RF230	AT86RF230	ATmega256RFR2	CC2530F128
<u>Transciever Price</u>	EOL	EOL	7,63€	6,28€
<u>uController</u>	Atmega1281	Atmega1281	ATmega256RFR2	8051
<u>uController Price</u>	11€	11€	7,63	1€
<u>Antenna</u>	Design	External	Chip Antenna	2,4 GHz Antenna
<u>Range (m)</u>	X	4000	570	1000
<u>Frequency Band</u>	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
<u>Data Rate</u>	250 kb/s	250 kb/s	250 kb/s	250 kb/s
<u>Operating Voltage</u>	1,8 V to 3,6 V	1,8 V to 3,6 V	1,8 V to 3,6 V	2 V to 3,6 V
<u>Peripherals</u>	USART, ADC, IO, 1wire, I2C	USART, ADC, IO, 1wire, I2C	USART, SPI, ADC, IO, PWM	USART, SPI, ADC, IO, PWM
<u>Rx Mode</u>	21,8 mA	23 mA	9,6 mA	24 mA
<u>Tx Mode</u>	20,8 mA	50 mA	16,4 mA	29 mA
<u>Sleep Mode</u>	6 uA	6 uA	0,6 uA	0,4 uA
<u>End of Life</u>	Yes	Yes	No	No
<u>Platform Price</u>	23,01€	30,99€	29,08€	156,97€

Através dos estudos realizados (Tabela 3.4 e Tabela 3.5) é possível verificar que inúmeras soluções poderiam ser equacionadas para a escolha final da plataforma de desenvolvimento. Foram estudadas plataformas dos seguintes fabricantes: Atmel, Microchip, Texas Instruments e Digi International.

Na Tabela 3.4 são apresentadas soluções com *chip transceiver* sem microcontrolador. Tratando-se de um sistema que implica leitura de variáveis tais como: temperatura, humidade e condutividade, a utilização de um microcontrolador para fazer a gestão dos sensores, bem como das tramas do *chip transceiver*, é fundamental.

Na Tabela 3.5 são propostas soluções integradas de *chip transceiver* com microcontrolador. É também possível verificar que os dois primeiros campos estão descontinuados, pelo que, como se pretende dar continuidade a este projeto, estas duas

propostas ficam excluídas. Ainda no sentido de dar continuidade ao desenvolvimento do projeto, o preço do chip é também um fator com relevância para esta escolha.

Sendo que as soluções integradas apresentam um ótimo compromisso entre preço de plataforma, preço do chip, facilidade de integração e redução dos tempos de desenvolvimento, as soluções ZigBee *Transceiver* ficam excluídas da seleção final. Por conseguinte, serão consideradas as plataformas da Atmel ATZB-256RFR2-XPRO e Texas Instruments CC2530EMK. Ambos os fabricantes disponibilizam bibliotecas de *firmware* livre para o desenvolvimento e aceleração dos projetos de redes sem fios. Os consumos, os periféricos disponibilizados e a distância de comunicação são muito similares nas duas plataformas. A plataforma CC2530EMK apresenta uma solução de mercado composta por dois módulos sem fios a um custo de 156,97€. A proposta da Atmel é mais vantajosa, sendo que o custo de dois módulos é de aproximadamente 60€.

Sendo assim, a plataforma Atmel ATZB-256RFR2-XPRO (Figura 3.4) revelou, mediante um conjunto de fatores, ser a melhor aposta para o desenvolvimento da presente dissertação e de ao mesmo tempo dar garantias para a continuação do projeto.



Figura 3.4 – Plataforma Atmel ATZB-256RFR2-XPRO

### 3.5. Seleção dos Sensores

Para a realização deste sistema foram definidos alguns requisitos e objetivos mínimos relativos à escolha dos sensores. De acordo com os requisitos, o sistema a implementar deverá ser capaz de ler três tipos de variáveis físicas: temperatura, condutividade e humidade. De seguida serão estudadas diferentes tecnologias para cada variável física e selecionado o respetivo sensor.

#### 3.5.1. Sensor de Temperatura

Existem diferentes tipos de sensores de temperatura, sendo que a Tabela 3.6 estabelece uma comparação entre o termistor, RTD, termopar e semicondutor. Por apresentar custos elevados, os sensores do tipo termopar não serão equacionados para a seleção do sensor de temperatura. Pode-se ainda concluir, mediante este estudo, que o sensor do tipo semicondutor é a opção que reúne as melhores características para este sistema.

Tabela 3.6 - Comparativo de sensores de temperatura

	<b>Termístor</b>	<b>RTD</b>	<b>Termopar</b>	<b>Semicondutor</b>
<u>Temperatura</u>	-55°C a 125°C	-200°C a 850°C	-600°C a 2000°C	-50°C a 150°C
<u>Linearidade</u>	Exponencial	Média	Média	Alta
<u>Sensibilidade</u>	Alta	Baixa	Média	Excelente
<u>Resposta</u>	Alta	Baixa	Muito Baixa	Baixa
<u>Estabilidade</u>	Baixa	Alta	Alta	Média
<u>Auto-Aquecimento</u>	Sim	Sim	Não	Sim
<u>Custo</u>	Baixo	Baixo	Médio/Alto	Baixo/Médio

Existem no mercado inúmeras soluções de sensores para a medição da variável física temperatura. Apesar disso, a seleção deste sensor respeitou os seguintes requisitos: encapsulamento, consumo de energia e custos. A Tabela 3.7 mostra um estudo realizado entre três sensores dos fabricantes Decagon, Maxim e Vegetronix.

Tabela 3.7 - Estudo de sensores de temperatura

	<b>RT-1</b>	<b>DS18B20</b>	<b>Therm 200</b>
<u>Fabricante</u>	Decagon	Maxim	Vegetronix
<u>Temperatura Precisão</u>	5°C a 40°C ± 0,5°C	-10°C a 85°C ±0,5°C	±0,5°C
<u>Temperatura Resolução</u>	0,1°C	0,1°C	0,125°C
<u>Gama de Temperatura</u>	-40°C a 80°C	-55°C a 125°C	-40°C a 80°C
<u>Tecnologia de Sensor</u>	Termístor	Semicondutor	Termístor
<u>Alimentação</u>	X	3 V a 5,5 V	3,3 V a 20 V
<u>Consumo</u>	X	1,5 mA a 4 mA	3 mA
<u>Comunicação</u>	X	1Wire	ADC
<u>Preço</u>	46,6€	10,89€	30€

Foram apenas encontradas soluções de mercado para os sensores do tipo termístor e semicondutor. Os sensores do tipo termístor (RT-1 e Therm 200) apresentam características similares, contudo o custo do RT-1 é superior ao Therm 200 em 15€. O DS18B20 é do tipo semicondutor e apresenta características iguais ou superiores às do sensor Therm 200. O preço servirá como fator de desempate na seleção final do sensor de temperatura. Por conseguinte, o sensor DS18B20 que apresenta um custo de 10,89€ será o sensor de temperatura utilizado para o desenvolvimento deste sistema.

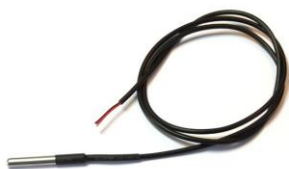


Figura 3.5 - Sensor de temperatura DS18B20

### 3.5.2. Sensor de Condutividade

Existem as técnicas direta e indireta para a medição da condutividade elétrica. Apenas foram estudadas soluções de medição direta, visto que as soluções que utilizam o princípio do eletromagnetismo (medição indireta), não são orientadas para a medição de condutividade elétrica em soluções nutritivas. Para além disso, o custo e os consumos energéticos deste tipo de sensores não se coadunam com este sistema. Na Tabela 3.8 é apresentado um estudo de mercado de três sensores das empresas Decagon e Spectrum. Como é possível verificar, os sensores estudados, para além das leituras de condutividade, também realizam leituras de humidade e temperatura. Desta forma e com apenas um único sensor, conseguem-se cobrir todos os requisitos impostos ao nível da leitura das variáveis físicas.

Tabela 3.8 - Estudo de sensores de condutividade

	<b>5TE</b>	<b>GS3</b>	<b>WaterScout Smec 300</b>
<u>Fabricante</u>	Decagon	Decagon	Spectrum
<u>Precisão</u>	10%	10%	±10%
<u>Resolução</u>	0.001 dS/m desde 0 a 7 dS/m e 0.05 dS/m desde 7 dS/m até 23 dS/m	0.001 dS/m desde 0 até 25 dS/m	0.01 dS/m desde 0 até 10 dS/m
<u>Gama de Medida</u>	0 a 23 dS/m	0 a 25 dS/m	0 a 10 dS/m
<u>Medição</u>	Temperatura, Humidade e Condutividade	Temperatura, Humidade e Condutividade	Temperatura, Humidade e Condutividade
<u>Alimentação</u>	3,6 V a 15 V	3,6 V a 15 V	3 V a 6 V
<u>Consumo</u>	10 mA	25 mA	10 mA
<u>Frequência</u>	70 MHz	70 MHz	80 MHz
<u>Comunicação</u>	RS232, SDI-12	RS232, SDI-12	ADC
<u>Preço</u>	200€	500€	200€

A escolha do sensor recaiu sobre o 5TE, do fabricante Decagon, por apresentar uma ampla gama de medida de condutividade, pelo seu custo e pelos seus modos de comunicação.



Figura 3.6 - Sensor 5TE

### 3.5.3. Sensor de Humidade

Existem dois tipos de tecnologias para a medição da humidade (solo ou soluções nutritivas). As tecnologias (resistiva e capacitiva) referentes ao sensor de humidade são abordadas em maior detalhe no capítulo anterior. Foram estudadas soluções de mercado Tabela 3.9, dos fabricantes Decagon, Spectrum, Vegetronix, Tindie e DFRobot. Apesar da seleção anterior já englobar um sensor de humidade, o estudo de mercado foi ainda assim realizado.

Tabela 3.9 - Estudo de sensores de humidade

	EC-5	WaterScout	VH400	I2C Soil Moisture	Immersion Gold
<u>Fabricante</u>	Decagon	Spectrum	Vegetronix	Tindie	DFRobot
<u>Precisão</u>	±3%	±3%	±2%	X	X
<u>Resolução</u>	0,1%	0,1%	0,1%	X	X
<u>Gama de Medida</u>	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%	X	X
<u>Tecnologia de Sensor</u>	Capacitivo	Capacitivo	Capacitivo	Capacitivo	Resistivo
<u>Alimentação</u>	2,5 V a 3,6 V	3 V a 5 V	3,3 V a 20 V	3 V a 5 V	3,3 V to 5 V
<u>Consumo</u>	10 mA	10 mA	7 mA	X	35 mA
<u>Frequência</u>	70 MHz	80 MHz	80 MHz	X	dc
<u>Comunicação</u>	ADC	ADC	ADC	I2C	ADC
<u>Preço</u>	123€	100€	32€	15€	5€

Os sensores resistivos têm uma rápida degradação devido à oxidação do material utilizado para o revestimento do cobre. A utilização de frequências elevadas na leitura da

humidade reduz o efeito dos sais minerais. O sensor da Vegetronix é o que reúne as melhores características ao preço mais baixo, sendo que seria a melhor opção deste estudo.



Figura 3.7 - Sensor de humidade VH400

### 3.6. Seleção da Bateria

A bateria selecionada para este sistema pertence ao fabricante *Saft Batteries*. É uma bateria de lítio não-recarregável. Tem uma tensão de 3,6 V e uma capacidade de 2600 mAh. A corrente debitada em modo contínuo não deve ultrapassar os 50 mA. A sua gama de temperatura ampla permite-lhe operar entre -60 °C a 80 °C. Tem um tamanho reduzido (50 mm x 17,5 mm) e um peso aproximado de 17 gramas. O custo da bateria é de aproximadamente 5€.



Figura 3.8 - Bateria Saft 14500

### 3.7. Seleção do Encapsulamento dos Nós

Os nós estão expostos ao clima, pelo que é necessário alojar os componentes eletrónicos numa caixa que garanta um correto encapsulamento.

A *International Electrotechnical Commission* (IEC) estabeleceu um sistema de classificação de invólucros de sistemas eletrónicos com diferentes graus IP. A identificação do grau IP é feita através de dois dígitos. O primeiro dígito é referente ao grau de proteção contra contatos acidentais e corpos estranhos. O segundo dígito é referente ao grau de proteção contra água. Na Tabela 3.10 é possível verificar os diferentes graus de proteção IP.

Tabela 3.10 - Grau de proteção IP

Grau de proteção IP XY			
1º dígito (X)	Descrição	2º dígito (Y)	Descrição
1	Proteção contra objetos sólidos com mais de 50 mm	1	Proteção contra gotas de água
2	Proteção contra objetos sólidos com mais de 12 mm	2	Proteção contra gotas de água com a inclinação de 15 graus
3	Proteção contra objetos sólidos com mais de 2,5 mm	3	Proteção contra gotas de água com a inclinação de 60 graus
4	Proteção contra objetos sólidos com mais de 1 mm	4	Proteção contra água projetada em qualquer direção
5	Proteção contra poeira	5	Proteção contra jatos de água (bico de 6,3 mm)
6	Hermética contra poeira	6	Proteção contra jatos de água (bico de 12,5 mm)
6	Hermética contra poeira	7	Proteção contra imersão temporária
6	Hermética contra poeira	8	Proteção contra imersão prolongada

Para o nó sensor foi selecionada uma caixa IP 65 (hermética contra poeira e proteção contra jatos de água), com as dimensões de 120x120x60 mm. Para o nó central foi selecionada uma caixa IP 54 (proteção contra poeira, proteção contra água projetada em qualquer direção), com as dimensões de 90x90x50 mm. O custo da caixa para o nó sensor foi de 1,54€ e o custo da caixa para o nó central foi de 0,85€.

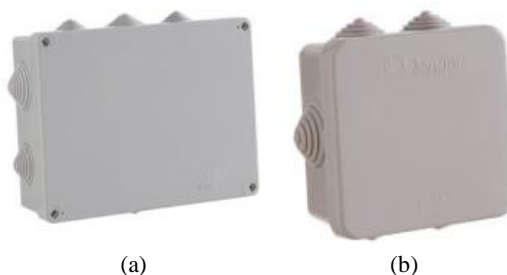


Figura 3.9 - Encapsulamento dos nós  
(a) Caixa nó sensor; (b) Caixa nó central

### 3.8. Conclusão

Neste capítulo foram definidas as linhas gerais para o desenvolvimento deste sistema. Foi selecionada a plataforma sem fios (Atmel ATZB-256RFR2-XPRO) para a implementação da WSN e foram selecionados os sensores DS18B20 e o 5TE. Este protótipo de WSN será composto por um nó sensor com funções de *end-device* e por um nó central com funções de coordenador. O nó sensor fará a recolha das variáveis de

temperatura, condutividade e humidade do meio de cultivo através do sensor 5TE. Visto que o sensor de temperatura DS18B20 revelou ser um ótima solução, quer para leitura de temperatura em solo, quer para leitura da temperatura ambiente, foi também estudado e integrado no sistema. Desta feita, decidi implementar a monitorização da temperatura ambiente no nó central. Sendo assim, o nó central para além de receber os dados sem fios do nó sensor, terá também o papel de monitorizar a temperatura ambiente.



# CAPÍTULO 4

## Implementação

Este capítulo está dividido em três áreas: hardware, *firmware* e software. Na área de hardware são apresentados os diferentes componentes eletrónicos e a forma como os mesmos estão interligados nos nós sensor e central. Na área de *firmware* é apresentado o código relativo à implementação de uma rede WSN. Por último, na área de software é apresentada a interface gráfica desenvolvida em linguagem de programação C++.

### 4.1. Hardware

Nesta secção são apresentados os diferentes componentes eletrónicos utilizados na implementação deste sistema. É também realizada a integração dos diferentes componentes eletrónicos no nó sensor e no nó central. Por último, são apresentados os encapsulamentos relativos aos nós sensor e central.

#### 4.1.1. Plataforma Sem Fios Atmel ATZB-256RFR2-XPRO

A plataforma Atmel ATZB-256RFR2-XPRO (Figura 4.1(b)) é composta pelo módulo ATZB-S1-256-3-0-C (Figura 4.1(a)) e por uma *Evaluation Board*.

