

Universidade da Beira Interior

Departamento de Engenharia Electromecânica



Covilhã | Portugal

Sistema de Monitorização da Humidade do Solo para Gestão Eficiente da Irrigação

Helder Filipe de Brito Neves

Eng.º Electromecânico

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Eng.
Electromecânica

Covilhã e UBI, Agosto de 2009



UBI
Covilhã
Portugal

Dissertação realizada sob a orientação científica de,
Professor Doutor Pedro Miguel Figueiredo Dinis Oliveira Gaspar

e co-orientação de,
Professor Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo

e

Professor Doutor Bruno Jorge Ferreira Ribeiro

Professores Auxiliares
Departamento de Engenharia Electromecânica

Faculdade de Engenharia
Universidade da Beira Interior

*Aos meus pais, António e Ana,
e à Stephanie.*

Resumo

Hoje em dia, a energia e os recursos naturais são dos bens mais preciosos da humanidade. Entre estes, a água é um recurso natural com grande valor económico, ambiental e social, fundamental à subsistência e bem-estar da vida na Terra. A má utilização deste recurso tornou-se uma preocupação geral devido à diminuição da água potável em todo o planeta. Nesta dissertação é descrito um sistema tecnológico de baixo custo e reduzido consumo energético capaz de elaborar sistematicamente um plano de gestão eficaz de irrigação, em função das características ambientais e do solo em estudo. O sistema de monitorização da humidade do solo é constituído por sensores da humidade com sistema de comunicação sem fios (utilizando o protocolo ZigBee) incluído na ferramenta de desenvolvimento *Texas Instruments* ez430-RF2480, que integra um microcontrolador MSP430F2274 e uma *interface* de rede CC2480; um módulo de análise de dados onde confluem todos os dados; e um sistema de actuação destinado a efectuar a irrigação. Estes dispositivos de sensorização em rede da humidade do solo, permitem elaborar um plano de gestão da irrigação de uma área agrícola. Este plano de gestão permite uma maior eficiência na utilização da água e também uma cultura mais saudável, já que a obtenção de um mapa de humidade, permite evidenciar a distribuição espacial da necessidade de água, aumentando o tempo de rega se o solo se encontrar seco, e impedindo a rega em zonas onde o solo esteja demasiado húmido, dependendo do tipo de plantação.

Palavras Chave

Controlo da Irrigação
Monitorização do Solo
Sensor de Humidade do Solo
Redes sem fios (ZigBee)
ez430-RF2480

Abstract

Nowadays, energy and natural resources are the most important assets of humanity. Among these, water is a natural resource with huge economical, environmental and social value, fundamental to the livelihoods and welfare of life in Earth. The poor use of this resource became a main concern, due to the reduction of drinking water across the planet. In this dissertation is described a low cost and low energy consumption technologic system, capable of developing an effective systematic irrigation plan, taking into account some environmental characteristics and the soil in study. The monitoring system of the soil moisture is made by moisture sensors connected to a wireless communication system (using the ZigBee protocol) included in the Texas Instruments development tool eZ430-RF2480, witch integrates a microcontroller MSP430F2274 and a network interface CC2480, a data analysis module where all information converge, and an actuation system that performs the irrigation. This sensing devices connected in a network allow to create a management plan for the irrigation of an agricultural area. This plan allows greater efficiency in water use and also a more healthy cultivation, as the creation of a moisture map can show the spatial distribution of water need, increasing the time of watering if the soil is dry, and preventing too much irrigation in soil areas too wet, depending on the type of irrigation.

Keywords

Irrigation Control

Soil Monitoring System

Soil Moisture Sensor

Wireless Network (ZigBee)

ez430-RF2480

Agradecimentos

A execução desta dissertação que agora apresento, resultou num trajecto ao longo do qual fui recebendo o apoio, a crítica e estímulo de muitas pessoas. Estas ajudaram a ultrapassar as várias contrariedades propícias a este tipo de trabalho. Concerteza a sua contribuição ajudou a enriquecer este trabalho.

Assim presto a todos o mais profundo agradecimento. Ao Professor Doutor Pedro Miguel Figueiredo Dinis Oliveira Gaspar, como orientador científico, desejo expressar o meu profundo agradecimento pela motivação e orientação da presente dissertação. Desde o momento em que definimos a ideia de trabalho, e depois pelas valiosas sugestões teóricas e metodológicas, críticas formuladas, dúvidas esclarecidas e revisão do trabalho, que levou que este esteja muito mais completo. Pelo seu acompanhamento quero expressar a minha profunda gratidão.

Agradeço de igual modo aos co-orientadores, Professor Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo e Professor Doutor Bruno Jorge Ferreira Ribeiro, pelo constante acompanhamento aliado às sugestões, que tanto ajudaram na elaboração deste trabalho.

Não posso deixar de agradecer aos meus amigos e companheiros de tantas horas no Laboratório de Instrumentação e Robótica da Universidade da Beira Interior, Eng^o Bruno Abreu, Eng^o Henrique Teixeira, Eng^o Filipe Casimiro e Eng^o Daniel Almeida pelo apoio e sugestões ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Para finalizar, deixo um enorme e especial agradecimento aos meus pais, pelo suporte apoio e paciência durante este tempo, bem como à minha irmã, cunhado e sobrinha. Quero agradecer ainda pelo apoio, amizade e palavras de incentivo ao Sr. Duarte, D. M^a de Jesus, Sr. Mota e D. Lurdes. Como não podia deixar de ser, tenho de agradecer especialmente, o enorme apoio e paciência da minha namorada Stephanie Duarte, que apesar de não ter conhecimentos da área tentou sempre dar o seu contributo.

Conteúdo

Resumo	iii
Abstract	iv
Agradecimentos	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Nomenclatura	xiv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento Geral	1
1.2. Objectivos	1
1.3. Conteúdo da Dissertação	2
1.4. Enquadramento do Sistema	2
1.5. Descrição do Sistema	4
2. Estado da Arte	7
3. Solo, Plantas, e suas Relações	13
3.1. Solo	13
3.1.1. Formação do Solo	13
3.1.2. Propriedades Físicas do Solo	13
3.1.2.1. Textura	14
3.1.2.2. Estrutura	15
3.1.2.3. Consistência	16
3.1.2.4. Densidade	16
3.1.2.5. Cor	16
3.1.2.6. Temperatura	17

Conteúdo

3.1.3.	Perfil dos Solos	17
3.1.4.	Aragem do Solo	18
3.2.	Relação do Solo com a Água	18
3.3.	Relação das Plantas com a Água	19
3.4.	Relação das Plantas com o Oxigénio	20
3.5.	Relação da Água com o Oxigénio no Solo	21
3.6.	Plantas e as suas Raízes	22
3.7.	Gestão da Água	22
3.7.1.	Irrigação	23
3.7.2.	Taxa e Momento da Irrigação	28
3.7.3.	Qualidade da Água	28
3.7.4.	Importância da Utilização de Sensores na Gestão da Água	30
3.8.	Cálculos Básicos para Conhecimento de Quantidade da Irrigação	31
4.	Módulo de Sensorização	34
4.1.	Métodos de Medição da Humidade do Solo	34
4.1.1.	Métodos de Medição	37
4.1.1.1.	Medição da Humidade Gravimétrica do Solo pelo Método Directo	37
4.1.1.2.	Métodos Radiológicos (Método Indirecto)	37
4.1.1.3.	Sensores Dieléctricos (Método Indirecto)	38
4.1.1.4.	Instrumentação de medição do potencial do solo	38
4.1.2.	Relação entre os dois Métodos (VWC vs SWT)	40
4.2.	Seleccção do Sensor	40
4.2.1.	Sensores Excluídos	41
4.2.2.	Sensores Seleccionados	46
4.3.	Leitura do Sinal dos Sensores	50
4.3.1.	Medição da Resistência	51
4.3.2.	Relação da Humidade do Solo com a Resistência do Sensor	54
5.	Módulo de Comunicação Sem Fios	56
5.1.	Comunicação Sem Fios	56
5.2.	ZigBee	58
5.2.1.	Arquitectura do Protocolo	61
5.2.2.	Funcionamento Geral	62
5.2.3.	Estrutura do Frame	65
5.3.	Seleccção do Sistema a Utilizar	67

Conteúdo

5.3.1. Sistema a Utilizar	68
5.3.2. Recursos do MSP430F2274	69
5.3.3. Aplicação Experimental do Kit	71
5.3.4. Funcionamento da Rede e os Pacotes de Informação (Exemplo de Aplicação)	72
5.3.5. Comunicação por cabo do <i>Kit</i>	74
5.4. Código do Exemplo de Aplicação	77
5.4.1. Abordagem ao Código	77
5.4.2. Análise do Código	78
5.4.3. Alteração do Código	81
6. Módulo de Análise dos Dados	87
6.1. Composição e Funcionamento	88
6.2. Análise de Dados	89
7. Módulo de Actuação/Irrigação	92
7.1. Considerações de <i>Design</i>	92
7.2. Componentes	93
7.3. Gestão e Manutenção do Sistema de Actuação/Irrigação	95
8. Análise de Resultados	96
8.1. Teste Experimental aos Sensores	96
8.2. Testes Experimentais ao Sistema de Comunicação	101
8.3. Estudo Económico	101
8.3.1. Custo Previsto do Sistema	102
8.3.2. Aplicabilidade no Mercado	103
9. Conclusão	104
9.1. Contribuições do Trabalho	104
9.2. Trabalhos Futuros	107
Bibliografia	109
A. Anexo - Pinout e Esquema de Ligações do Kit eZ430-RF2480	113
B. Anexo - Profundidades de Colocação dos Sensores	115
C. Anexo - Tabelas de Gráficos	117

Lista de Figuras

1.1. Diferentes tipos de irrigação.	4
1.2. Representação dos vários blocos representativos do sistema de irrigação.	5
1.3. Exemplo de um mapa de humidade do solo.	6
3.1. Gráfico triangular de texturas do solo (Foth, 1990).	15
3.2. Representação de um pédon ideal (Roque <i>et al.</i> , 2001).	18
3.3. Relação da textura do solo com a capacidade deste de retenção de água (Foth, 1990).	19
3.4. Tipos de estado do solo em relação à quantidade de água (DTI, 2004).	20
3.5. Relação entre a camada freática com o ar e com a zona das raízes (Foth, 1990).	21
3.6. Fotografia de uma cultura onde é utilizada irrigação por cheia.	24
3.7. Representação de um sistema de rega por inundação de regos.	25
3.8. Representação do solo húmido com o método de irrigação por regos.	25
3.9. Fotografia da utilização de aspersores numa determinada cultura.	26
3.10. Figuras representativas da utilização de um pivô na irrigação.	27
3.11. Representação de irrigação gota a gota.	27
4.1. Relação entre VWC e SWT.	40
4.2. Sensores da Decagon.	41
4.3. Sensor de humidade do solo da Vernier (Vernier Software & Technology, 2009).	42
4.4. Sensores da Delta-T (Delta-T Devices, 2007).	43
4.5. Sensor SM100 da Spectrum.	44
4.6. Sensor SM100 da Spectrum (IMKO, 2009).	45
4.7. Fotografia do sensor GB-1 da Delmhorst.	46
4.8. Fotografia do sensor Watermark.	48
4.9. Sensor VG-400 da Vegetronix.	49
4.10. Fotografia do Medidor Watermark.	51
4.11. Circuito de excitação do sensor.	52
4.12. Circuito do oscilador RC (FSC, 1998).	52

LISTA DE FIGURAS

4.13. Circuito do sensor.	53
5.1. Tecnologias de redes sem fios.(da Silva, 2007)	57
5.2. Topologia ZigBee em estrela (da Silva, 2007).	59
5.3. Topologia ZigBee em malha (da Silva, 2007).	60
5.4. Topologia ZigBee em Árvore (da Silva, 2007).	60
5.5. Arquitectura do protocolo ZigBee.	61
5.6. Representação da estrutura do Superframe com GTSs e CFP. (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007)	63
5.7. Representação da comunicação para o Coordenador numa rede com <i>beacon</i> activo (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).	64
5.8. Representação da comunicação do Coordenador para um dispositivo na rede numa rede com <i>beacon</i> activo (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).	65
5.9. Representação do <i>frame</i> do <i>beacon</i> quando este está activo (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).	66
5.10. Representação do <i>frame</i> de dados (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).	66
5.11. Representação do <i>frame</i> de validação e recepção de dados (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).	67
5.12. Representação do <i>frame</i> de comandos MAC (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).	67
5.13. a) <i>Target Board</i> b) <i>Emulater Board</i> c) <i>Battery Board</i> (Texas Instruments, 2008f).	68
5.14. Placas do módulo de demonstração eZ430-RF2480 (Texas Instruments, 2008f).	69
5.15. <i>Screenshot</i> do Sensor Monitor (Texas Instruments, 2008f).	71
5.16. Pacotes de dados registados pelo <i>Packet Sniffer</i> na tentativa do Coordenador em formar rede.	72
5.17. Pacotes de dados registados pelo <i>Packet Sniffer</i> na tentativa de um <i>Router</i> em ligar-se à rede.	73
5.18. Pacotes de dados no início da transmissão das leituras realizadas pelo <i>Router</i>	74
5.19. Pacotes de dados da tentativa de associação à rede de um <i>End Device</i>	74
5.20. Representação das comunicações dos dispositivos em cada placa (Texas Instruments, 2008f).	75
5.21. Representação do método de comunicação por SPI em modo <i>Master</i> . (Texas Instruments, 2008c)	76
5.22. Representação do modo de funcionamento do UART (Texas Instruments, 2008c).	77
5.23. Representação do formato das comunicações por UART (Texas Instruments, 2008c).	78