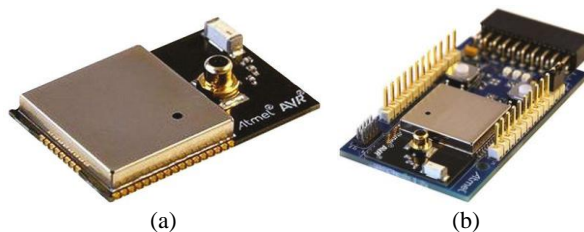


Figura 4.1 - Plataforma e módulo da Atmel  
(a) ATZB-S1-256-3-0-C; (b) ATZB-256RFR2-XPRO

O módulo possui um *System On Chip* (SOC) ATmega256RFR2 [36], uma antena e um conector de teste do sinal rádio. O SOC é composto por um microcontrolador de 8 bits e por um *transceiver* que funciona na frequência de 2,4 GHz [37].

As principais características do microcontrolador são:

- 8 bits e arquitetura RISC;
- 256 KB de memória de código, 32 KB memória de dados e 8 KB EEPROM;
- I/O: PWM, ADC, SPI, I<sup>2</sup>C, UART, JTAG;
- Baixo consumo, dimensão reduzida.

As principais características do *transceiver* são:

- Banda de frequência 2,4 GHz, taxa de transferência 250 kbps;
- Transmissor e recetor integrados no *transceiver*;
- Baixo consumo, dimensão reduzida.

O SOC permite tensões de 1,8 V a 3,6 V, tendo o *ground* como referência. Utiliza dois cristais externos de 16 MHz e 32,768 kHz Com o microcontrolador e *transceiver* a funcionar a 16 MHz o SOC tem os seguintes consumos de energia:

- Modo *deep sleep*: 700 nA;
- Modo ativo: 4,1 mA;
- Modo TX: 18,6 mA;
- Modo RX 16,6 mA.

Os diferentes módulos e funcionalidades que compõem a arquitetura interna do SOC ATmega256RFR2 são ilustrados na Figura 4.2.

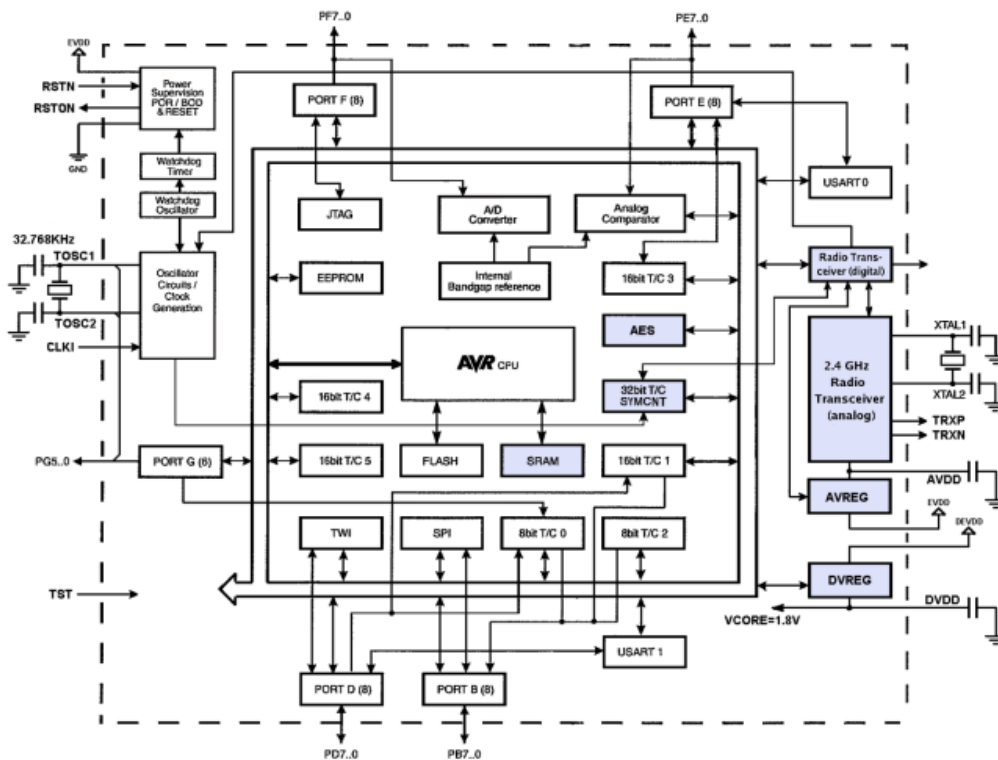


Figura 4.2 ATmega256RFR2 Arquitetura [38]

Para além do módulo, esta plataforma tem conectores que garantem a interface com algumas funcionalidades do microcontrolador (Figura 4.3). Estão também assemblados no mesmo PCB três LEDs e dois botões. O botão SW1 tem a função de *reset* e o botão SW2 está ligado a uma entrada digital.

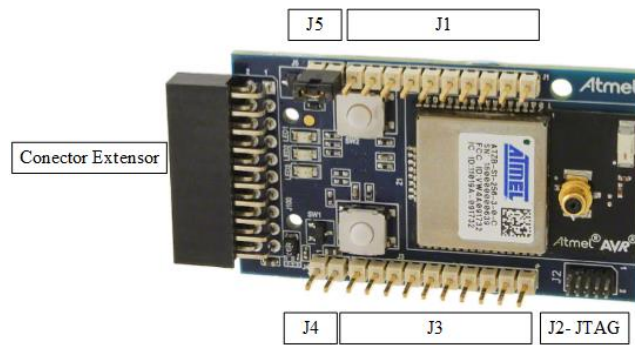


Figura 4.3 - Plataforma Atmel ATZB-256RFR2-XPRO

A plataforma ATZB-256RFR2-XPRO garante o acesso a algumas funcionalidades do microcontrolador através dos conectores J1 e J3 [39].

Tabela 4.1 - Pinout Plataforma ATmega J1 e J3  
(a) Conector J1; (b) Conector J3

Pino	Função	Pino ATmega	Pino	Função	Pino ATmega
J1-1	PE2/XCK0/AIN0	48	J3-1	PF0/ADC0	63
J1-2	PE3/OC3A/AIN1	49	J3-2	PF1/ADC1	64
J1-3	PD2/RXD1/INT2	27	J3-3	PF2/ADC2/DIG2	1
J1-4	PD3/TXD1/INT3	28	J3-4	PF3/ADC3/DIG4	2
J1-5	PD5/XCK1	30	J3-5	AREF	62
J1-6	PD4/ICP1	29	J3-6	PE1/TXD0	47
J1-7	PD6/T1	31	J3-7	PE0/RXD0/PCINT8	46
J1-8	PG2/AMR	16	J3-8	PB7/OC0A/OC1C/PCINT7	43
J1-9	PB4/OC2A/PCINT4	40	J3-9	PG5/OC0B	19
J1-10	PB6/OC1B/PCINT6	42	J3-10	PE7/ICP3/INT7/CLKO	53

(a)

(b)

O conector J4 é destinado à alimentação da plataforma. O pino J4-1 corresponde à parte positiva da alimentação (+3,3 V) e o pino J4-2 ao *Ground*.

O conector J5 é utilizado para fazer medições de corrente no circuito, pelo que existe um *jumper* que garante a abertura ou fecho do circuito. Quando o *jumper* está inserido o circuito está fechado e em normal funcionamento. Quando o *jumper* é removido o circuito é aberto e poderá ser aplicado um equipamento amperimétrico entre os dois terminais do conector J5.

O conector J2-JTAG utiliza a configuração padrão deste tipo de comunicação (Tabela 4.2). Esta interface permite, entre outras, efetuar *debug on board* e programar o microcontrolador.

Tabela 4.2 - Conector JTAG

Pino	Função
J2-1	GPIO/JTAG_TCK
J2-2	GND
J2-3	GPIO/JTAG_TDO
J2-4	VCC_3,3 V
J2-5	GPIO/JTAG_TMS
J2-6	RESET
J2-7	NC
J2-8	NC
J2-9	GPIO/JTAG_TDI
J2-10	GND

Para além dos conectores acima referenciados, esta plataforma possui ainda um conector extensor (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Conector extensor

Pino	Função	Pino ATmega	Pino	Função	Pino ATmega
1	ID		11	PD1	26
2	GND		12	PD0	25
3	NC		13	PD3/TXD1	28
4	NC		14	PD2/RXD1	27
5	PE3	49	15	PB0	36
6	NC		16	PB2	38
7	RSTN	12	17	PB3	39
8	CLKI	33	18	PB1	37
9	PD7	32	19	GND	
10	PE4/INT4	50	20	VCC	

### 4.1.2. Sensor de Temperatura DS18B20

O sensor DS18B20 é um *chip* de medição de temperatura desenvolvido pelo fabricante Maxim. Este sensor efetua medições de temperatura na gama de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$  e com precisão de  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [40]. A tensão de alimentação varia entre  $+3\text{ V}$  a  $+5,5\text{ V}$  e a corrente máxima é de  $4\text{ mA}$ . O protocolo de comunicação é o 1Wire. Contudo, o Atmega256RFR2 não dispõem desse protocolo, pelo que foi necessário desenvolver uma biblioteca para interagir com o sensor. O desenvolvimento da biblioteca 1Wire será detalhado na fase de implementação de *firmware*. O sensor adquirido (Figura 4.4(b)) tem no seu interior o chip da Maxim (Figura 4.4(a)). São apenas disponibilizados 2 pinos referentes à alimentação (Vdd e GND) e um pino para os dados (Data ou DQ).

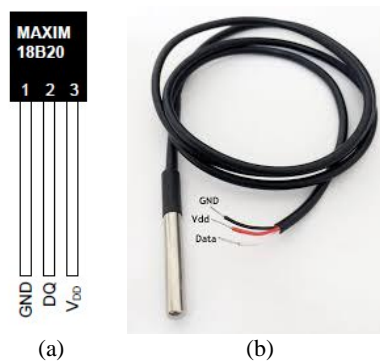


Figura 4.4 - Sensor de temperatura DS18B20  
(a) *Chip pinout*; (b) Encapsulamento

### 4.1.3. Sensor 5TE

O sensor 5TE do fabricante Decagon permite a leitura das variáveis de temperatura, condutividade e humidade (Figura 4.5(a)). A tensão de alimentação pode variar entre  $3,6\text{ V}$  a  $15\text{ V}$  [41]. O consumo máximo do sensor é de  $10\text{ mA}$ . Possui dois modos de comunicação: o DDI Serial e o SDI-12. Foi utilizada a comunicação DDI Serial que apenas permite a comunicação de dados num único sentido (sensor para microcontrolador). A conexão do sensor realiza-se por um *jack stereo* de  $3,5\text{ mm}$  [42]. O *pinout* do *jack* pode ser visualizado na Figura 4.5(b).

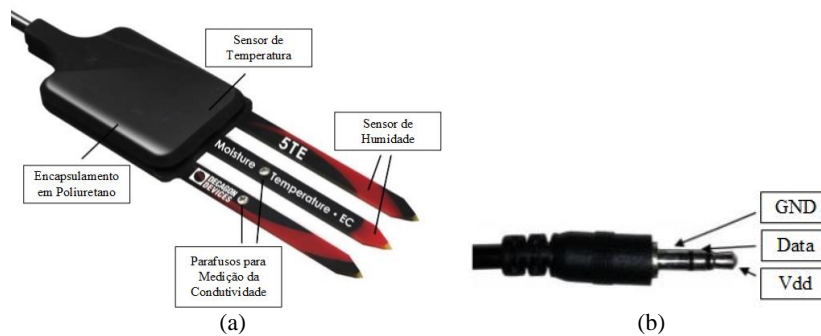


Figura 4.5 - Sensor 5TE  
(a) Descrição; (b) Pinout 5TE

#### 4.1.4. Conversor USB para comunicação série

O conversor USB para comunicação série (UART) utilizado foi o FTDI 232. Este chip possui um *buffer* de entrada de 128 bytes e um *buffer* de saída de 256 bytes [43]. A comunicação série pode ser configurada com 7 ou 8 bits, 1 ou 2 bits de paragem e com ou sem paridade. A cada chip é atribuído um código de identificação único. É tipicamente alimentado pela tensão +5 V proveniente da porta USB. A tensão de entrada pode variar entre os valores +3,3 V e +5,5 V e a corrente em modo ativo é de 15 mA. O chip possui ainda um regulador de tensão de +3,3 V com uma corrente máxima de saída de 50 mA.

Os níveis de tensão dos sinais da comunicação série podem ser de +3,3 V e +5 V. Foi selecionado o valor de +3,3 V.

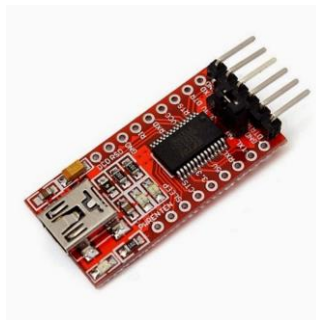


Figura 4.6 - FTDI232

#### 4.1.5. Nó Sensor

O nó sensor é composto por uma bateria, por uma plataforma Atmel ATZB-256RFR2-XPRO, por um sensor 5TE e por um elevador de tensão para +5 V (Figura 4.7).

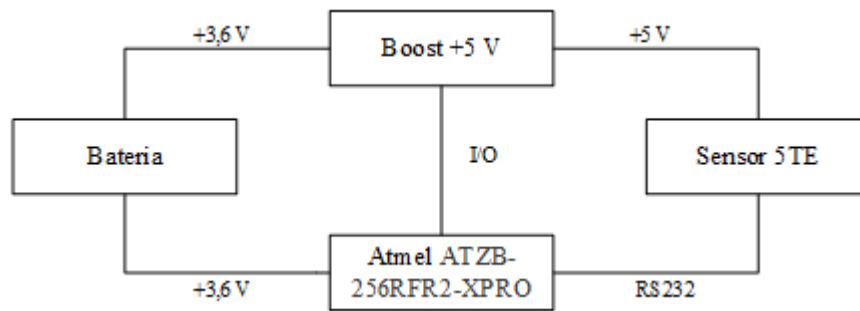


Figura 4.7 - Diagrama do nó sensor

O sensor 5TE opera com uma tensão mínima de 3,6 V, que corresponde à tensão máxima fornecida pela bateria. Apesar de a bateria selecionada garantir uma tensão estável ao longo do seu período de vida, o fabricante anuncia uma oscilação de tensão na ordem dos 0,4 V (bateria carregada 3,6 V, bateria descarregada 3,2 V). Sendo assim, foi desenvolvida uma placa que fornece uma tensão fixa de +5 V ao sensor. A bateria, para além de garantir a alimentação à placa desenvolvida, é também responsável por fornecer alimentação à plataforma sem fios. A bateria foi diretamente ligada ao conector J4 da plataforma sem fios.

É utilizada a comunicação série (UART) entre o sensor 5TE e a plataforma sem fios. Como a comunicação é apenas realizada no sentido do sensor para o microcontrolador, apenas foi conectado o sinal relativo à receção de dados da porta série. Para tal, o sinal de dados do sensor foi diretamente ligado ao conector J3-7 (RXD0) da plataforma sem fios. O sensor 5TE tem dois modos de comunicação o DDI-Serial e o SDI-12. Quando o sensor é alimentado entra primeiramente em modo de comunicação DDI-Serial. Após ter sido lida e enviada a informação o sensor passa para o modo de comunicação SDI-12. Esta sequência de operação é ilustrada na Figura 4.8.

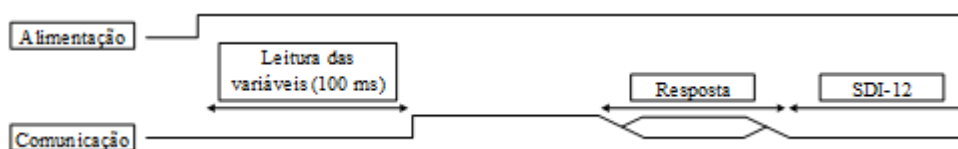


Figura 4.8 - Comunicação 5TE

Para que se pudesse controlar o tempo de atividade do sensor e de ao mesmo tempo gerir o mecanismo do modo de comunicação foi implementado um circuito eletrónico que permite ligar e desligar a alimentação do sensor. Este circuito foi realizado na placa desenvolvida. O mecanismo que permite ligar e desligar o sensor é gerido pelo microcontrolador através de uma saída digital. Para desempenhar esta função foi selecionado o pino digital PD5 que está ligado ao conector J1-5.