LISTA DE FIGURAS

5.24. Fluxograma simplificado das funções realizadas pela aplicação ZASA.	80
5.25. Representação dos portos na <i>Target Board</i> (Texas Instruments, 2008e)(Texas Instruments, 2008d).	86
6.1. Representação da Unidade Central de Dados.	87
6.2. Representação dos componentes da UCD.	88
6.3. Mensagens de dados recebidas pelo Coordenador.	89
6.4. Representação da análise de dados.	90
6.5. Fluxograma de funcionamento da UCD	91
8.1. Circuito de condicionamento do sinal do sensor.	97
8.2. Gráfico da variação da resistência do sensor de humidade durante três dias. .	98
8.3. Fotografia do vaso experimental.	99
8.4. Resultados da experiência de comparação de medições.	99
A.1. <i>Pinout</i> do MSP430f2274.	113
A.2. Esquema de Ligações da <i>Target Board</i> do kit eZ430-RF2480 (Texas Instruments, 2008e).	114

Lista de Tabelas

3.1. Tamanho dos compostos do solo. Segundo o <i>International Soil Science Society System</i> (Foth, 1990).	14
3.2. Tabela com os limites permissíveis de Boro em algumas classes para determinadas tolerâncias de plantas [em partes por milhão de água] (Foth, 1990).	29
3.3. Tabela das profundidades efectivas de raízes de algumas culturas (MAFF, 2002).	32
3.4. Tabela da capacidade de armazenamento de água para cada tipo de solo (MAFF, 2002).	32
3.5. Tabela dos coeficientes das necessidades das culturas (MAFF, 2002).	33
4.1. Tabela de especificações dos sensores da Decagon (Decagon Devices, 2008). .	42
4.2. Tabela de especificações do sensor de humidade do solo da Vernier (Vernier Software & Technology, 2009).	43
4.3. Tabela de especificações dos sensores da Delta-T (Delta-T Devices, 2007). .	44
4.4. Tabela de especificações do sensor SM100.	44
4.5. Tabela de especificações do sensor SM100 (IMKO, 2009).	45
4.6. Tabela de especificações do sensor GB-1 da Delmhorst (Delmhorst, 2003). . .	46
4.7. Tabela de especificações do sensor GB-1 da Delmhorst (Delmhorst, 2003). . .	48
4.8. Tabela de especificações dos sensores da Decagon. (Decagon Devices, 2008) .	49
4.9. Tabela de relação entre SWT e o momento indicado para irrigar.	55
4.10. Tabela de relações entra a resistência do sensor GB -1 com SWT e VWC. . .	55
8.1. Tabela de preços dos componentes num sistema de dois medidores e receptor.	102
B.1. Profundidade sugerida a que se deve colocar o sensor Watermark segundo o tipo de colheita.	115
B.2. Continuação da tabela B.1.	116
C.1. Tabela dos valores de Resistência do Sensor.	117
C.2. Tabela dos valores dos sensores.	118

LISTA DE TABELAS

C.3. Tabela dos valores dos sensores. 119
C.4. Tabela dos valores dos sensores. 120

Nomenclatura

Geral

<i>ACW</i>	Coeficiente da necessidade de água, [%].
<i>AWSC</i>	Capacidade de armazenamento de água pelo solo, [mm/m].
<i>C</i>	Capacidade eléctrica, [<i>F</i>].
<i>f</i>	Frequência eléctrica, [<i>Hz</i>].
<i>I</i>	Corrente eléctrica, [<i>A</i>].
<i>M</i>	Massa, [<i>kg</i>].
<i>MSWD</i>	Défice máximo de água no solo, [%].
<i>R</i>	Resistência eléctrica, [Ω].
<i>RD</i>	Profundidade das raízes, [<i>m</i>].
<i>SWS</i>	Quantidade de água armazenada, [<i>mm</i>].
<i>SWT</i>	Tensão no solo, [<i>cbar</i>].
<i>s</i>	Salinidade presente no solo.
<i>T</i>	Temperatura, [$^{\circ}C$].
<i>t</i>	Tempo, [<i>s</i>].
<i>V</i>	Queda de tensão, [<i>V</i>]; Volume, [m^3].
<i>V(ADC)</i>	Tensão medida pelo ADC, [<i>V</i>].
<i>x</i>	Valor da conversão do ADC.

Simbologia Grega

α	<i>Duty cycle</i> , [%].
θ	Conteúdo de água, [%].
ρ	Massa específica, [g/cm^3].
<i>T</i>	Período, [<i>s</i>].
ψ	Potencial, [<i>Pa</i>].

LISTA DE TABELAS

Índices Inferiores

<i>b</i>	Solo seco (<i>bulk</i>).
<i>g</i>	Gravimétrico.
<i>i</i>	Numeração (índice mudo).
<i>m</i>	Mátrico.
<i>o</i>	Osmótico.
<i>p</i>	Pressão.
<i>pp</i>	Pico a pico
<i>R</i>	Referência.
<i>REF</i>	Referência.
<i>RMS</i>	Valor eficaz (<i>Root-mean-square</i>).
<i>s</i>	Solo.
<i>spl</i>	Amostra (<i>sample</i>).
<i>t</i>	Total.
<i>v</i>	Volumétrico.
<i>w</i>	Água (<i>water</i>).
<i>z</i>	Gravitacional.

Siglas

AC	Corrente alternada (<i>Alternate Current</i>).
AF	(<i>Application Framework</i>).
ADC	Conversor Analógico-Digital (<i>Analogic-Digital Converter</i>).
APP	Aplicação (<i>Application</i>).
APS	Perfil de suporte à aplicação (<i>Application Profile Support</i>).
CAP	(<i>Contention Access Period</i>).
CCA	Verificação da disponibilidade do canal (<i>Clear Channel Assessment</i>).
CFP	Período de contenção livre (<i>Contention Free Period</i>).
CSMA-CA	(<i>Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance</i>).
DC	Corrente contínua (<i>Direct Current</i>).
DCO	Oscilador controlado digitalmente (<i>Digitally Controlled Oscillator</i>).
DSSS	Espectro de sequência directa (<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>).

LISTA DE TABELAS

ED	Detector de energia (<i>Energy Detection</i>).
FFD	Dispositivo de capacidade completa (<i>Full Function Device</i>).
IEEE	Instituto dos engenheiros electromecânicos e electrotécnicos (<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i>).
GPIO	Portos de entrada/saída para aplicações gerais (<i>General Purpose Input Output</i>).
GPS	Sistema de posicionamento global (<i>Global Positionig System</i>).
GTS	Espaços reservados no frame (<i>Guaranteed Time Slots</i>).
HAL	Camada de hardware (<i>Hardware Abtraction Layer</i>).
ISM	Industrial científico e médico (<i>Industrial Scientifical and Medical</i>).
LQI	Avaliação de canal (<i>Link Quality Indication</i>).
LSB	Bit menos significativo (<i>Least Significant Bit</i>).
MAC	Camada de controlo ao acesso às comunicações (<i>Medium Access Control Layer</i>).
MSB	Bit mais significativo (<i>Most Significant Bit</i>).
MT	(<i>Monitor-Test</i>).
NMM	Medidor de neutrões da humidade do solo(<i>Neutron Moisture Meter</i>).
NWK	Camada de rede (<i>Network Layer</i>).
PHY	Camada física (<i>Physical Layer</i>).
PWM	Largura de modelação (<i>Pulse Width Modulation</i>).
RF	Rádio-frequência (<i>Radio Frequency</i>).
RFD	Dispositivo de capacidade limitada (<i>Reduced Function Device</i>).
RPC	Procedimento de requisição remota (<i>Remote Procedure Call</i>).
SAR	Taxa de absorção de sódio (<i>Sodium Absorption Rate</i>).
SPI	Interface de comunicações série com periféricos (<i>Serial Peripheral Interface</i>).
SWT	Tensão no solo realizada pela água (<i>Soil Water Tension</i>).
UART	Receptor/transmissor universal assíncrono (<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>).
USB	Porta série universal (<i>Universal Serial Bus</i>)
USCI	Interface de comunicações série (<i>Universal Serial Communication Interface</i>).
VWC	Volume de conteúdo de água no solo (<i>Volume Water Content</i>).
WLAN	Rede sem fios local (<i>Wireless Local Area Network</i>).
WMAN	Rede sem fios metropolitana (<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>).
WPAN	Rede sem fios pessoal (<i>Wireless Personal Area Network</i>).
WWAN	Rede sem fios de vasta área (<i>Wireless Wide Area Netwok</i>).
ZASA	Aplicação ZigBee (<i>ZigBee Accelerator Sample Aplication</i>).