#### 4.1.6. Placa Elevadora de Tensão

Foi elaborado um circuito eletrônico que permite elevar a tensão da bateria para uma tensão fixa de +5 V. Para tal, foi utilizado o chip LM2623 da Texas Instruments. Este chip é um *step-up* DC-DC orientado para aplicações que usam baterias [44]. A partir de uma tensão de entrada de +0,8 V este *step-up* consegue gerar uma tensão de saída de +5 V. Com uma tensão de entrada de +3,6 V e um consumo de 500 mA este chip tem uma eficiência de 87%.

Para ligar e desligar a alimentação do sensor 5TE foi desenvolvido um circuito eletrônico que através da conjugação de dois transístores permitem que o sensor comute entre os estados ligado e desligado.

Por forma a integrar estes dois circuitos foi desenvolvida uma placa de circuito impresso utilizando o software Pads da empresa Mentor Graphics. O esquemático relativo à elevação da tensão para +5 V é ilustrado na Figura 4.9.

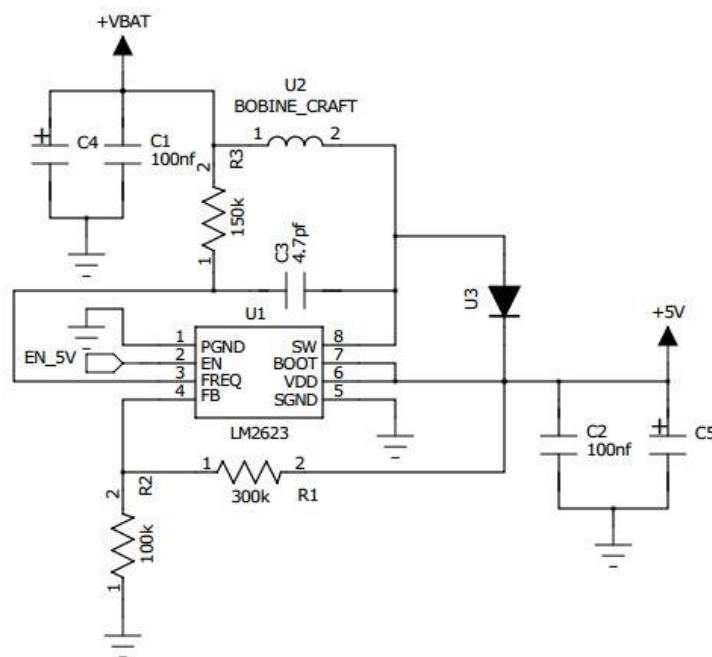


Figura 4.9 - Esquemático do LM2623

Através da tensão de entrada (+VBAT) o LM2623 gera a tensão de saída +5 V. Este *step-up* permite regular a tensão de saída através da conjugação dos valores das resistências R1 e R2 (Figura 4.9). No *datasheet* fornecido pelo fabricante é possível encontrar a expressão  $R1=R2*[(V_{out}/1,24)-1]$ . Tendo por base esta expressão chegou-se aos valores de resistências 100 kΩ para R2 e 300 kΩ para R1, para uma tensão de saída de +5 V. É ainda possível controlar a atividade do LM2623 através da função *enable*



(pino 2). Para tal, foi utilizada a saída digital PD5 que está ligada ao conector J1-5. Quando a saída digital tem o valor binário de 1 o chip está no modo ativo. Quando o valor digital é de 0 o chip é desligado. Neste último modo, a tensão de saída é igual à tensão de entrada (tensão da bateria). Pretendia-se com este modo de operação não só desligar o chip, mas também o sensor 5TE. Porém, o sensor 5TE permanece ativo visto que a tensão mínima que garante o funcionamento do sensor é de +2,8 V. O circuito da Figura 4.10 ilustra o circuito eletrónico desenvolvido que permite ligar e desligar o sensor 5TE.

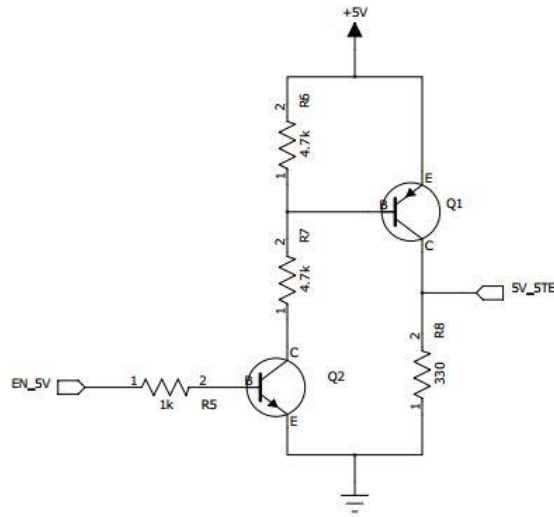


Figura 4.10 - Esquemático do circuito que permite ligar e desligar o sensor 5TE

A saída digital PD5 é partilhada com a função de *enable* do chip. Quando esta saída digital tem o valor binário de 1 o transístor Q2 entra em condução e conseqüentemente o transístor de saída Q1 também. A tensão de saída neste estado é de +5 V desprezando a queda de tensão em Q1. Quando a saída digital tem o valor binário 0 a tensão de saída é de 0 V.

O sensor 5TE é alimentado com a tensão de +5 V, por conseguinte os valores dos dados provenientes do sensor estão compreendidos entre os valores de tensão +5 V e 0 V. Como a plataforma sem fios não permite tensões superiores a +3,6 V, foi desenvolvido um pequeno circuito composto por uma resistência e por um díodo Zener (Figura 4.11).

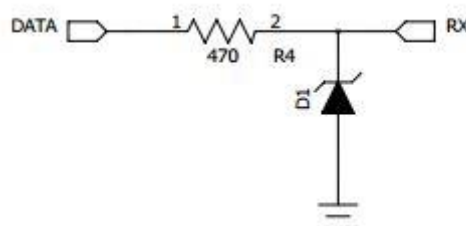


Figura 4.11 - Esquemático da conversão de tensão dos dados do sensor 5TE

Um díodo Zener pode ser diretamente polarizado ou inversamente polarizado. Quando é diretamente polarizado funciona como um díodo normal. Quando é inversamente polarizado o díodo Zener produz uma tensão constante aos seus terminais. Foi selecionado o díodo BZX79C3V3 do fabricante Fairchild. Este díodo quando inversamente polarizado garante uma tensão Zener de +3,3 V aos seus terminais [45]. O *datasheet* fornecido pelo fabricante indica a corrente mínima de 5 mA e máxima de 95 mA em modo Zener. Foi utilizada uma resistência de 470  $\Omega$  (R4) que limita a corrente no díodo. Como a tensão de entrada é de +5 V a corrente máxima no díodo é de 10 mA.

A placa elevadora de tensão, após ter sido elaborada no software PADS, foi impressa e soldada. As seguintes imagens ilustram o aspeto final da placa desenvolvida.

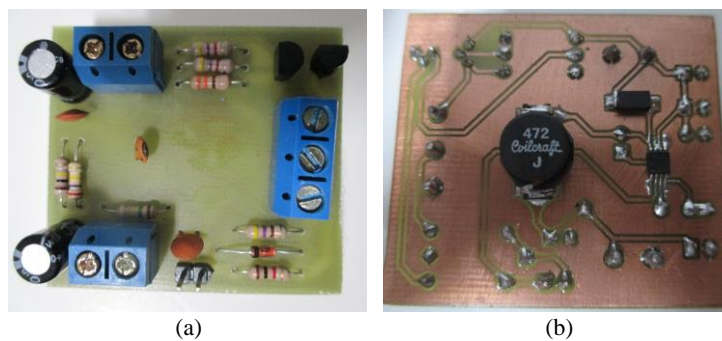


Figura 4.12 - Placa elevadora de tensão  
(a) Placa *top view*; (b) Placa *bottom view*

#### 4.1.7. Nó Central

O nó central é composto por um módulo FTDI232, por uma plataforma Atmel ATZB-256RFR2-XPRO e por um sensor DS18B20 (Figura 4.13).

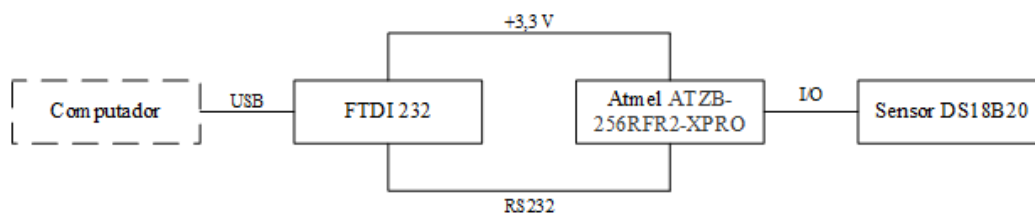


Figura 4.13 - Diagrama do nó central

O nó central está ligado através de USB ao computador responsável por receber os dados e mostrar os mesmos através do software gráfico desenvolvido. O protocolo de comunicação USB é composto por quatro fios. Dois fios são referentes à alimentação e os restantes dois referentes aos dados. A tensão proveniente da porta USB é de +5 V relativo ao *Ground*. Esta alimentação garante o funcionamento de todo o circuito eletrónico do nó central. Como a plataforma sem fios não pode operar com a tensão de

+5 V, foi utilizado o regulador interno de +3,3 V do FTDI232. Esta tensão proveniente do regulador de tensão do FTDI232, para além de alimentar a plataforma sem fios, também fornece alimentação ao sensor DS18B20.

A comunicação entre o sensor DS18B20 e a plataforma sem fios é estabelecida através do porto de I/O. Foi utilizado o pino digital PD4 (J1-6) que tem uma resistência de 4,7 k $\Omega$  em *pull-up*. É utilizada a comunicação série (UART) entre a plataforma sem fios e o FTDI232. Atualmente, o nó central apenas comunica no sentido do nó para o computador. Porém, foi estabelecida a comunicação série nos dois sentidos (Figura 4.14).

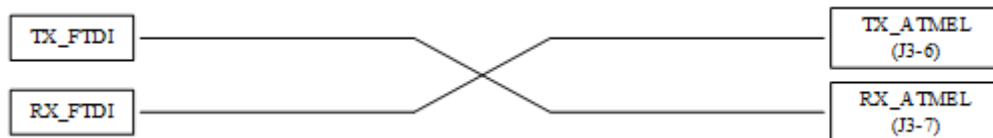


Figura 4.14 - Comunicação série entre o FTDI232 e a plataforma sem fios

#### 4.1.8. Encapsulamento do Nó Sensor

A bateria, a placa sem fios e a placa elevadora de tensão foram devidamente instaladas na caixa IP 65. Foi também embutido na caixa um *jack* 3,5 mm do tipo fêmea. Este *jack* permite conectar ou desconectar o sensor 5TE. Na Figura 4.15(a) é possível verificar a organização interior do encapsulamento do nó sensor. Na Figura 4.15(b) é possível verificar o nó sensor em ambiente real de operação.

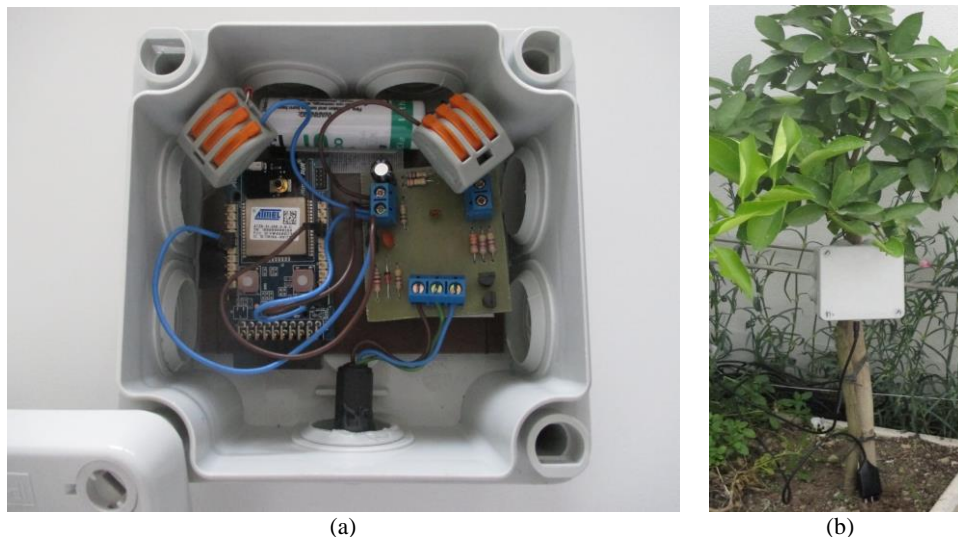


Figura 4.15 - Nó sensor  
(a) Encapsulamento; (b) Ambiente real de operação

### 4.1.9. Encapsulamento do Nó Central

A Figura 4.16(a) mostra a organização interior da caixa IP 54. O nó central é composto pela placa sem fios, pela placa FTDI232 e pelo sensor de temperatura DS18B20. Esta caixa disponibiliza um cabo USB para o exterior, Figura 4.16(b).



Figura 4.16 - Nó central  
(a) Encapsulamento; (b) Cabo USB

## 4.2. *Firmware*

Nesta secção é apresentado o ambiente de desenvolvimento do *firmware* bem como da placa programadora. É apresentado o *firmware Lightweight Mesh* e realizada uma descrição detalhada ao código *firmware* desenvolvido.

### 4.2.1. Ambiente de Desenvolvimento e Placa Programadora

Para o desenvolvimento do código de *firmware* foi utilizado um *Integrated Development Environment* (IDE). Este IDE denominado por Atmel Studio (Figura 4.17(a)), atualmente na versão 6.2, permite programar, permite validar o código desenvolvido através de um simulador computacional e permite efetuar *debug on board* [46]. O Atmel Studio possui um compilador GCC para os microcontroladores Atmel ARM e Atmel AVR. Esta plataforma de desenvolvimento é de livre utilização e tem disponível uma vasta gama de bibliotecas de código de *firmware*. Em suma, o Atmel Studio é uma plataforma de desenvolvimento de código de *firmware* que reduz o *time to market*, potencia a reutilização de código, facilita o desenvolvimento de código e ajuda na revisão do código realizado.

Foi utilizada a placa AVR Dragon, (Figura 4.17(b)), para programar e realizar *debug on board* no microcontrolador. A AVR Dragon possui quatro interfaces de programação *In System Programming* (ISP), *High Voltage Serial Programming* (HVSP), *Parallel Programming* (PP) e *JTAG Programming* (JTAG Prog). Para realizar *debug on board*

*board* tem disponíveis dois interfaces o JTAG e o debugWIRE. A interface selecionada para programar e realizar *debug on board* foi o JTAG, pelo que foi estabelecida uma ligação via cabo entre a plataforma sem fios e a placa AVR Dragon.

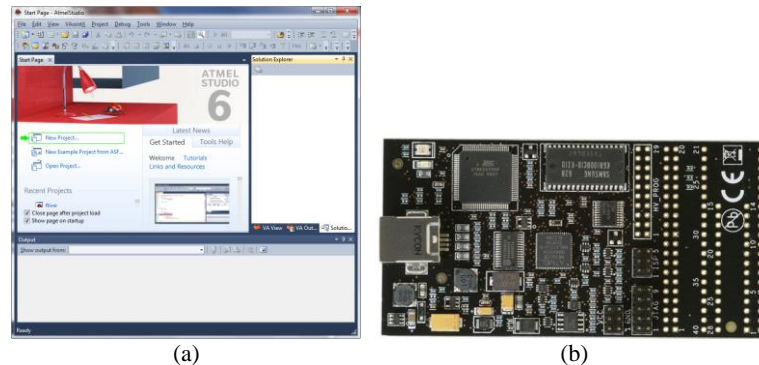


Figura 4.17 - Interface Computacional e Placa Programadora  
(a) Atmel Studio; (b) AVR Dragon

#### 4.2.2. *Lightweight Mesh*

O *Lightweight Mesh* é um *firmware* de livre acesso desenvolvido pela Atmel para dispositivos sem fios que seguem a norma IEEE 802.15.4 [47]. Este *firmware* não implementa a totalidade do protocolo ZigBee, contudo segue alguns dos princípios da norma IEEE 802.15.4. O *Lightweight Mesh*, desenvolvido em linguagem C, pode ser utilizado em todos os SOCs da Atmel, requer baixos recursos e é orientado a aplicações de baixo consumo.

Resumidamente o *Lightweight Mesh* implementa as seguintes funcionalidades:

- Envio e receção de dados;
- Validação de tramas (ACK);
- Encaminhamento da mensagem;
- Segurança da rede;
- Gestão de energia.

O código de *firmware* está separado em diferentes camadas (Figura 4.18). O acesso a cada uma das camadas é realizado através de APIs.

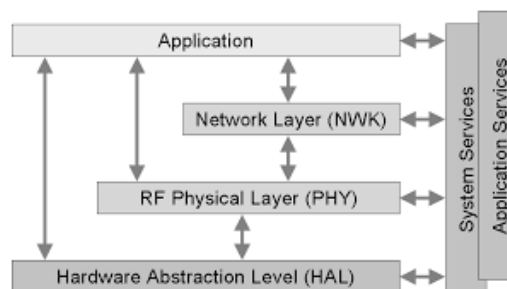


Figura 4.18 - Arquitetura do *firmware* Lightweight Mesh

A camada de hardware (HAL) é responsável por garantir o acesso a funcionalidades de hardware como *timer*, PWM, controlo de energia e acesso aos pinos do *transceiver*.

A camada física (PHY) é responsável por garantir o acesso a funcionalidades do *transceiver*. Estas funcionalidades podem ser acedidas pela camada de rede (NWK) ou pela camada aplicacional.

A camada de rede (NWK) é responsável por gerir a pilha protocolar.

Os serviços do sistema fornecem funções comuns para todas as camadas. Exemplos de funções fornecidas são temporizadores de *firmware* e parâmetros de configuração.

Os serviços de aplicação não fazem parte da pilha protocolar, porém podem ser utilizados em algumas aplicações. *O Over the Air* (OTA) é um dos possíveis serviços aplicacionais.

### 4.2.3. Aplicação WSN

Tendo por base o *firmware Lightweight Mesh* foi implementada uma camada aplicacional para uma rede WSN. Esta camada aplicacional foi desenvolvida tendo por base códigos exemplo fornecidos pelo fabricante (Atmel).

As APIs do *firmware Lightweight Mesh* são inicializadas através da função `SYS_Init()` (Figura 4.19). Este *firmware* utiliza o *cooperative multitasking*. A função `SYS_TaskHandler()` gere as tarefas relativas à camada física `PHY_TaskHandler()`, à camada de rede `NWK_TaskHandler()` e aos temporizadores `SYS_Timer TaskHandler()` que gerem os tempos de execução de cada uma das tarefas.

```
1 int main(void)
2 {
3     SYS_Init();
4     HAL_UartInit(1200);
5
6     while (1)
7     {
8         SYS_TaskHandler();
9         HAL_UartTaskHandler();
10        APP_TaskHandler();
11    }
12 }
```

Figura 4.19 - Função main

Para inicializar a comunicação série foi utilizada a função `HAL_UartInit()`. Esta função é inicializada com o valor de velocidade de transmissão da comunicação série. A função `HAL_UartTaskHandler()` gere as tarefas relativas à comunicação série.

A tarefa relativa à camada aplicacional é gerida pela função `APP_TaskHandler()` (Figura 4.20). Esta função tem implementada uma máquina de estados. A mudança entre os diferentes estados é baseada no valor da variável `appState`.

```

1 static void APP_TaskHandler(void)
2 {
3     switch (appState)
4     {
5         case APP_STATE_INITIAL:
6         case APP_STATE_SEND:
7         case APP_STATE_SENDING_DONE:
8         case APP_STATE_PREPARE_TO_SLEEP:
9         case APP_STATE_SLEEP:
10        case APP_STATE_WAKEUP:
11    }
12 }

```

Figura 4.20 - Função `APP_TaskHandler`

Por forma a tornar o código desenvolvido o mais genérico e reutilizável possível foram utilizadas algumas técnicas, entre elas a declaração de constantes (`#define`) (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Declaração de Constantes

Constante	Descrição
APP_ADDR	Endereço de rede do dispositivo Coordenador = 0 Router = 1 a 1024 End-Device = 1025 a 2047
APP_PANID	Identificador de rede
APP_SECURITY_KEY	Palavra passe da rede sem fios
APP_CHANNEL	Canal de transmissão (0x0b a 0x1a)
APP_DATA_ERROR	Tempo em milissegundos para leituras do sensor 5TE
APP_DATA_COORDINATOR	Tempo em milissegundos para leitura do sensor DS18B20
APP_SENDING_INTERVAL	Tempo em milissegundos de atualização dos dados dos dispositivos lógicos

O código desenvolvido teve por base a função que cada nó desempenha enquanto dispositivo lógico (coordenador, *router* ou *end-device*) da norma ZigBee desempenha na rede. Assim sendo, o código é o mesmo para todos os dispositivos de rede e apenas é necessário alterar a constante `APP_ADDR`. É possível ligar nesta rede até 2048 dispositivos lógicos.

Para enviar mensagens sem fios é necessário criar um pedido de transmissão de dados do tipo `NWK_DataReq_t` (Figura 4.21). Esta estrutura de dados define os diferentes

parâmetros para a transmissão sem fios, especifica a dimensão dos dados e informa a aplicação do resultado da operação de envio (sucesso ou insucesso). Para enviar os dados sem fios é utilizada a função `NWK_DataReq()`. Esta função é carregada com a mesma estrutura de dados que havia sido preenchida. Na camada de rede esta função é processada e o resultado da operação de envio é verificado na função `appDataConf()`, através da verificação da variável `status`.

```

1 static NWK_DataReq_t appNwkDataReq;
2
3 static void appDataConf(NWK_DataReq_t *req)
4 {
5     if (NWK_SUCCESS_STATUS == req->status)
6         if (!appNetworkStatus) //sucesso trama enviada
7     else
8         if (appNetworkStatus) //erro
9     }
10
11 static void appSendData(void)
12 {
13     appNwkDataReq.dstAddr = 0;
14     appNwkDataReq.dstEndpoint = APP_ENDPOINT;
15     appNwkDataReq.srcEndpoint = APP_ENDPOINT;
16     appNwkDataReq.options = NWK_OPT_ACK_REQUEST | NWK_OPT_ENABLE_SECURITY;
17     appNwkDataReq.data = (uint8_t *)&appMsg;
18     appNwkDataReq.size = sizeof(appMsg);
19     appNwkDataReq.confirm = appDataConf;
20
21     NWK_DataReq(&appNwkDataReq);
22 }

```

Figura 4.21 - Código envio de dados sem fios

Para receber os dados sem fios é necessário primeiramente invocar a função `NWK_OpenEndpoint()` (Figura 4.22). Esta função é usada para registar o *endpoint* e registar um *callback* de receção de dados. Quando os dados via sem fios são rececionados, a função `appDataInd()` é invocada e os dados são processados.

```

1 NWK_OpenEndpoint(APP_ENDPOINT, appDataInd);
2
3 static bool appDataInd(NWK_DataInd_t *ind)
4 {
5     ...
6     return true;
7 }

```

Figura 4.22 - Código receção de dados sem fios

Para o envio de dados via comunicação série é usada a função `HAL_UartWriteByte()`. Esta função apenas envia um *byte* de cada vez, pelo que foi desenvolvida uma função (Figura 4.23) que permite o envio de uma sequência de *bytes*.



```

1 static void appUartSendMessage(uint8_t *data, uint8_t size)
2 {
3     for (uint8_t i = 0; i < size; i++)
4     {
5         HAL_UartWriteByte(data[i]);
6     }
7 }

```

Figura 4.23 - Código de envio de dados da comunicação série

Quando um *byte* ou um conjunto de *bytes* é recebido via comunicação série, a função `HAL_UartTaskHandler()` (Figura 4.24), pertencente à camada de hardware (HAL), sinaliza este processo. Como consequência desta ação é invocada a função `HAL_UartBytesReceived()`. Esta função, acedida na camada aplicacional, permite tratar os dados recebidos.

```

1 void HAL_UartBytesReceived(uint16_t bytes)
2 {
3     for (uint16_t i = 0; i < bytes; i++)
4     {
5         uint8_t byte = HAL_UartReadByte();
6         //processar dados
7     }
8 }
9
10 void HAL_UartTaskHandler(void) //porta série de 16bits
11 {
12     ...
13     if (new)//novo dado
14         HAL_UartBytesReceived(bytes);
15 }

```

Figura 4.24 - Código de receção de dados da comunicação série

Foi definida uma estrutura de dados (Tabela 4.5) comum a todos os dispositivos lógicos da rede (coordenador, *router*, *end-device*). Porém, esta estrutura de dados poderá ser alterada sempre que haja necessidade de adicionar ao nó um novo tipo de sensor.

Tabela 4.5 - Estrutura de dados

8 bits	8 bits	64 bits	16 bits	32 bits	32 bits	16 bits
commandId	nodeType	extAdress	shortAdress	swVersion	chMask	panId

8 bits	8 bits	8 bits	32 bits	32 bits	32 bits	8 bits
channel	lqi	rssi	humidity	conductivity	temperature	sendEnd

#### 4.2.4. Aplicação WSN Nó Sensor

Quando o dispositivo lógico está configurado como *end-device*, entra primeiramente no estado `APP_STATE_INITIAL` (Figura 4.25). A função `appInit()` é responsável por inicializar a estrutura de dados e por efetuar um conjunto de inicializações

da camada de rede e da camada de hardware. A saída digital relativa ao sensor 5TE é ativada para que o sensor possa inicializar medições. Após terem sido executadas estas operações, o estado é alterado para APP\_STATE\_SEND.

```

1 static void APP_TaskHandler(void)
2 {
3     switch (appState)
4     {
5         case APP_STATE_INITIAL:
6         {
7             appInit();
8             #if defined(APP_ENDDEVICE)
9                 HAL_DigitalPinsOn(APP_ENSTE); //start read 5TE sensor
10            #endif
11        } break;

```

Figura 4.25 APP\_STATE\_INITIAL nó sensor

No estado APP\_STATE\_SEND é realizada uma verificação inicial às variáveis `app_5te_data_processed` e `app_flag_dataerror` (Figura 4.26). A primeira variável é relativa ao sucesso ou insucesso de leitura e processamento dos dados do sensor 5TE. A segunda variável é relativa a uma falha de leitura do sensor 5TE. Esta falha está normalmente associada a uma desconexão do sensor 5TE. Esta variável é modificada quando o temporizador `appDataErrorTimerHandler`, carregado com a constante `APP_DATA_ERROR` atinge o valor definido. As variáveis de temperatura, humidade e condutividade da estrutura de dados, em situação de erro, são carregadas com o valor hexadecimal de `0xFFFFFFFF`.

```

1 static void APP_TaskHandler(void)
2 {
3     ...
4     case APP_STATE_SEND:
5     {
6         #if defined(APP_ENDDEVICE)
7             if (app_5te_data_processed || app_flag_dataerror)
8             {
9                 appSendData();
10                HAL_DigitalPinsOff(APP_ENSTE); //O sensor é desligado
11                app_flag_dataerror = 0;
12                SYS_TimerStop(&appDataErrorTimer);
13            }
14        #endif
15    } break;

```

Figura 4.26 APP\_STATE\_SEND nó sensor

A estrutura de dados do sensor 5TE é especificada na Tabela 4.6 [42]. É utilizado o exemplo de um possível conjunto de dados: `56 432 645<0D>zJ<0D><0A>`. Os valores de temperatura, humidade e condutividade são de tamanho variável, pelo que são separados com o carácter *space*.

Tabela 4.6 - Trama do sensor 5TE

Parâmetro	Descrição
56	<p>Valor de humidade</p> <p>O valor recebido pelo microcontrolador é primeiramente dividido por 50, sendo que para este exemplo o valor de humidade é 1,12 VWC.</p> <p>Para a medição da humidade em solo deve ser utilizada a fórmula de TOPP:</p> $\text{VWC}(\%) = (4,3 \cdot 10^{-6} \cdot 56^3 - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot 56^2 + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot 56 - 5,3 \cdot 10^{-2}) \cdot 100$
432	<p>Valor de condutividade</p> <p>O valor recebido pelo microcontrolador (432) é dividido por 100.</p> <p>Para este caso o valor de condutividade é de 4,32 dS/m</p>
645	<p>Valor de temperatura</p> <p>O valor recebido pelo microcontrolador (645) é convertido em temperatura através da seguinte expressão:</p> $\text{Temperatura} = (645 - 400) / 10$ <p>Para este caso o valor de temperatura é de 24,5 °C</p>
<0D>	Caracter <i>carriage return</i>
z	Indica o tipo de sensor, neste caso para o 5TE foi definido o carácter “z”.
J	<p>Checksum (Integridade dos dados)</p> <p>Todos os caracteres recebidos pelo microcontrolador até ao carácter ‘z’ (56 432 645&lt;0D&gt;z) são somados. O resultado desta soma é comparado com o carácter J (para este exemplo).</p>
<0D><0A>	O carácter <i>carriage return</i> precedido do carácter <i>line feed</i> significa fim de comunicação de dados

Os dados provenientes do sensor 5TE são tratados pela função HAL\_UartBytesReceived() (Figura 4.27). Esta função recebe os dados até ao carácter finalizador (<0A>). Os dados recebidos pelo microcontrolador são validados através da técnica de *checksum* (Figura 4.27). Se os dados forem coerentes, é invocada a função appUart5TE(). Esta função é responsável por separar cada um dos bytes recebidos e colocar os mesmos na estrutura de dados definida (Tabela 4.5).

```

1 void HAL_UartBytesReceived(uint16_t bytes)
2 {
3     ...
4     for (uint16_t i = 0; i < bytes; i++)
5     {
6         uint8_t byte = HAL_UartReadByte();
7         if((appUartBufferPtr == sizeof(appUartBuffer)) || byte == 0x0A)
8         {
9             crc_rec = appUartBuffer[appUartBufferPtr-2]; //checksum position
10            for(uint8_t j = 0; j < appUartBufferPtr-2; j++)
11            {
12                sum_crc += appUartBuffer[j];
13            }
14            crc = sum_crc % 64 + 32;
15            if(crc == crc_rec)//frame correcta
16            {
17                HAL_LedOn(APP_LED_DEBUG);
18                appUartSTE();
19            }
20        }
21        else
22            if((appUartBufferPtr < sizeof(appUartBuffer)) && count)
23            {
24                appUartBuffer[appUartBufferPtr++] = byte;// incremento da posição do buffer
25            }
26        }
27        ...
28    }

```

Figura 4.27 Receção de dados do sensor 5TE

Quando todo o processo de leitura e processamento dos dados está concluído, a variável `app_5te_data_processed` muda de estado e os dados são enviados no meio sem fios (Figura 4.26).