LISTA DE TABELAS

ZDO (*ZigBee Device Object*)

1. Introdução

1.1. Enquadramento Geral

Hoje em dia a energia e os recursos naturais da Terra são dos bens mais preciosos da humanidade e prevê-se que o sejam cada vez mais. Assim todos os esforços, no sentido de consumir menos energia e recursos naturais, são extremamente importantes.

A água é um recurso natural com grande valor económico, ambiental e social, fundamental à subsistência e bem-estar da vida na Terra. Hoje em dia, a má utilização deste recurso tornou-se uma preocupação geral, devido à diminuição da água potável em todo o planeta. Pode-se dizer que apenas 1% da água da Terra é utilizável, visto que 97,5% da água é salgada e a restante encontra-se em locais inacessíveis ao Homem. A poluição, a má gestão da água e as alterações climáticas contribuem para a diminuição dos recursos hídricos do planeta, como refere Rianço (2005).

Desta forma, a utilização deste recurso tem de se realizar de forma mais racional, e medidas nesse sentido necessitam de ser criadas. Tanto a nível governamental como a nível individual tem de começar a existir uma melhor consciência ambiental, face ao uso da água, bem como de outros recursos naturais importantes para a vida.

1.2. Objectivos

Tendo em conta as condicionantes descritas no ponto 1.1, tem-se como objectivo principal para esta dissertação definir um sistema tecnológico que aglomere diferentes funções, destinado à elaboração sistemática de um plano de gestão eficaz da irrigação em função das características ambientais e do solo em estudo. Este sistema tem ainda de ter um baixo custo, para que se demonstre que o investimento em tecnologia na área agrícola e de paisagismo tem sentido, e pode criar rendimento, para além de ambiental, também económico.

Para alcançar essa meta, num primeiro plano tem que se reconhecer as dificuldades que hoje se vivem na utilização da água, em particular na área da irrigação (quer seja de grandes plantações agrícolas até aos mais pequenos jardins). Para isso várias noções de geologia e agricultura são expostas. De seguida é realizada uma pesquisa sobre dispositivos já disponíveis

1. Introdução

no mercado, com os quais é elaborado o sistema de monitorização da humidade do solo, tais como os sensores e sistema de comunicação. Este sistema é composto por vários módulos diferentes. Cada módulo tem componentes que podem ser adquiridos ou construídos de raiz. Tendo estes de ser conjugados de modo a que o sistema funcione e interaja convenientemente.

O objectivo final é, mediante as dificuldades, cada vez maiores, de nos nossos dias em dispor de água potável, fornecer informação na elaboração de um sistema tecnológico de apoio a uma área com vital importância como é a agricultura. Adicionalmente, tenciona permitir o conhecimento de diferentes características da produção agrícola e aí aplicar métodos de monitorização das condições de humidade do solo e de actuação condicionada dos sistemas de irrigação.

1.3. Conteúdo da Dissertação

Neste primeiro capítulo é apresentado o problema para o qual se vai definir uma possível solução, estabelecer os objectivos a alcançar e os passos necessários para os atingir. De seguida, no segundo capítulo, é apresentada uma breve pesquisa da investigação e novas aplicações já disponíveis, nesta área. O capítulo seguinte, o terceiro, é dedicado à temática da geologia e agricultura, onde são descritos os conceitos básicos necessários ao conhecimento dos solos, da água, das plantas e as suas relações, para uma melhor compreensão dos métodos e características das irrigações. Nos capítulos seguintes, é realizada uma descrição, módulo a módulo, do sistema de monitorização da humidade do solo, das características, das pesquisas, escolha de dispositivos e do seu funcionamento. Visto que este sistema tem uma aplicação prática e real, no capítulo seguinte, apresenta-se a descrição e análise aos testes experimentais de alguns componentes do sistema, bem como do custo de todos os componentes. Ficando a conhecer o investimento necessário para uma possível aplicação deste sistema. Por fim, um último capítulo onde são discutidas as conclusões, baseadas nos objectivos inicialmente propostos e onde são indicadas as perspectivas de trabalho futuro nesta temática.

1.4. Enquadramento do Sistema

A produção agrícola realizada com apoio de sistemas de irrigação fornece a maioria da reserva de alimentos do mundo. Aproximadamente 50% do total anual de utilização de água dentro dos limites urbanos é utilizado em irrigação de relvados, jardins e locais semelhantes. Constata-se desta forma, um aumento de pressões económicas, políticas e ambientais visando a eliminação do desperdício de água (neste caso da irrigação) e utilização racional dos recursos energéticos, tanto na agricultura como em paisagismo. Demasiada irrigação resulta na erosão

1. Introdução

do solo, aumenta a probabilidade de contaminação da superfície (saís) e da água no subsolo e leva ao aumento do uso de químicos e fertilizantes. No caso contrário, pouca irrigação causa estragos na colheita e na qualidade de algumas culturas. A irrigação de algumas culturas mais sensíveis ao déficit de água (como, tomates, cebolas, etc.), são favorecidas com a utilização de um sistema de gestão e monitorização da água do solo, como é referido em Shock *et al.* (1998).

Como se mencionou no ponto 1.1, a gestão da água potável é cada vez mais uma circunstância essencial para um futuro saudável. Como foi exposto anteriormente, uma das situações onde existe um enorme desperdício de água é na irrigação de áreas agrícolas, jardins e locais similares. A irrigação, apesar de ser necessário efectuarla frequentemente, não é uma actividade obrigatoriamente regular, ou seja, pode ser realizada apenas quando o solo tiver pouca humidade e a respectiva vegetação necessite de água. Na irrigação regular acontece com muita frequência ter excesso de humidade no solo. Isto acontece quando a vegetação não necessita que lhe seja adicionada água, e ao irrigar (no momento programado) o solo fica num estado de saturação. Com isto a cultura ressent-se devido ao excesso de água, encontrando-se num estado semelhante ao afogamento. Esta quantidade de água foi mal utilizada e com resultados negativos aos pretendidos. Estes problemas referentes à má utilização da água acontecem devido à utilização de métodos desactualizados de irrigação, em que pouco ou nenhum controlo é realizado. Existem já alguns procedimentos que realizam a gestão eficiente da irrigação, processos esses que têm algum investimento associado, recuperável em poupança energética e ambiental. Diferentes métodos de irrigação encontram-se caracterizados na figura 1.1.