Após o envio dos dados ter sido efetuado com sucesso, o estado é alterado para `APP_STATE_SENDING_DONE` que, por sua vez, irá colocar o estado em `APP_STATE_PREPARE_TO_SLEEP`. É verificada a ocupação do canal sem fios. Se o canal estiver livre o dispositivo entra em *sleep mode* (`APP_STATE_SLEEP`). A constante `APP_SENDING_INTERVAL` determina o tempo que o dispositivo permanece neste modo.

```

1 static void APP_TaskHandler(void)
2 {
3     ...
4     case APP_STATE_SENDING_DONE:
5     {
6         #if defined(APP_ENDEDEVICE)
7             appState = APP_STATE_PREPARE_TO_SLEEP;
8         #endif
9     } break;
10    case APP_STATE_PREPARE_TO_SLEEP:
11    {
12        if (!NWK_Busy())
13        {
14            NWK_SleepReq();
15            appState = APP_STATE_SLEEP;
16        }
17    } break;
18    case APP_STATE_SLEEP:
19    {
20        HAL_LedClose();
21        HAL_Sleep(APP_SENDING_INTERVAL);
22        appState = APP_STATE_WAKEUP;
23    } break;

```

Figura 4.28 - Sleep Mode

Quando o tempo em modo *sleep* termina, o dispositivo transita para o estado `APP_STATE_WAKEUP` (Figura 4.29). São reinicializadas algumas funcionalidades e o estado é novamente colocado no modo de envio (`APP_STATE_SEND`), sendo um novo ciclo iniciado.

```

1 static void APP_TaskHandler(void)
2 {
3     ...
4     case APP_STATE_WAKEUP:
5     {
6         #if defined(APP_ENDDEVICE)
7             NWK_WakeupReq();
8             HAL_LedInit();
9             HAL_LedOn(APP_LED_NETWORK);
10            HAL_DigitalPinsOn(APP_EN5TE); //start read 5TE sensor
11            appDataErrorTimer.interval = APP_DATA_ERROR;
12            appDataErrorTimer.mode = SYS_TIMER_INTERVAL_MODE;
13            appDataErrorTimer.handler = appDataErrorTimerHandler;
14            SYS_TimerStart(&appDataErrorTimer);
15            appState = APP_STATE_SEND;
16        #endif
17    } break;
18 }

```

Figura 4.29 – `APP_STATE_WAKEUP` nó sensor

#### 4.2.5. Aplicação WSN Nó Central

Quando o dispositivo lógico está configurado como coordenador, entra primeiramente no estado `APP_STATE_INITIAL`. Após ter sido executada a função `appInit()` é inicializado um temporizador com um tempo definido pela constante `APP_DATA_COORDINATOR`. Este temporizador é utilizado para realizar leituras periódicas ao sensor DS18B20.

```

1 static void APP_TaskHandler(void)
2 {
3     switch (appState)
4     {
5         case APP_STATE_INITIAL:
6         {
7             appInit();
8             ...
9         #if defined(APP_COORDINATOR)
10            appDataCoordinatorTimer.interval = APP_DATA_COORDINATOR;
11            appDataCoordinatorTimer.mode = SYS_TIMER_INTERVAL_MODE;
12            appDataCoordinatorTimer.handler = appDataCoordinatorTimerHandler;
13            SYS_TimerStart(&appDataCoordinatorTimer);
14        #endif
15    } break;
16    ...
17 }

```

Figura 4.30 - `APP_STATE_INITIAL` nó central

A variável `app_flag_datacoordinator` é alterada pelo temporizador associado às leituras do sensor DS18B20. Quando a variável é alterada, a função `ds18b20_gettemp()` é invocada e é retornado o valor de temperatura. A estrutura de dados, relativa ao

dispositivo lógico coordenador, é enviada através da comunicação série. A variável `app_flag_datacoordinator` é novamente reposta e o temporizador é reinicializado.

```

1 static void APP_TaskHandler(void)
2 {
3     switch (appState)
4     {
5         ...
6         case APP_STATE_SEND:
7         {
8             ...
9             #elif defined(APP_COORDINATOR)
10                if(app_flag_datacoordinator)//case coordinator
11                {
12                    appMsg.sensors.temperature = ds18b20_gettemp();
13                    appSendData();
14                    app_flag_datacoordinator = 0;
15                    appDataCoordinatorTimer.interval = APP_DATA_COORDINATOR;
16                    appDataCoordinatorTimer.mode = SYS_TIMER_INTERVAL_MODE;
17                    appDataCoordinatorTimer.handler = appDataCoordinatorTimerHandler;
18                    SYS_TimerStart (&appDataCoordinatorTimer);
19                }
20            #endif
21        } break;
22        ...
23    }

```

Figura 4.31 - APP\_STATE\_SEND nó central

Foi desenvolvida uma biblioteca de código *firmware* para gerir a comunicação com o sensor de temperatura DS18B20. O protocolo 1Wire utiliza uma única linha de comunicação para o envio e receção de dados. Foram definidos alguns comandos (Figura 4.32) que permitem interagir com o sensor DS18B20 [40].

```

1 //commands
2 #define DS18B20_CMD_CONVERTTEMP      0x44
3 #define DS18B20_CMD_RSCRATCHPAD     0xbe
4 #define DS18B20_CMD_WSCRATCHPAD     0x4e
5 #define DS18B20_CMD_CPYSCRATCHPAD   0x48
6 #define DS18B20_CMD_RECEEPROM       0xb8
7 #define DS18B20_CMD_RPWRSUPPLY      0xb4
8 #define DS18B20_CMD_SEARCHROM       0xf0
9 #define DS18B20_CMD_READROM         0x33
10 #define DS18B20_CMD_MATCHROM        0x55
11 #define DS18B20_CMD_SKIPROM         0xcc
12 #define DS18B20_CMD_ALARMSEARCH     0xec

```

Figura 4.32 - Comandos DS18B20

Na Figura 4.33 é possível observar os protótipos das funções desenvolvidas. A função `ds18b20_reset()` é utilizada para validar a linha de comunicação. A função `ds18b20_writebit()` configura o pino digital como saída e efetua o procedimento de escrita do bit recebido. Para a leitura dos dados foi desenvolvida a função `ds18b20_readbit()`, que configura a porta digital como entrada e efetua o procedimento de leitura do bit recebido. As funções `ds18b20_writebyte()` e `ds18b20_readbyte()` permitem tratar os dados de escrita e leitura ao *byte*.

```

1 //Prototypes
2 uint8_t ds18b20_reset(void);
3 void ds18b20_writebit(uint8_t);
4 uint8_t ds18b20_readbit(void);
5 void ds18b20_writebyte(uint8_t byte);
6 uint8_t ds18b20_readbyte(void);
7
8 extern int32_t ds18b20_gettemp();

```

Figura 4.33 - Funções 1Wire

Na Figura 4.34 é possível verificar a sequência de operações necessária para a obtenção do valor de temperatura do sensor DS18B20.

```

1 int32_t ds18b20_gettemp()
2 {
3     ...
4     ds18b20_reset(); //reset
5     ds18b20_writebyte(DS18B20_CMD_SKIPROM); //skip ROM
6     ds18b20_writebyte(DS18B20_CMD_CONVERTTEMP); //start temperature conversion
7
8     while(!ds18b20_readbit()); //wait until conversion is complete
9
10    ds18b20_reset(); //reset
11    ds18b20_writebyte(DS18B20_CMD_SKIPROM); //skip ROM
12    ds18b20_writebyte(DS18B20_CMD_RSCRATCHPAD); //read scratchpad
13
14    //read 2 byte
15    temperature[0] = ds18b20_readbyte();
16    temperature[1] = ds18b20_readbyte();
17
18    ds18b20_reset(); //reset
19    ...
20 }

```

Figura 4.34 - Função ds18b20\_gettemp()

Para além de efetuar leituras periódicas ao sensor de temperatura DS18B20, o dispositivo coordenador também recebe os dados provenientes dos dispositivos lógicos *router* e *end-device*. Para tal, a função `appDataInd()` receciona os dados sem fios e envia os mesmos através da comunicação série.

### 4.3. Software

Foi desenvolvida uma interface gráfica para uma melhor leitura e interpretação dos dados adquiridos pela rede WSN. Para tal, foi utilizada a ferramenta multiplataforma Qt. Esta ferramenta desenvolvida pela empresa norueguesa Trolltech permite o desenvolvimento de interfaces gráficas desenvolvidas em linguagem de programação C++. As aplicações gráficas desenvolvidas podem ser compiladas e validadas em diversas plataformas (Windows, Linux, OS X, Symbian). Esta ferramenta para além de ser de livre instalação, também disponibiliza nos seus repositórios um conjunto de bibliotecas de código exemplo.

Na Figura 4.35 é possível visualizar o ambiente gráfico da ferramenta multiplataforma Qt, denominado de Qt Creator.

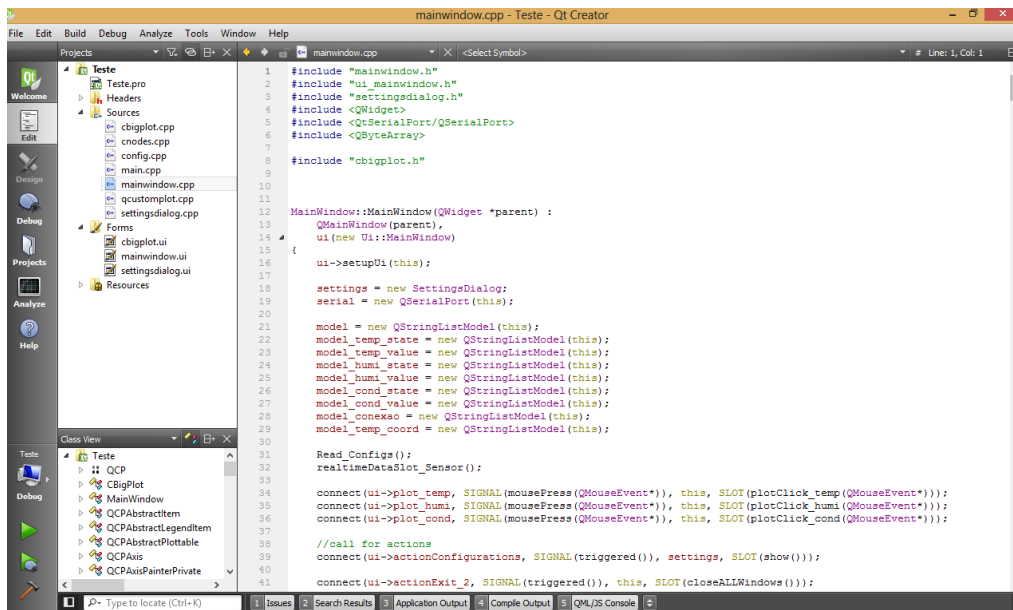


Figura 4.35 – Qt Creator

Os projetos desenvolvidos em Qt Creator estão divididos em dois tipos de ficheiros. Os ficheiros .ui dizem respeito à criação do ambiente gráfico e os ficheiros .cpp dizem respeito às classes implementadas.

### 4.3.1. Interface Gráfica

Na Figura 4.36 é possível visualizar a janela principal da interface gráfica desenvolvida. Esta interface possui dois botões no menu principal que dão acesso a outras funcionalidades do sistema. O botão *File* tem as funcionalidades de guardar os dados e de sair da interface. O botão *Settings* dispõe das funcionalidades de configurar a comunicação série e de conectar ou desconectar a ligação. No canto superior esquerdo da janela principal é apresentado o estado da comunicação série (ativa ou inativa). São também apresentadas a data e a hora bem como a temperatura local adquirida pelo nó central. No canto superior direito, são apresentados todos os nós pertencentes à rede. Estes nós, do tipo *end-device* ou *router*, podem estar ativos ou inativos, sendo sinalizados por um logotipo. A parte inferior da interface mostra os dados relativos a um determinado nó da rede. É apresentado o estado do sensor e o último valor adquirido por este nó. É também possível verificar a evolução temporal das variáveis de temperatura, humidade e condutividade através da representação gráfica.



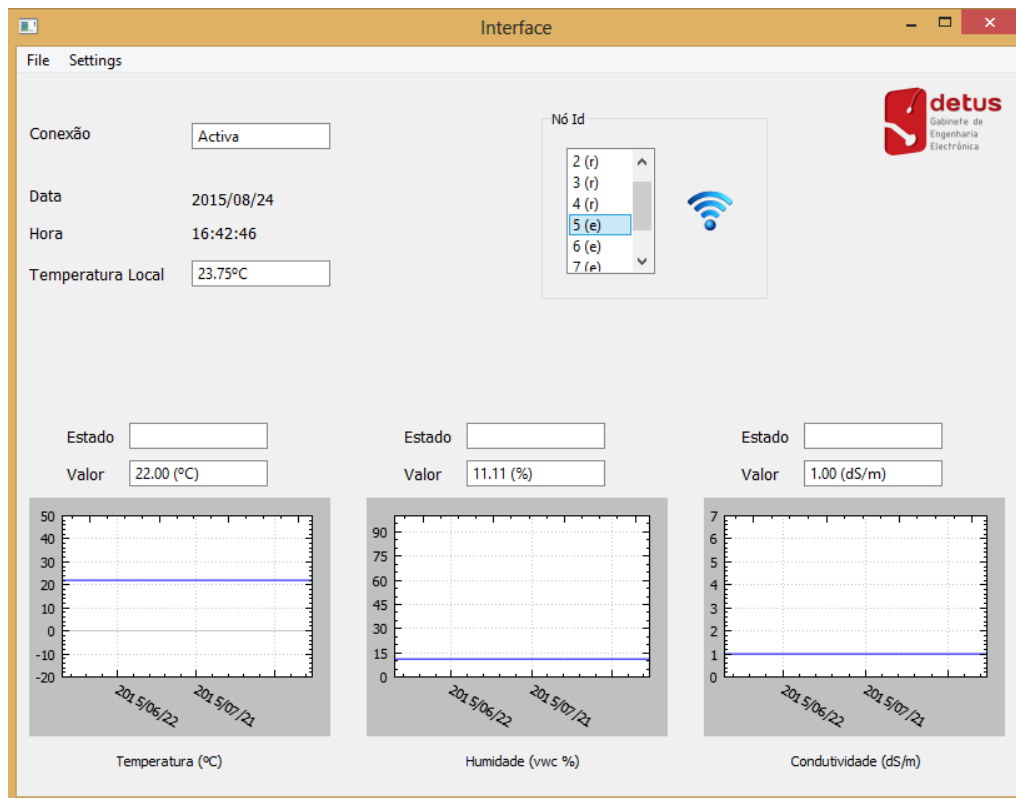


Figura 4.36 - Interface gráfica, visão global

Após ter sido estabelecida a ligação física entre o nó central e o computador é necessário configurar os parâmetros relativos à comunicação série. Na Figura 4.37 é possível visualizar a janela gráfica desenvolvida para este propósito. Esta janela permite seleccionar o canal série, a velocidade da comunicação, o número de bits, o número de caracteres de paragem, entre outros.

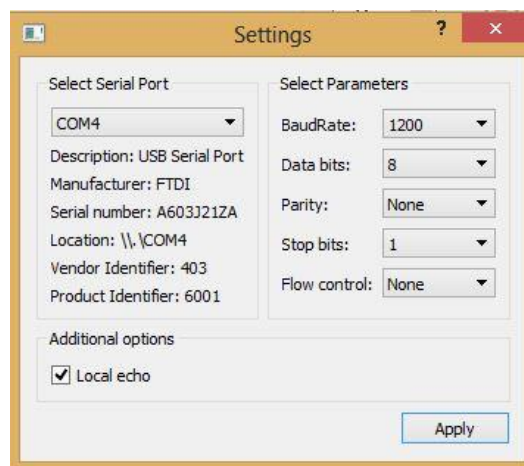


Figura 4.37 - Interface gráfica, configuração da comunicação série

Após ter sido realizada a configuração e estabelecida a comunicação, os dados provenientes do nó central podem ser lidos e processados pela interface gráfica.

Os dados provenientes da comunicação série são recebidos pelo método `readData()` (Figura 4.38) pertencente à classe `mainwindow`. Este método vai adicionando os bytes recebidos para uma variável do tipo `string`. O método `RS232_Process()` é invocado sempre que há novo dado. Este método é responsável por validar os dados recebidos e passar os mesmos para uma nova variável (`data_processed`).

```

1 void MainWindow::readData() //RS232 Interrupt
2 {
3     RS232_in.append(serial->readAll().toHex());
4
5     RS232_Process();
6 }

```

Figura 4.38 - Método de receção de dados da comunicação série

Sempre que os dados recebidos são considerados válidos é invocado o método `data_process()` (Figura 4.39). Os dados recebidos pela interface gráfica pertencem ao nó central ou ao nó sensor. Por conseguinte, o método `data_process()` realiza inicialmente uma verificação de ID. Se o ID recebido for referente ao nó central então será invocado o método `coordinator_refresh()`. Este método é responsável por recolher a informação relativa ao sensor de temperatura e aplicar a mesma na caixa de texto “Temperatura Local” da interface gráfica.

```

1 void MainWindow::data_process()
2 {
3     ...
4     if(node_identify() == 0) //coordinator
5     {
6         coordinator_refresh();
7     }
8     else //router or end device
9     {
10        ...
11    }

```

Figura 4.39 - Método `data_process()`

Se o ID recebido for relativo ao nó sensor então serão processados os valores relativos à humidade, condutividade e temperatura. Na Figura 4.40 é possível visualizar o método `data_process()` na situação de processamento de dados do nó sensor. Para cada valor de humidade, condutividade e temperatura é realizada uma verificação inicial de erro (desconexão do sensor). Em situação de erro, o valor recebido é apenas guardado. Quando não existe erro, o valor recebido é convertido para a escala respetiva.

```

1 void MainWindow::data_process()
2 {
3     ...
4     else //router or end device
5     {
6         ...
7         if(disconnected_error(0))
8             vwcP_rec = humidity_data;
9         else
10        {
11            dielectric_p = (double)humidity_data/50;
12            vwcP_rec = ((0.0000043*pow(dielectric_p,3.0))-(0.00055*pow(dielectric_p,2.0))
13                    + (0.0292*dielectric_p) - (0.053)) *100;
14        }
15        ...
16        if(disconnected_error(1))
17            conductivity_rec = conductivity_data;
18        else
19            conductivity_rec = (double)conductivity_data/100;
20        ...
21        if(disconnected_error(2))
22            temperature_rec = temperature_data;
23        else
24            temperature_rec = (double)(temperature_data-400)/10;
25    }
26    ...
27 }

```

Figura 4.40 - Processamento dos dados relativos ao nó sensor

Nesta fase, os dados processados são inseridos em memória e gravados em ficheiro. Para além do erro de desconexão, são também considerados os erros relativos aos valores máximos e mínimos esperados para cada valor de humidade, condutividade e temperatura. Os erros são atualizados na caixa de texto “Estado” da interface gráfica. O logotipo referente ao estado da comunicação é também atualizado pelo método `data_process()`. Para tal, sempre que são processados novos dados, o logotipo de sinal de rede fica ativo. Neste momento, é também inicializado o temporizador `dataTimer_UpdateWireless` com o valor da constante `UPDATEWIRELESS_TIME`. O método `realtimeDataSlot_UpdateWireless()` é responsável por verificar a contagem do tempo e por colocar o logotipo inativo se o tempo de inatividade tiver sido ultrapassado.

Os dados referentes aos nós que compõem a rede são tratados pela classe `cnodes`. Os métodos desta classe são apresentados na Figura 4.41.

```

1 class cnodes
2 {
3 public:
4     cnodes();
5     ~cnodes();
6     void Insert_Nodes(QString rec_id, QDate rec_date, QTime rec_time,
7                     QString rec_temperature,
8                     QString rec_humidity, QString rec_conductivity);
9     void Insert_Nodes(int rec_id, QDate rec_date, QTime rec_time,
10                    double rec_temperature,
11                    double rec_humidity, double rec_conductivity);
12     QVector<QDateTime> get_datetime();
13     QVector<double> get_temperature(unsigned int axis);
14     QVector<double> get_humidity(unsigned int axis);
15     QVector<double> get_conductivity(unsigned int axis);
16     unsigned int getchanged(void);
17     void setUpdateWireless(unsigned int rec_updatewireless);
18     unsigned int getUpdateWireless(void);
19     ...

```

Figura 4.41 - Métodos classe `cnodes`

A classe config implementa os métodos de escrita e leitura para o ficheiro. Os dados do ficheiro são carregados para a memória sempre que a interface é inicializada. Os dados são escritos para o ficheiro sempre que novos dados são processados. Para além destes métodos, a classe config também implementa os métodos relativos à construção dos gráficos. Nesta classe são implementados os métodos Draw\_Temperature(), Draw\_Humidity() e Draw\_Conductivity() que permitem criar respetivamente os gráficos de temperatura, humidade e condutividade. Na Figura 4.42 é possível visualizar parte da implementação dos métodos Refresh\_Graph() e Draw\_Temperature().

```
1 void MainWindow::Refresh_Graph(void)
2 {
3
4     Draw_Temperature((Array_Nodes[actual_listview].get_temperature(1)),
5                     (Array_Nodes[actual_listview].get_temperature(2)));
6     ...
7 }
8 void MainWindow::Draw_Temperature(QVector<double> x, QVector<double> y)
9 {
10
11     for(int i=0; i < y.size(); i++)//find for errors
12     {
13         if(y.value(i) == DISCONNECTED_SENSOR ||
14            y.value(i) < TEMPERATURE_MIN ||
15            y.value(i) > TEMPERATURE_MAX)
16         {
17             y.remove(i);
18             x.remove(i);
19             i--;
20         }
21     }
22
23     this->ui->plot_temp->addGraph();
24     ...
25 }
```

Figura 4.42 - Método Refresh\_Graph() e Draw\_Temperature()

O método Refresh\_Graph() invoca o método Draw\_Temperature() com os valores da data (x) e da temperatura (y). Os valores referentes às situações de erro não são mostrados na análise gráfica. Na janela principal da interface gráfica, não é possível interagir com os dados dos gráficos de temperatura, de humidade e de condutividade. Com o intuito de melhorar a leitura dos dados foi implementada a classe cbigplot. Quando os gráficos da janela principal da interface gráfica são pressionados é criada uma nova janela com dimensões de 640x480 pixels. Esta janela (Figura 4.43) permite efetuar *zoom*, fixar um dos eixos do gráfico e movimentar os dados.

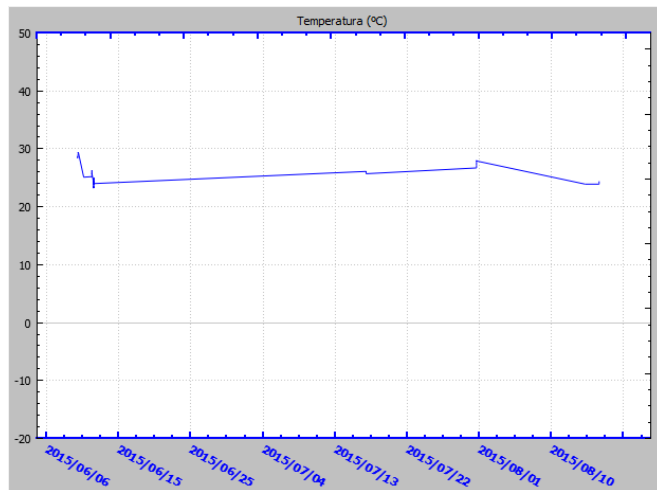


Figura 4.43 – Gráfico de temperatura da classe cbigplot

#### 4.4. Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as diferentes tarefas realizadas para a obtenção do sistema final. Na área de hardware foram apresentados os sistemas eletrónicos que compõem o nó sensor e o nó central. É também apresentado o respetivo encapsulamento para cada nó. Na área de *firmware* é apresentado o *firmware Lightweight Mesh* que mostrou ser uma ótima solução para o desenvolvimento e aceleração de projetos de redes WSN. É ainda realizada uma explicação da camada aplicacional desenvolvida. Na área de software é apresentada a interface gráfica desenvolvida e explicados os diferentes modos de funcionamento.



# CAPÍTULO 5

## Testes e Resultados

Neste capítulo, são apresentados alguns dos testes realizados na validação do sistema desenvolvido. Foram realizados testes nas áreas de hardware, *firmware* e software. Por último, o sistema esteve em pleno funcionamento durante um dia e os valores de temperatura, humidade e condutividade foram registados pela interface gráfica desenvolvida.

### 5.1. Testes Desenvolvidos

Ao longo do presente capítulo são descritos os diferentes ambientes e equipamentos para a realização dos testes de validação do sistema.

Para a validação do hardware foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Fonte de alimentação (*Digital Lab*, IDL-800);
- Multímetro (Fluke 87-V);
- Osciloscópio (Tektronix TDS1012B).

Para a validação do *firmware* foram utilizadas as seguintes ferramentas:

- AVR Dragon;
- Módulo FTDI232;
- Software computacional Terminal v1.9b;
- Osciloscópio.

Para validar a interface gráfica (software) foram utilizadas as ferramentas de depuração do software Qt Creator.

#### 5.1.1. Placa Elevadora de Tensão

Para validar a placa elevadora de tensão foram utilizados os seguintes recursos: *Digital Lab*, multímetro e osciloscópio.

Foi gerada uma tensão de +3,3 V através do *digital lab*. Esta tensão foi utilizada como alimentação principal do circuito. Para que a tensão de saída (+5 V) possa ser gerada é ainda necessário aplicar um sinal digital ao pino *enable* do chip LM2623. Por conseguinte, foi utilizado um botão *On-Off* (0 V, +5 V) do *Digital Lab*. Assim, quando a tensão no pino *enable* é de +5 V, a tensão de saída registada pelo multímetro é de +4,92 V

A tensão máxima proveniente dos dados do sensor 5TE foi medida através do osciloscópio. Na Figura 5.1 é possível verificar um conjunto de dados enviados pelo sensor 5TE e a tensão máxima registada foi de +2,88 V.

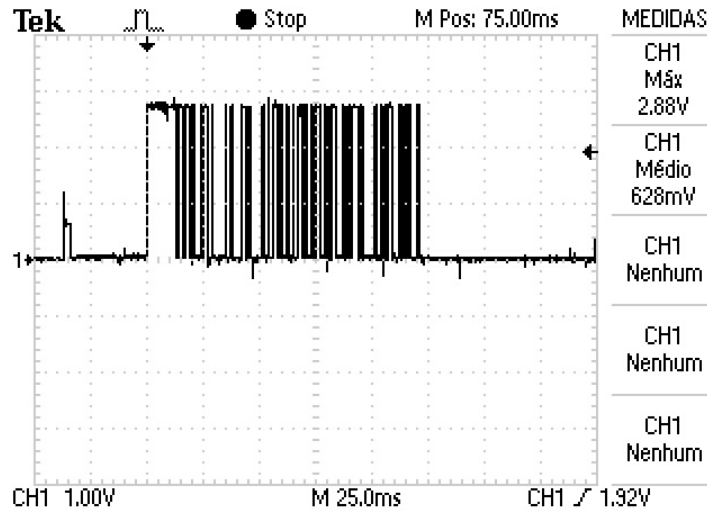


Figura 5.1 - Dados 5TE, tensão máxima

### 5.1.2. Leituras de Condutividade Elétrica

Para a realização das medições de condutividade elétrica foi utilizado o sensor 5TE. O teste foi realizado a uma temperatura média de 19,8 °C e tem por base a mudança da resistência elétrica nos terminais do sensor (parafusos metálicos). Foram utilizadas resistências da série E12 desde o valor de 100 Ω até ao valor de 10 kΩ. O sensor foi alimentado com uma tensão de +5 V e foi utilizada a comunicação série para a recolha dos dados. Na Figura 5.2 é possível verificar a evolução dos valores de condutividade elétrica para os diferentes valores de resistência elétrica.

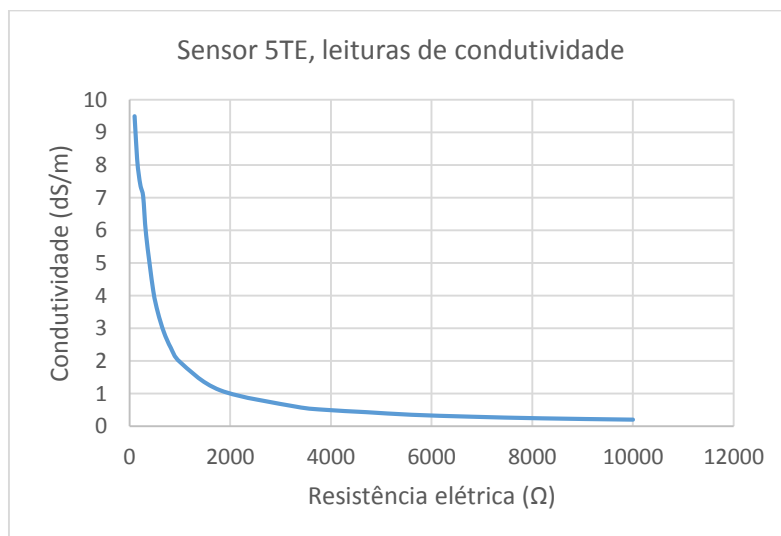


Figura 5.2 - Gráfico Condutividade Elétrica



### 5.1.3. Comunicação Série do Nó Sensor

Para a validação da comunicação série entre a plataforma sem fios e o sensor 5TE foi utilizado o software computacional Terminal v1.9b. Foi realizado um código de *firmware* para este teste, pelo que quando é recebida uma mensagem do sensor 5TE, a mesma é reproduzida pela plataforma sem fios através da comunicação série. Foram ligados dois módulos FTDI232 ao nó sensor para adquirir os dados da comunicação série. Os dados recebidos (sensor 5TE) são lidos através da COM5 do computador (Figura 5.3(a)). Os dados enviados (plataforma sem fios) são lidos através da COM4 do computador (Figura 5.3(b)).

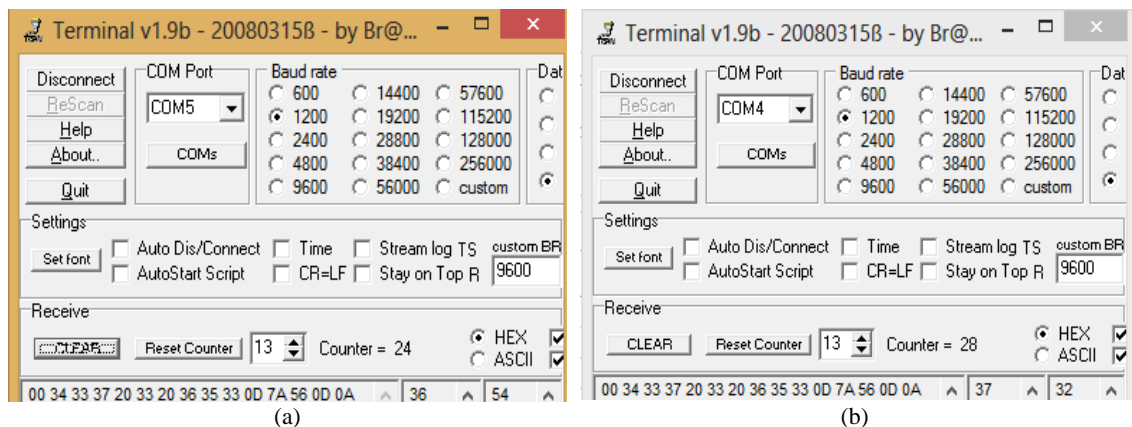


Figura 5.3 - Comunicação série entre o sensor 5TE e plataforma sem fios  
(a) Dados sensor 5TE; (b) Dados plataforma sem fios

### 5.1.4. Comunicação de Dados Sem Fios

Para a realização deste teste foi utilizado o software computacional Terminal v1.9b. Foi estabelecida uma comunicação sem fios entre o nó sensor e o nó central. O nó sensor após ter adquirido os dados do sensor 5TE enviou os mesmos sem fios para o nó central. Para monitorizar os dados do nó sensor e do nó central foi utilizado o módulo FTDI232. Sempre que o nó sensor envia dados sem fios, os mesmos são lidos através da COM5 do computador (Figura 5.4 (a)). Os dados sem fios recebidos pelo nó central são encaminhados pela comunicação série e lidos através da COM4 do computador (Figura 5.4 (b)).

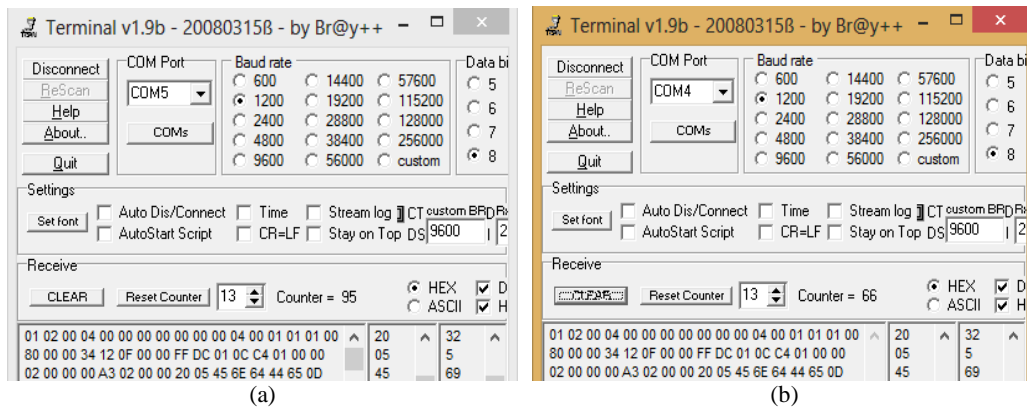


Figura 5.4 - Comunicação sem fios entre nó sensor e nó central  
 (a) Dados do nó sensor; (b) Dados do nó central

### 5.1.5. Erro de Desconexão da Comunicação Série (Interface Gráfica)

Foi realizado um teste que permite verificar o estado da conexão da comunicação série entre o computador e o nó central. Para tal, foi inicialmente estabelecida a ligação física entre o computador e o nó central. Na interface gráfica foi estabelecida a conexão da comunicação série. Após terem sido realizados este conjunto de procedimentos, a ligação física foi removida e uma mensagem de erro (Figura 5.5) surgiu na interface gráfica. Esta mensagem alerta o utilizador para problemas relacionados com a comunicação série.