Para resolver este problema, a utilização de sistemas tecnológicos com o intuito de promover uma poupança na utilização de água, realizando uma gestão da mesma tendo em conta as necessidades das plantas, são vistos como uma solução interessante. Deste modo, surgiu a motivação de elaborar um sistema que incorpore vários módulos diferentes que em conjunto levem a uma gestão eficiente da água, quer seja numa grande área agrícola, como num pequeno jardim ou até num campo de golfe. A aplicabilidade diferenciada é um ponto essencial que estes sistemas têm de ter como vantagem, tal como a facilidade de instalação e utilização.

Com este tipo de sistemas de controlo de irrigação, pretende-se reconhecer os locais em que mais é necessário irrigar, e a quantidade de água necessária (variando o tempo de rega). Assim, adquire-se um controlo muito maior em grandes plantações, onde uma irrigação completa e sistemática pode implicar enormes custos. A utilização de demasiada água provoca para além de custos elevados uma diminuição na qualidade da plantação. Empiricamente sabe-se que

1. Introdução

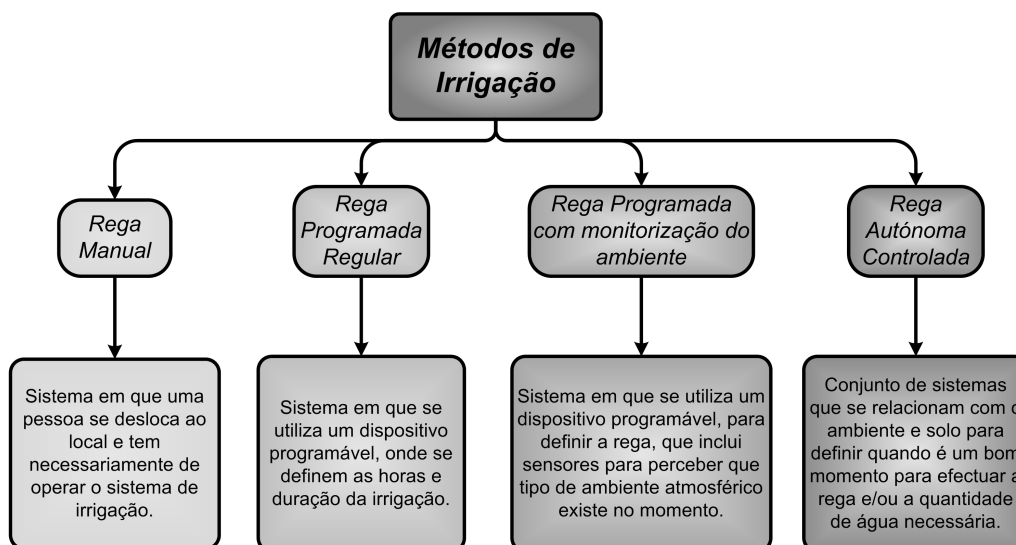


Figura 1.1.: Diferentes tipos de irrigação.

qualquer planta ou árvore que estiver num solo com demasiada água não cresce de forma saudável e pode até morrer. Com este sistema pode-se facilmente definir valores de quantidade de água diferentes em solos diferentes para plantações diferentes e para diferentes dimensões. Estas são vantagens muito importantes do ponto de vista da rentabilidade económica e do ponto de vista ecológico, no que diz respeito à poupança deste recurso natural.

1.5. Descrição do Sistema

Este sistema para funcionar de forma a efectuar um plano de rega de uma dada área tem de conter vários blocos diferentes, interligados entre si, para que o processo de irrigação seja eficaz, localizado e preciso. Estes blocos ou módulos consistem em sistemas que são adquiridos em lojas especializadas, que por si só realizam uma determinada função e que serão alterados, definidos ou acoplados, para realizarem uma tarefa necessária ao funcionamento global do sistema. Este sistema está dividido em quatro grandes módulos, como se pode ver na figura 1.2. Qualquer um destes blocos tem um funcionamento específico e necessário ao módulo seguinte.

Sucintamente, o primeiro módulo do sistema é o bloco de leitura e aquisição de dados. Este é composto por sensores, que medem a humidade presente no solo. Para isso têm o apoio de alguma instrumentação necessária a condicionar o sinal de modo que este seja lido

1. Introdução

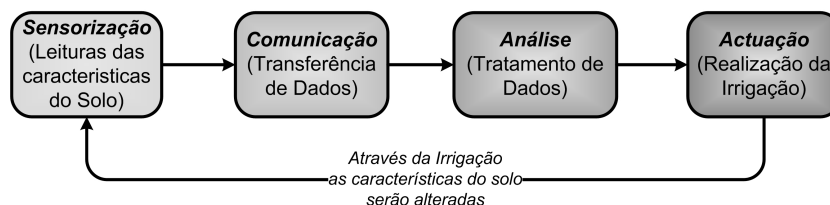


Figura 1.2.: Representação dos vários blocos representativos do sistema de irrigação.

posteriormente com o mínimo de ruído e erro possível.

De seguida surge o segundo módulo, o bloco de comunicações entre os vários pontos de leitura do solo e a unidade central onde são analisados os dados. A comunicação é realizada com a transmissão de dados sem fios (pelo microcontrolador acoplado a um dispositivo de comunicações de rádio-frequência), com outros dispositivos semelhantes que transferem a informação até ao destino.

O terceiro módulo corresponde ao sistema caracterizado como a unidade central, e é onde todos os dados da área agrícola em estudo são recolhidos e analisados, de forma a avaliar as zonas onde é necessário irrigar e o tempo que esta deve durar, ou seja, neste ponto é feito um estudo de onde e da quantidade de água necessária na irrigação.

Por fim tem-se o último módulo, que consoante a análise efectuada no módulo precedente, é encarregue de actuar no sistema de irrigação, de modo a que se verifique a utilização eficaz da água segundo foi determinado.

Com todos estes módulos funcionando em conjunto, de um ponto de vista mais prático é adequado que este sistema possibilite a elaboração de um mapa onde segundo a colocação dos sensores de medição de humidade do solo e dos dados analisados, um sistema de processamento possa criar uma malha e por interpolação resultar um mapa de humidade, como se pode visualizar na figura 1.3 (esta foi elaborada com apoio de um *software* de cálculo computacional, meramente para apoio ao texto). Deste mapa de humidade e dependendo do tipo de plantação, é elaborado o plano de irrigação para os pontos necessários, aumentando o tempo de rega se o solo se encontrar seco, e até não regando em zonas onde o solo esteja demasiado húmido. Claro que a quando de uma nova medição todo o processo será realizado novamente e um novo plano de irrigação será elaborado.