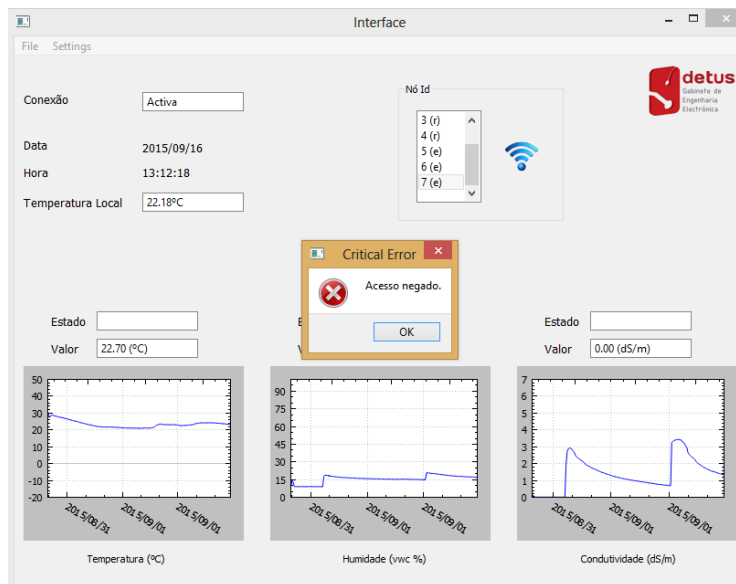


Figura 5.5 - Mensagem de erro de desconexão da comunicação série

### 5.1.6. Receção de Dados e Ficheiro de Dados (Interface Gráfica)

Os dados recebidos através da comunicação série são processados pela interface gráfica. Foi realizado um teste de validação aos dados recebidos, através da ferramenta

de depuração do software Qt Creator. Os dados recebidos podem ter proveniência do nó central ou do nó sensor. Na Figura 5.6 é possível observar duas mensagens recebidas pela interface gráfica. A primeira mensagem é relativa ao nó central e apenas os dados relativos ao id e temperatura são processados, sendo que o id associado ao nó central é o zero. A segunda mensagem diz respeito ao nó sensor e são processados os dados do id, da humidade, da condutividade e da temperatura.

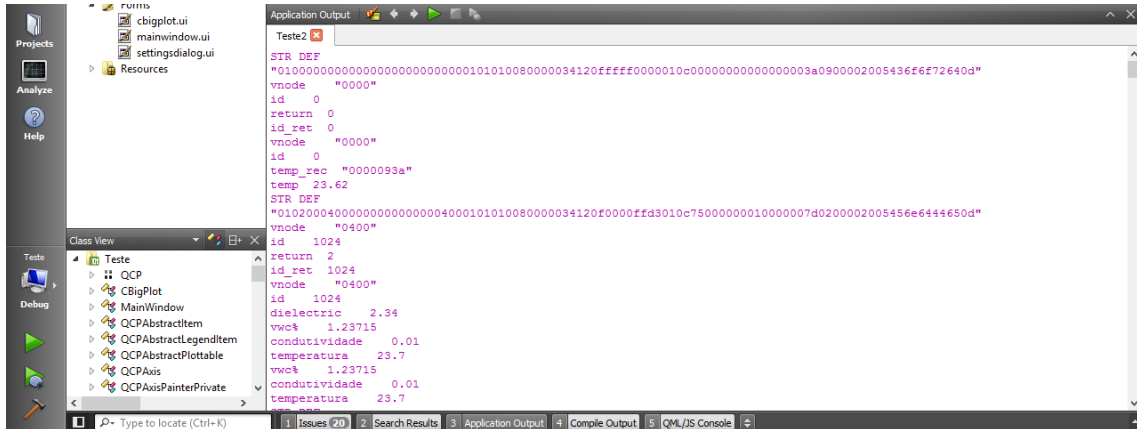


Figura 5.6 - Dados recebidos

Quando a mensagem recebida pertence ao nó sensor, os dados são gravados em memória e em ficheiro de formato texto. Na Figura 5.7 é possível verificar os dados salvaguardados em ficheiro, sendo que o campo seleccionado diz respeito à mensagem ilustrada pela Figura 5.6.

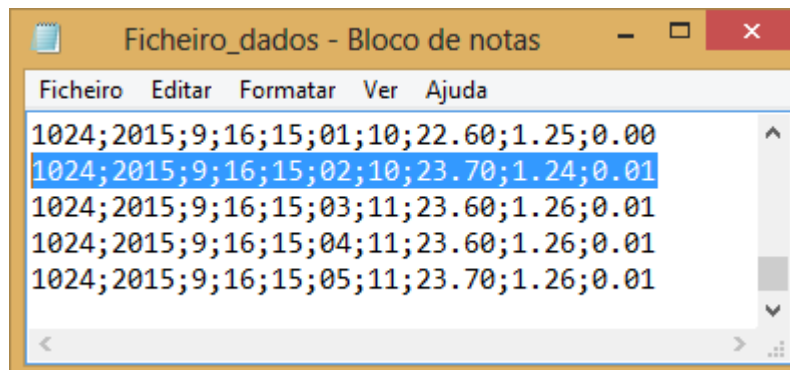


Figura 5.7 - Ficheiro de dados

### 5.1.7. Distância Máxima de Comunicação

Para a realização do teste que permite verificar a distância máxima de comunicação foram utilizados os nós sensor e central. Foi utilizado o *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) para as medições de distância. Este indicador utiliza a medição de ED e mede a potência de sinal recebido. Os valores de potência de sinal variam de -90 dBm a

0 dBm com intervalos de 3 dB. O teste foi realizado no exterior, sem barreiras físicas e com os dois nós colocados a 0,30 metros de altura, relativamente ao solo. O nó central foi ligado ao computador e os dados de RSSI foram recolhidos através do software computacional Terminal v1.9b. O nó sensor foi colocado primeiramente junto do nó central e o valor lido foi de -32 dBm. Posteriormente, foram recolhidas amostras a cada metro e o valor mínimo de potência de sinal registado foi de -90 dBm, que corresponde a uma distância máxima de 30 metros entre nós. Na Figura 5.8 é possível observar a evolução do sinal medido em função da distância entre os nós sensor e central.

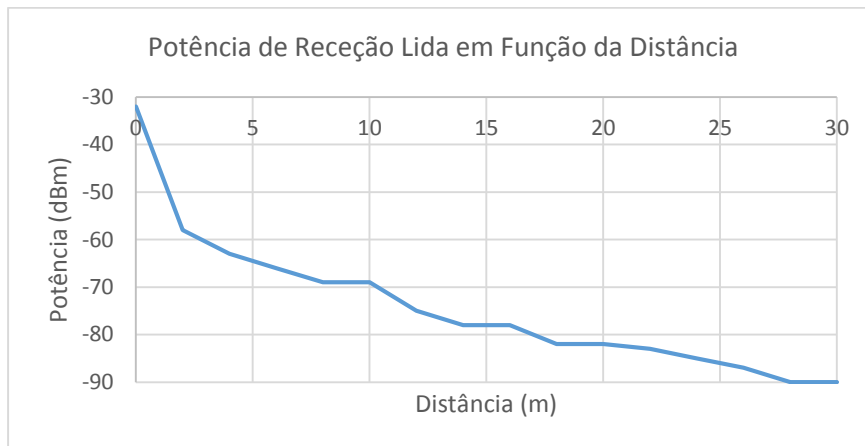


Figura 5.8 – Gráfico da distância máxima de comunicação

### 5.1.8. Medição de Consumo Elétrico

Foram realizados testes ao consumo elétrico da plataforma sem fios e à placa elevadora de tensão com e sem o sensor 5TE. Para a realização deste teste foram utilizados o osciloscópio e o multímetro.

Para a medição do consumo elétrico da plataforma sem fios foi necessário desenvolver um pequeno código de *firmware*. São enviadas mensagens sem fios, a cada 100 ms, do nó sensor para o nó central. A plataforma sem fios foi alimentada com uma tensão de +3,3 V. Os valores médios de corrente elétrica, obtidos pelo multímetro, para os diferentes modos de operação podem ser observados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Consumo elétrico da plataforma sem fios

Descrição	Corrente (mA)
<u>Modo Sleep</u>	0,003
<u>Modo Activo</u>	6,1
<u>Modo RX</u>	11,6
<u>Modo TX</u>	14,5

Para a medição do consumo elétrico da placa elevadora de tensão e do sensor 5TE foi utilizado o osciloscópio. A placa elevadora de tensão foi alimentada com uma tensão de +3,3 V e o pino de “enable” foi ativado. Foi colocada uma resistência de 15,2 Ω em série com o circuito e a queda de tensão aos terminais da mesma foi registada pelo osciloscópio. Na Figura 5.9 é possível visualizar a evolução da corrente do circuito. Por forma a obter o consumo médio de corrente elétrica foi utilizado o ficheiro de saída do osciloscópio. O consumo elétrico combinado da placa elevadora de tensão e do sensor 5TE é de 54 mA.

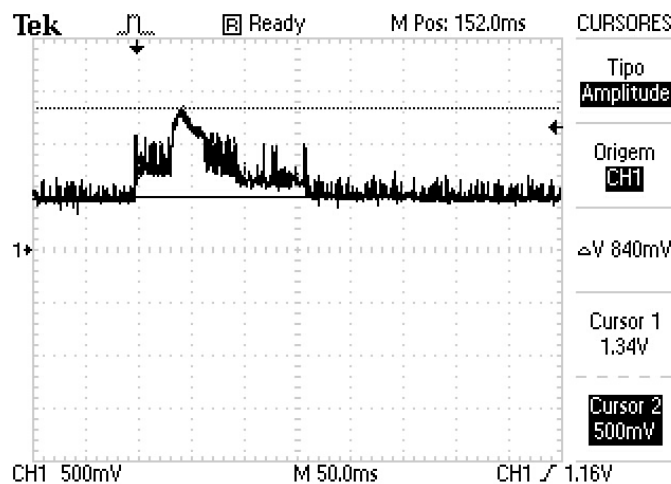


Figura 5.9 - Consumo da placa elevadora de tensão com o sensor 5TE

### 5.1.9. Autonomia do Nó Sensor

Para a realização do teste de autonomia do nó sensor foram ligados o nó central e o nó sensor. Foi utilizada uma frequência de amostragem de 10 minutos para o nó sensor e recorreu-se ao osciloscópio para obter o consumo médio de corrente elétrica.

Na Figura 5.10 é possível observar a evolução da corrente elétrica do nó sensor (canal 1 do osciloscópio) e também o tempo de atividade do sensor 5TE (canal 2 do osciloscópio). Para obter o consumo médio de corrente elétrica, foi utilizado o ficheiro de saída do osciloscópio. Durante o período de atividade do nó sensor, o consumo médio de corrente elétrica registado foi de 55 mA.

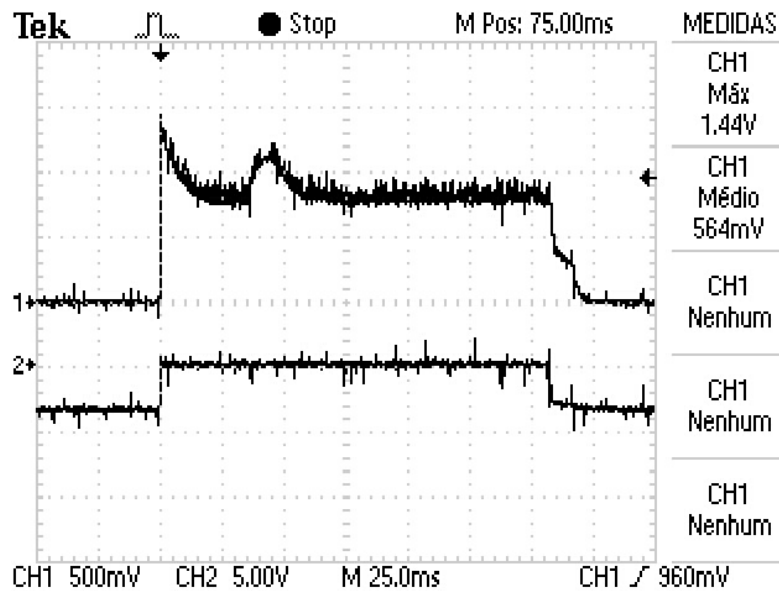


Figura 5.10 - Consumo elétrico do nó sensor

O tempo de atividade do nó sensor, por amostragem, é praticamente determinado pelo tempo de atividade do sensor 5TE. Assim sendo, o nó sensor está ativo durante 172 ms e o sensor 5TE está ativo durante 158 ms.

Para o cálculo da autonomia do nó sensor foi utilizado o valor de corrente elétrica do nó sensor em modo *sleep* (0,003 mA) e o valor de corrente elétrica relativo ao período de atividade do nó sensor (55 mA). Tendo por base a equação (5-1) foi possível determinar o consumo do sistema.

$$I_{\text{médio}}[\text{mA}] = (I_{\text{sleepmode}}[\text{mA}] * \text{tempo\_sleepmode} + I_{\text{atividade}}[\text{mA}] * \text{tempo\_atividade}) / (\text{tempo\_sleepmode} + \text{tempo\_atividade}) \quad (5-1)$$

Através da equação (5-2) foi possível obter a autonomia do sistema em horas. Sabendo que a capacidade da bateria é de 2600 mAh, a autonomia do sistema é de 138550 horas, o que corresponde a 15,8 anos.

$$\text{Autonomia}[\text{h}] = \text{Capacidade\_bat}[\text{mAh}] / I_{\text{médio}}[\text{mA}] \quad (5-2)$$

Porém, o fabricante da bateria anuncia uma perda anual de 1% devido à sua auto-descarga. Assim sendo, a capacidade anual perdida é de 26 mAh. Este consumo, adicionado ao consumo anual do sistema (164 mAh), perfaz um total de 190 mAh. Desta forma, a autonomia do sistema é reduzida dos 15,8 anos para os 13,6 anos.

### 5.1.10. Integração do Sistema

Por forma a validar os diferentes constituintes que compõem o sistema, foi realizado um teste de integração durante um período de 24 horas.

O nó sensor foi colocado no exterior e o sensor 5TE foi inserido na terra. Foi definida uma taxa de amostragem de 10 minutos e os dados recolhidos pelo nó sensor foram enviados sem fios para o nó central. O nó central foi ligado ao computador e a interface gráfica esteve em permanente execução. Os dados recebidos pela interface gráfica foram devidamente processados e guardados em ficheiro. Na Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13 é possível observar a evolução da temperatura, humidade e condutividade durante as 24 horas de funcionamento do sistema. Durante este período de tempo foi realizada uma rega com fertilizante (Fertirega) às 22:34 horas e realizada uma rega às 13:40 horas.