1. Introdução

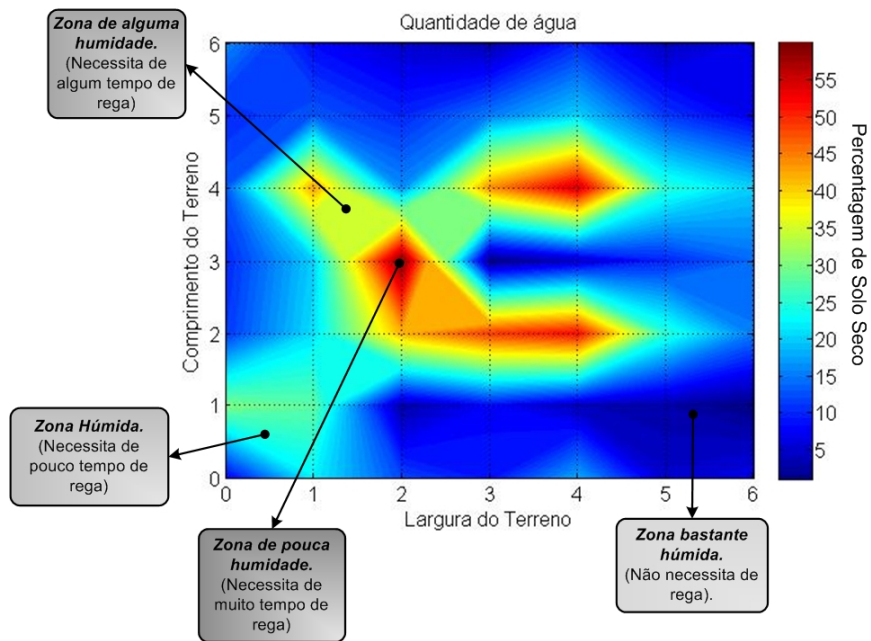


Figura 1.3.: Exemplo de um mapa de humidade do solo.

2. Estado da Arte

A pressão sobre os recursos hídricos está a aumentar, criando a necessidade dos agricultores utilizarem melhor a água na irrigação, tendo em vista uma poupança hídrica e melhoramento da produtividade. No entanto, as opiniões dos agricultores sobre a irrigação, são muitas vezes vistas como negativas e a ignorar, embora devam ser levadas em consideração (Ertsen, 2009).

A manipulação dos fluxos de água, adaptando a sua disponibilidade no tempo e espaço, pela construção de sistemas de irrigação, permite o aumento de área agrícola e ainda o aumento de colheitas na mesma produção.

Na época medieval, os sistemas de irrigação (canais para deslocar o fluxo de água) eram simplesmente um excelente instrumento para desenvolvimento económico e produção de alimentos. Na década de 50 todo o processo de projecto e construção destes sistemas era baseado em regras empíricas. Assim, os mais antigos sistemas de irrigação foram dimensionados com bastante ênfase nos aspectos físicos de construção, em detrimento do procedimento de gestão da irrigação. Analisando estes sistemas, cedo se concluiu que melhoramentos podiam existir, no que à gestão da água dizia respeito, tornando-se este num tema cada vez mais importante.

Tentar com que os agricultores se instruissem para deixarem de praticar uma agricultura de subsistência e passarem a ter uma agricultura mais comercial é uma enorme e difícil tarefa (Ertsen, 2009).

Visto isto, o conceito de irrigação moderna tem sido associado à necessidade estratégica de fornecer água às culturas agrícolas no momento certo e na quantidade necessária. Esta situação leva ao estímulo no uso mais eficiente das irrigações, vindo substituir o método mais utilizado que consiste em regas sucessivas (Ertsen, 2009).

Usualmente encontra-se literatura dedicada a esta temática que indica um método de otimizar a utilização de água, e favorecer o crescimento saudável da plantação. Este baseia-se na aplicação de sistemas tecnológicos que controlem a irrigação de uma plantação.

O método básico de medição do conteúdo de água no solo consiste em recolher uma amostra de solo normal e pesá-la antes de qualquer perda significativa de água. De seguida coloca-se a mesma amostra num forno, para perder toda a água que contém, e finalmente

2. Estado da Arte

volta-se a pesar. A diferença no peso é dada pelo peso da água que se evaporou, e desse modo consegue-se obter a quantidade de água.

A primeira proposta tecnológica para medir o conteúdo de água no solo, *Neutron Moisture Meter* (NMM), baseado em métodos radioactivos, foi apresentada antes de 1950. Este método foi utilizado em todo o mundo, mas nas décadas de 70 e começou a perder influência na década de 80 devido ao aparecimento de sensores electrónicos mais baratos. Assim, desde os anos 70 um largo leque de tecnologias foi emergindo como a solução para a medição da humidade no solo. No entanto, em muitos desses novos sensores foram encontradas algumas deficiências como refere IAEA (2008).

Um número substancial de sensores de leitura de humidade do solo, de distintas tecnologias estão disponíveis hoje em dia. Alguns de fácil utilização, sendo mecanicamente e electronicamente fiáveis. No entanto, algumas tecnologias que se dizem capazes de medir o conteúdo de humidade no solo, são demasiado complexas para algumas aplicações e produzem resultados que têm pouca ou nenhuma relação com o real conteúdo de humidade no solo (IAEA, 2008).

Um estudo realizado em várias quintas de países da Ásia Central (Uzbequistão, Quirguistão e Tajiquistão), durante três anos permitiu avaliar a produtividade pela implementação de monitorização na irrigação das plantações das mesmas quintas. A informação recebida desta monitorização foi a base para o desenvolvimento das recomendações e alteração de métodos para aumentar a eficiência da irrigação, e a implementação de novos métodos de gestão agrícola (como utilização de fertilizantes de melhor qualidade) aumentando assim a produtividade. Durante o ano de 2002 apenas se realizou a monitorização da irrigação, e nos anos seguintes (2003 e 2004) foram aplicados alguns novos métodos com base na informação do primeiro ano. Esses métodos basearam-se principalmente na divisão do campo a regar em pequenas unidades (menos de 100 metros de largura), dependendo da topografia, do tipo de solo e das características hídricas; melhoramento do sistema de distribuição de água, subdividido a cada unidade de terreno; e ainda um cálculo computacional dos termos e taxas de irrigação. Para os cálculos das aplicações das taxas de irrigação, foram realizadas medições diárias da taxa de evaporação e do conteúdo de água do solo. Outro ponto a ter em conta é o aumento de custos relacionados com os meios de produção (trabalho manual e mecânico, fertilizantes, pesticidas, etc.). No entanto, obteve-se lucro devido ao aumento das produções e do preço de venda do mesmo produto. De um ponto de vista geral, a eficiência da irrigação aumentou de 52% em 2002 para 66% e 62% em 2003 e 2004 respectivamente (o ano de 2004 caracterizou-se por ser um ano muito seco nos locais do estudo). Assim, estes valores mostram que uma sustentabilidade relativa na gestão da irrigação foi alcançada. Desta forma conclui-se que houve um aumento no lucro de quatro vezes por unidade de área (hectare), a

2. Estado da Arte

eficiência na utilização da água aumentou três vezes, apesar de os custos totais também terem aumentado. Conclui-se assim que nesta situação a monitorização e mudança de métodos de irrigação e gestão agrícola potenciou a produção, a utilização controlada de água e os lucros dos produtores (Mukhamedjanov & Nerozin, n.d.).

Outro estudo foi dedicado à análise da utilização de sistemas deste tipo no combate à escassez e à competição por recursos hídricos entre a agricultura e outros sectores económicos (Grant *et al.*, 2008). Como exemplo, em áreas da Flórida (Estados Unidos da América) foram impostas restrições na quantidade de irrigação que se pode realizar. Assim, a adopção de estratégias de poupança de água, especialmente em áreas de intensa horticultura mas com limitados recursos hídricos é imprescindível. As necessidades de água nas árvores de fruto são relativamente conhecidas na literatura agrícola, no entanto para plantas ornamentais, não existe muita informação. A produção deste tipo de plantas (lenhosas de ornamentação) é realizada em viveiros. Com esta conjuntura, estes viveiros têm de aumentar a sua eficiência na irrigação, para se manterem nestes locais e obterem lucro.

Normalmente, a frequência e a quantidade de irrigação aplicada na maioria dos viveiros destinados a áreas comerciais baseiam-se na experiência pessoal, ou, e cada vez mais, em sistemas programáveis sistemáticos. Assim, este estudo visa conhecer outros métodos de gestão das irrigações. Um método consiste em conhecer a evaporação de água por transpiração das plantas. Outro método alternativo consiste em adquirir o valor da humidade do solo onde as plantas estão a crescer. Para estes dois métodos existe instrumentação de medida específica: para o primeiro, é usado um sensor de evaporação; para o segundo, é utilizado um sensor de medição de conteúdo de água no solo.

Este estudo foi elaborado utilizando seis viveiros diferentes, encontrando-se em cada um uma situação diferente: (1) variação do tipo de camada de protecção do solo (protecção de *Mypex* uma espécie de políteno, de areia ou pedras); (2) do sistema de irrigação (por diferentes aspersores, por um sistema de suporte aéreo e outro subterrâneo); e (3) do modelo de controlo da irrigação (com temporizador, sensor de humidade do solo e sensor de evapotranspiração das plantas).

Outro ponto importante é a colocação de diferentes espécies agrícolas no mesmo local, já que restringe uma gestão eficaz da irrigação, pois diferentes espécies têm diferentes necessidades de água. Também se observa que distintos sistemas de irrigação são mais ou menos favoráveis às várias espécies, ou seja, uma espécie pode receber uma irrigação óptima com um determinado sistema, e outra espécie pode receber óptima irrigação com outro sistema distinto. No entanto, uma irrigação óptima de uma planta é observada na qualidade da planta em detrimento do tamanho da mesma. A qualidade da planta tem muito mais influência no

2. Estado da Arte

mercado de plantas ornamentais que o seu tamanho.

Como resultado destes testes, observou-se que os novos sistemas de irrigação com aspersores resultam numa maior uniformidade da irrigação que o controlo usual utilizado nestes tipo de viveiros, traduzindo-se assim numa menor utilização de água. Concluiu-se ainda que o regime de irrigação com o sensor de humidade do solo (variando entre um valor mínimo onde inicia a rega e um máximo onde a termina), é o sistema que provoca menor número de irrigações, mas durante mais tempo que os outros sistemas. Pela comparação dos ensaios realizados, concluí-se que o sistema de sub-irrigação leva à melhor eficiência na utilização de água, no entanto levanta-se a questão se a redução na utilização de água justifica o investimento inicial num sistema deste tipo, pois necessita de estar perfeitamente nivelado, requerendo mais trabalho e custos na sua instalação, em comparação com os outros sistemas. No que diz respeito ao sistema baseado no sensor de medição da humidade do solo, observa-se algum desperdício de água quando o solo começa a ficar saturado, devido à maior duração da rega. Também se deve ter em conta que a utilização de poucos sensores em grandes áreas pode levar à irrigação de locais que não necessitam.

Concluindo, a redução no uso água nos sistemas de irrigação foi alcançada devido à uniformidade da irrigação, garantindo que todas as plantas recebam água em proporções similares, tendo em consideração a possibilidade de ajustar as regas com as flutuações diárias do clima e da humidade no solo. Ambos os métodos (evapotranspiração e humidade do solo) mostraram trabalhar de forma eficaz (Grant *et al.*, 2008).

A irrigação é um meio efectivo de aumentar a produção e produtividade agrícola. Um grande investimento tem vindo a ser feito em todo o mundo neste sector. No entanto, estudos concluem que nas últimas décadas o desempenho dos sistemas de irrigação, principalmente em grandes áreas, está muito abaixo das expectativas. Esta conclusão revela ainda que o investimento médio na irrigação custa o dobro do planeado e obtém resultados na ordem de metade do esperado, como refere Ambast *et al.* (2002).

A gestão e manipulação dos recursos hídricos, canais, solos e plantas requer conhecimentos técnicos para fornecer água à zona das raízes, na quantidade necessária e no tempo certo, para deste modo produzir mais e melhores alimentos. O objectivo destes sistemas consiste em distribuir água uniformemente pelo campo agrícola com o mínimo de perdas, assegurando a humidade certa no solo junto das raízes para assim obter uma boa colheita. Toda a interacção destes métodos que serão descritos em secções subsequentes, podem formar um sistema de irrigação bastante autónomo.

A avaliação remota por satélite oferece uma oportunidade de adquirir informação adicional de uma grande área e de forma frequente. Estes funcionam medindo a radiação emitida

2. Estado da Arte

e reflectida numa determinada largura de banda do espectro electromagnético sobre a área agrícola. No passado foram já utilizadas algumas técnicas de avaliação para melhor gestão de irrigação tendo a análise remota por satélite como base.

Através de esta foi conseguido prever a capacidade de reservatórios de água com base na área da superfície obtendo-se o volume de água disponível. Conhecendo o volume de água, uma melhor gestão da mesma é realizada.

Também o mapeamento da área a irrigar é possível através de interpretação visual, conseguindo este método calcular a área a irrigar com um coeficiente de determinação de 0,81 a 0,99.

Com mais pormenor ainda, é utilizado um método de identificação de diferentes plantações agrícolas, para deste modo melhor se conhecer a área onde existem diferentes necessidades de água.

Através da análise remota por satélite é também possível conhecer a condição de uma determinada plantação, pela presença de clorofila, já que esta é um indicador da condição de saúde da cultura. A clorofila tem determinadas características de reflexão em determinadas larguras de banda, ficando assim com possibilidade de ser medida pelo sistema de medição da radiação electromagnética do satélite.

A medição remota de humidade do solo promete ser um ponto de grande utilidade no futuro, pela medição da radiação electromagnética na banda visível e na banda próxima do infravermelho. Esta possibilidade viabilizaria o conhecimento total da humidade na zona das raízes da cultura, de uma grande plantação, informação esta que é importante para uma boa gestão da irrigação.