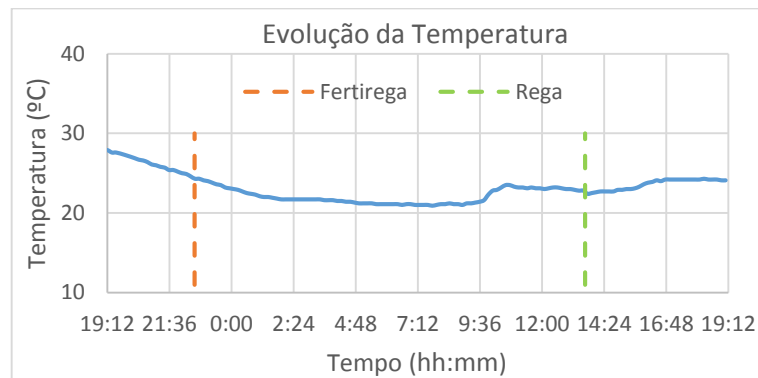


Figura 5.11 - Evolução da temperatura, teste de integração do sistema

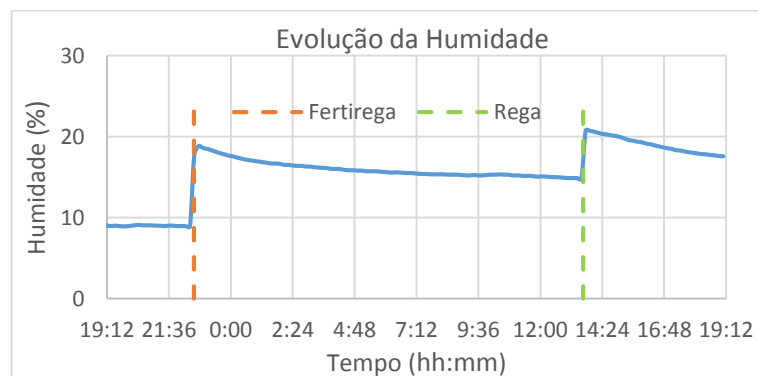


Figura 5.12 Evolução da humidade, teste de integração do sistema

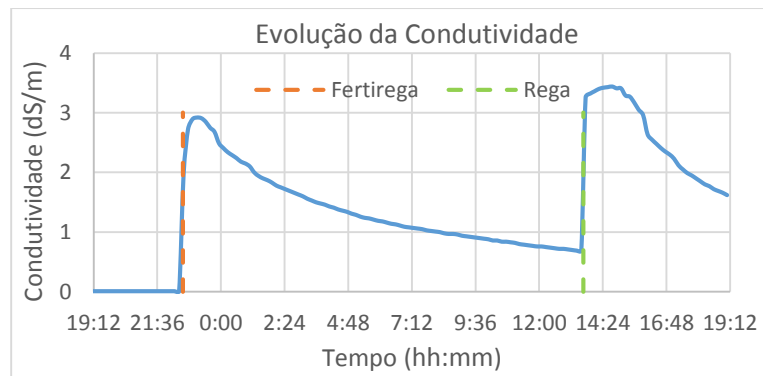


Figura 5.13 - Evolução da condutividade, teste de integração do sistema

## 5.2. Conclusão

Ao longo do presente capítulo foram apresentados alguns dos testes realizados na validação do sistema desenvolvido. Através do teste de distância máxima entre nós, foi possível concluir que o sistema deixa de comunicar a distâncias superiores a 30 metros entre módulos. Com o teste de autonomia do nó sensor foi possível avaliar a longevidade do sistema. Com um período de amostragem de 10 minutos, o sistema terá uma autonomia de 13,6 anos. Com a realização do teste de integração foi possível verificar que as variáveis de humidade e condutividade, do sensor 5TE, têm uma rápida resposta a variações do meio. Foi também possível verificar que as leituras de condutividade elétrica devem ser realizadas aquando dos momentos de rega. Na Figura 5.14 é possível visualizar a evolução da temperatura, humidade e condutividade na interface gráfica, aquando da realização do teste de integração.

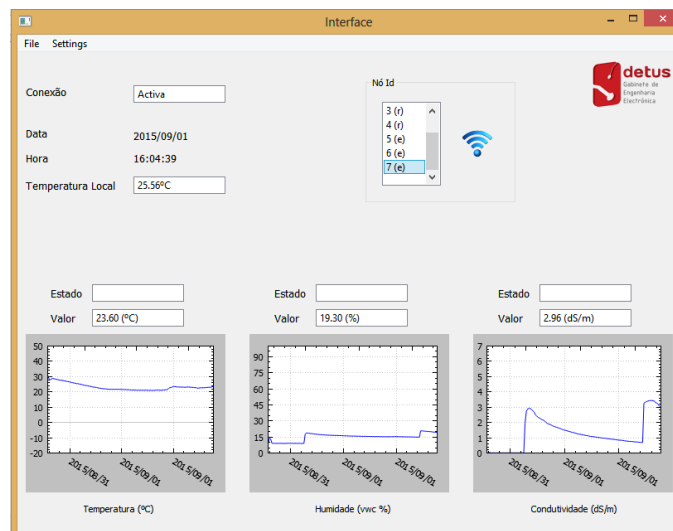


Figura 5.14 - Interface gráfica, teste de integração do sistema



# CAPÍTULO 6

## Conclusões e Trabalho Futuro

Este capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões do sistema desenvolvido e sugerir algumas melhorias para a continuação do mesmo.

### 6.1. Conclusões

A presente dissertação insere-se no conceito de agricultura de precisão. Esta dissertação tem como principal objetivo a criação de uma rede de sensores sem fios capaz de recolher informações de culturas realizadas em solo ou em soluções nutritivas.

Os objetivos (inicialmente definidos) detalhados de seguida foram inteiramente cumpridos.

- Desenvolvimento de uma rede sem fios (WSN) mínima composta por um nó sensor e por um nó central;
- Desenvolvimento de um nó sensor com a capacidade de adquirir as variáveis de temperatura, humidade e condutividade do solo ou de uma solução nutritiva;
- Desenvolvimento de um software computacional capaz de armazenar e de visualizar os dados referentes aos nós sensores.

Foi criada uma rede de sensores sem fios mínima composta por um nó sensor e por um nó central. O nó sensor é composto por um módulo sem fios, por um sensor 5TE, por uma placa elevadora de tensão e por uma bateria. Para o encapsulamento do nó sensor foi selecionada uma caixa IP 65. O nó central é composto por um módulo sem fios, por um módulo FTDI232 e por um sensor DS18B20. Para o encapsulamento do nó central foi selecionada uma caixa IP 54.

Foi desenvolvido um código de *firmware* para a rede de sensores sem fios. Para tal, foi utilizado o *firmware Lightweight Mesh* da Atmel e construído sobre ele a camada aplicacional. Foram também desenvolvidas as bibliotecas que permitem interagir com o sensor 5TE e com o sensor DS18B20.

Foi desenvolvida uma interface gráfica através da ferramenta multiplataforma Qt. Esta interface gráfica permite uma melhor leitura e interpretação dos dados adquiridos pela rede WSN. Na interface gráfica é possível visualizar os valores atuais das variáveis de temperatura, humidade e condutividade de cada nó sensor. É também possível

visualizar a evolução de cada uma destas variáveis através da representação gráfica. Os dados de cada nó sensor são gravados em ficheiro, sendo que poderão ser utilizados para análises futuras.

Com o atual sistema é possível comunicar até 30 metros de distância entre nós. Desta forma, conseguiu-se satisfazer o requisito inicial de distância entre nós de 20 metros.

Foi definido um requisito inicial para a autonomia do nó sensor de igual ou superior a 1 ano. Porém, o sistema desenvolvido tem uma autonomia de 13,6 anos para um período de amostragem de 10 minutos.

O custo de um nó central é de aproximadamente 35 € sem o sensor DS18B20. O custo de um nó sensor é de aproximadamente 40 € sem o sensor 5TE.

## 6.2. Trabalho Futuro

Neste momento o protótipo laboratorial já tem características de um protótipo industrial de primeira série. As funcionalidades e especificações a adicionar e melhorar prioritariamente são as seguintes.

O código de *firmware* e a interface gráfica já contemplam o nó *router*, porém será ainda necessário desenvolver algum hardware para este nó.

Pretende-se que o nó *router* tenha um alcance de sinal sem fios de 100 metros. Por conseguinte, deverá ser desenvolvido um circuito de amplificação de sinal e integrada uma antena no nó *router*.

Existindo um nó *router*, este irá estar em permanente execução. Por conseguinte, os consumos elétricos deste nó são também permanentes. Pretende-se desenvolver uma alimentação baseada em painel solar.

Atualmente, o nó central não tem ligação própria à Internet. Porém, pretende-se que o nó central passe a desempenhar funções de *gateway*. Esta funcionalidade irá permitir ao utilizador consultar os dados da cultura remotamente.

Por último, será importante testar todo o sistema numa cultura agrícola. Apesar de até ao momento terem sido efetuados testes nas áreas de hardware, *firmware* e software é importante testar o sistema com um maior número de nós para assim se poder validar de forma mais conclusiva cada uma das áreas de desenvolvimento.

# Referências

- [1] A. Acosta, "Agricultura o regresso à terra," *Diário Económico*, pp. 2-4, 23 de Julho 2013.
- [2] Instituto Nacional de Estatística, "Estatísticas Agrícolas 2013," p. 87, 2014.
- [3] L. Roudart and M. Mazoyer, *A History of World Agriculture from the Neolithic Age to the Current*. London, UK: Earthscan, 2006.
- [4] J. Jones, *Hydroponics a Pratical Guide for the Soiless Grower*, 2nd ed. USA: CRC Press, 2005.
- [5] K. Roberto, *How-to Hydroponics*, 4th ed. New York, USA: The Futuregarden Press, 2003.
- [6] D. Fernandez. (2013, Fevereiro) Science in Hydroponics. [Online].  
<http://scienceinhydroponics.com/2013/02/the-first-free-hydroponic-nutrient-calculator-program-o.html>
- [7] H. Harroud, A. Karmouch Y. Jiber, "Precision agriculture monitoring framework based on WSN," in *7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Istanbul, 2011, pp. 2015 - 2020.
- [8] J. Lowenberg-Deboer R. Bongiovanni, "Precision Agriculture and Sustainability," *Precision Agriculture*, vol. 5, pp. 359-387, August 2004.
- [9] M. J. Pringle A. B. McBratney, "Estimating Average and Proportional Variograms of Soil Properties and Their Potential Use in Precision Agriculture," *Precision Agriculture*, vol. 1, pp. 125-152, September 2006.
- [10] S. Nayse, L. Waghmare D. Chaudhary, "Application of Wireless Sensor Networks for Greenhouse Parameter Control in Precision Agriculture," *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, vol. 3, February 2011.
- [11] J. Park D. Park, "Wireless sensor network-based greenhouse environment monitoring and automatic control system for dew condensation prevention," in *5th Embedded and Multimedia Computing (EMC)*, Cebu, 2011, pp. 1-5.
- [12] N. Sitter. (2011) "Two-wire, low component count soil temperature sensor". University of Iowa. [Online]. <http://ir.uiowa.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2466&context=etd>
- [13] F. Kreith, J. Kreider D. Goswami, *Principles of Solar Engineering*, 2nd ed. Philadelphia, USA: Taylor & Francis, 2000.
- [14] Z. Rittersma, "Recent achievements in miniaturised humidity sensors - a review of transduction techniques," *Sensors and Actuators*, pp. 196-210, February 2002.
- [15] Denes K. Roveti, "Choosing a Humidity Sensor: A Review of Three Technologies," *Sensors Magazine*, 2001.
- [16] J. Jung, S. Ko P. Puligundla, "Carbon dioxide sensors for intelligent food packaging applications," *Food Control*, vol. 25, pp. 328-333, June 2012.
- [17] G. Ahn, G. Kim, J. Kim and H. Kim J. Kwon, "A study on NDIR-based CO2 sensor to apply remote air quality monitoring system," in *ICCAS-SICE*, Fukuoka, 2009, pp. 1683 - 1687.
- [18] Dana Porter and Xavier Périès Juan M. Enciso. (2007, January) Irrigation Monitoring with Soil Water Sensors. Texas Cooperative Extension. [Online].  
<http://cotton.tamu.edu/Irrigation/SoilWaterSensors.pdf>
- [19] C. Overstreet R. Barbosa. (2011) What is Soil Electrical Conductivity? LSU AgCenter. [Online].  
<http://www.lsuagcenter.com/nr/rdonlyres/e57e82a0-3b99-4dee-99b5-cf2ad7c43aef/77101/pub3185whatissoilelectricalconductivityhighres.pdf>
- [20] Babankumar, R. Thakur, M. Kumar S. Kumar, "Soil pH Sensing Techniques and Technologies- A Review," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 4, May 2015.
- [21] N. Barthakur, E. Norris R. Armstrong, "A comparative study of three leaf wetness sensors," *International Journal of Biometeorology*, vol. 37, pp. 7-10, March 1993.
- [22] T. Sammis J. Wang, "New inexpensive dendrometers for monitoring crop tree growth," in *Innovations in Irrigation*, Anaheim, 2008.
- [23] F. Nack. (2012) "An overview on wireless sensor networks". Freie Universität Berlin. [Online].  
[http://www.mi.fu-berlin.de/inf/groups/ag-tech/teaching/2008-09\\_WS/S\\_19565\\_Proseminar\\_Technische\\_Informatik/nack09verview.pdf](http://www.mi.fu-berlin.de/inf/groups/ag-tech/teaching/2008-09_WS/S_19565_Proseminar_Technische_Informatik/nack09verview.pdf)

- [24] S. Kumar C. Chong, "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, pp. 1247 - 1256, August 2003.
- [25] P. Sinha S. Gupta, "Overview of Wireless Sensor Network: A Survey," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 3, pp. 5201-5207, January 2014.
- [26] M. Matin, *Wireless Sensor Networks - Technology and Protocols.*: InTech, 2012.
- [27] W. Healy W. Guo, "Power Supply Issues in Battery Reliant Wireless Sensor Networks: A Review," *The International Journal of Intelligent Control and Systems*, vol. 19, pp. 15-23, March 2014.
- [28] I. Miča, J. Kacálek, R. Burget M. Šimek. (2007, Aug.) Bandwidth Efficiency of Wireless Networks of WPAN, WLAN, WMAN and WWAN. *Elektro Revue*. [Online].  
<http://www.elektrorevue.cz/en/articles/analogue-technics/0/bandwidth-efficiency-of-wireless-networks-of-wpan--wlan--wman-and-wwan-1/>
- [29] Michael Healy, Pepijn van de Ven, Martin J. Hayes, John Nelson, Thomas Newe and Elfed Lewis Michael Johnson, "A comparative review of wireless sensor network mote technologies," in *Sensors*, Christchurch, 2009, pp. 1439 - 1442.
- [30] X. Yong, P. Xi-yuan P. Yu, "GEMS: A WSN-based greenhouse environment monitoring system," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Binjiang, 2011, pp. 1 - 6.
- [31] E. Correia, R. Santos, M. Reis C. Cunha. (2010) Enhancing Tourism through Viticulture Enterprises in Douro Region: The Inov@Douro Model. Ibima Publishing. [Online].  
<http://www.ibimapublishing.com/journals/CIBIMA/2010/985461/985461.pdf>
- [32] A. Imran M. Shaker, "Greenhouse Micro Climate Monitoring Based On WSN with Smart Irrigation Technique," *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 12, pp. 1072-1077, 2013.
- [33] S. Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. USA: Elsevier, 2008.
- [34] IEEE. (2007, April) Part 15.4:Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS): Amendment to add alternate PHY. IEEE Xplore Digital Library. [Online].  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4152704&contentType=Standards>
- [35] J. Donovan. (2012, May) Security Issues with Wi-Fi, Bluetooth, and ZigBee. DigiKey. [Online].  
<http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/may/security-issues-with-wifi-bluetooth-and-zigbee>
- [36] Atmel. ZigBit 2.4GHz Single chip Wireless Module. [Online].  
[http://www.atmel.com/images/atmel-42191-wireless-zigbit-atzb-s1-256-3-0-c\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-42191-wireless-zigbit-atzb-s1-256-3-0-c_datasheet.pdf)
- [37] Atmel. ATmega256RFR2. [Online]. [http://www.atmel.com/images/atmel-8393-mcu\\_wireless-atmega256rfr2-atmega128rfr2-atmega64rfr2\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-8393-mcu_wireless-atmega256rfr2-atmega128rfr2-atmega64rfr2_datasheet.pdf)
- [38] Atmel. ATmega256RFR2 architecture. [Online].  
<https://atmelcorporation.files.wordpress.com/2013/08/lcgw3.png>
- [39] Atmel. ZigBit Extension User Guide. [Online]. <http://www.atmel.com/Images/Atmel-42186-ZigBit%20Extension-User-Guide.pdf>
- [40] Maxim Integrated. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. [Online].  
<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [41] Decagon. 5TE Water Content, EC and Temperature Sensor. [Online].  
[http://manuals.decagon.com/Manuals/13509\\_5TE\\_Web.pdf](http://manuals.decagon.com/Manuals/13509_5TE_Web.pdf)
- [42] Decagon. Integrators Guide 5TE. [Online].  
<http://manuals.decagon.com/Integration%20Guides/5TE%20Integrators%20Guide.pdf>
- [43] Future Technology Devices International. FT232R USB UART IC. [Online].  
[http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)
- [44] Texas Instruments. LM2623 General-Purpose, Gated-Oscillator-Based DC/DC Boost Converter. [Online]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2623.pdf>
- [45] Fairchild Semiconductor. BZX79C3V3 Zener Diodes. [Online].  
<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/BZ/BZX79C3V3.pdf>
- [46] Atmel. Atmel Studio 6.2 Service Pack 2. [Online].  
[http://www.atmel.com/Images/AStudio6\\_2sp2\\_1563-readme.pdf](http://www.atmel.com/Images/AStudio6_2sp2_1563-readme.pdf)
- [47] Atmel. AVR2130: Lightweight Mesh Developer Guide. [Online].  
[http://www.atmel.com/Images/Atmel-42028-Lightweight-Mesh-Developer-Guide\\_Application-Note\\_AVR2130.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42028-Lightweight-Mesh-Developer-Guide_Application-Note_AVR2130.pdf)