Solos impermeáveis e salinizados são as últimas conseqüências de um mau sistema de irrigação, que levam a uma colheita pobre e à acumulação de sal. Assim e também com apoio de um satélite consegue-se conhecer se um solo está a sofrer destas condições adversas.

Com estas potencialidades, a gestão de sistemas de irrigação é facilitada, tornando este recurso um meio muito importante. Utilizando este método em conjunto com os métodos mais comuns de medição no solo, obtém-se uma ferramenta prometedora no que à programação da irrigação diz respeito. Este método de utilização de sensorização remota tem feito consideráveis progressos, todavia requer mais recursos no que às técnicas de operacionalização diz respeito (Ambast *et al.*, 2002).

Com a diversificação das aplicações tecnológicas vocacionadas a suprir as exigências cada vez maiores de poupança energética e de consciência ambiental, pouco a pouco novos instrumentos aparecem no mercado para solucionar problemas nesta área da agricultura e dos recursos naturais. No entanto, esta evolução tecnológica numa área normalmente artesanal

2. Estado da Arte

é ainda desconhecida para a maioria das pessoas e só após alguma pesquisa, se começa a obter resultados no que toca a dispositivos tecnológicos que permitem solucionar problemas agrícolas e em específico da irrigação. Esta evolução tecnológica deve-se em parte à necessidade de rentabilizar grandes áreas agrícolas, o que implica diminuir custos (irrigação, trabalho humano, energia, etc..) com durabilidade longa, aliado à facilidade de investimento inicial que os donos destes latifúndios agrícolas dispõem. Muitas empresas e investigadores ao observarem esta necessidade no mercado começaram a trabalhar em soluções para estes problemas, que para além de serem rentáveis vieram também ajudar no ponto de vista ambiental. Assim, pode-se encontrar na internet empresas que disponibilizam várias soluções. Tendo em conta a irrigação, podem encontrar-se sistemas de controlo com base nas variações de características atmosféricas, com base em características do solo e alguns em ambas.

Como exemplo, a empresa Norte-Americana DIG Irrigation Products¹, fornece um número variado de soluções no controlo da irrigação com sistemas alimentados a energia solar, sistemas esses que podem ser de simples controlo da irrigação como estar incluídos em estações meteorológicas.

Outro exemplo é uma empresa australiana, WiSA Irrigation Solutions², que disponibiliza outro sistema similar, com medição de grandezas físicas do solo, como a humidade, que depois serão comunicadas a um computador central onde com um *software* específico será elaborado um plano de irrigação. Este sistema tem uma particularidade, que consiste na ligação das zonas de medição a uma única torre que comunicará com a unidade central, sendo esta alimentada também por energia solar.

Uma empresa europeia, Pessl Instruments³, fornece igualmente soluções na área de medição de grandezas atmosféricas e do solo. Controlando dessa forma a irrigação e ainda permite tirar conclusões sobre as culturas em outras áreas como o controlo de doenças, micro-clima, etc.

Outra empresa, a Sentek Sensor Technologies⁴, disponibiliza da mesma forma sistemas semelhantes de monitorização variáveis naturais para o controlo de irrigação. Estes sistemas ligam numa mesma torre (alimentada com energia solar) um número elevado de sensores, que comunica à posteriori com uma unidade central.

Em Portugal existe também uma empresa, Aquagriace⁵, que é distribuidora destes sistemas, em especial dos sistemas das empresas já referidas: Pessl Instruments e Sentek Sensor Technologies. Fornecendo assim também no nosso país soluções deste nível.

¹<http://www.digcorp.com/>

²<http://www.iisystems.com.au/>

³<http://metos.at/pessl/index.php?lang=en>

⁴<http://www.sentek.com.au/products/enviroscan.asp?lang=en>

⁵<http://www.aquagri.com/equipamentos.htm>

3. Solo, Plantas, e suas Relações

3.1. Solo

Consegue-se pensar numa substância que tenha tanta importância, na história da humanidade, como o solo? Todas as civilizações antigas tinham uma relação próxima com o solo. Pois neste cresceu o conceito de meio produtor de plantas e alimentos, que se mantém até aos nossos dias (Foth, 1990).

O solo pode ser visto como uma mistura de partículas minerais e orgânicas de variados tamanhos e composição. Estas partículas ocupam, mais ou menos, 50% do volume do solo, sendo que o restante 50% é composto por poros de múltiplas formas e tamanhos. Estes poros servem como canais para os movimentos de água e ar, para movimentos de pequenos animais e permitem o crescimento de raízes. As raízes funcionam como apoio das plantas no solo, e daí absorvem água, nutrientes e oxigênio.

3.1.1. Formação do Solo

A principal fonte de criação de solo é a fragmentação e alteração das rochas ao longo dos milhões de anos da Terra. Isto deve-se principalmente a dois processos diferentes a Meteorização e a Erosão. A Meteorização consiste na alteração das características da rocha sem que haja transporte de partículas. Esta pode ser mecânica (quando a composição química não é alterada) ou química (ocorrendo alteração química e formando novos minerais) (Roque *et al.*, 2001). No entanto, o solo também se pode formar através de Erosão, movimento e deposição de materiais de glaciares, por ventos, água, relevo e gravidade terrestre (Foth, 1990). O solo através destes processos é formado por variadas camadas com diferentes características.

3.1.2. Propriedades Físicas do Solo

Fisicamente o solo é composto por minerais e partículas orgânicas de variados tamanhos, sendo que aproximadamente 50% do solo é espaço vazio (poros), que é ocupado por água e ar. Essencialmente todos os solos dependem de certas propriedades físicas, tais como:

- Textura;

3. Solo, Plantas, e suas Relações

- Estrutura;
- Consistência;
- Densidade;
- Cor;
- Temperatura.

3.1.2.1. Textura

A formação do solo resulta em partículas de variadíssimos tamanhos, desde pedras, gravilha, areia, até silte ou lodo (partículas muito pequenas). Assim, o tamanho das partículas caracteriza a textura do solo, isto é, especificamente a textura é a proporção relativa de areia, argila e silte no solo.

Os componentes do solo são os grupos de minerais que têm menos de 2mm de diâmetro, e estão descritos na tabela 3.1.

Tabela 3.1.: Tamanho dos compostos do solo. Segundo o *International Soil Science Society System* (Foth, 1990).

Tipo de Solo	Diâmetro [mm]	Nº de partículas por grama	Área de superfície [cm²/g]
<i>Areia Grossa</i>	2 - 0,2	720	23
<i>Areia Fina</i>	0,2 - 0,02	46000	45
<i>Silte</i>	0,02 - 0,002	5776000	454
<i>Argila</i>	Abaixo de 0,002	90260853000	8000000

Um ponto de importante referência é que a superfície das partículas de argila é muito maior do que a de partículas de areia e de silte como se pode observar na tabela 3.1. Deste modo, um grama de argila absorve muito mais água que um grama de silte ou areia. Isto ocorre porque a absorção da água está intimamente relacionada com a área da superfície. A superfície da argila tem uma forma distinta (forma de prato) das outras partículas (forma esférica). Esta forma de prato contribui para uma grande área específica de superfície, onde camadas de água se colocam entre as várias partículas, funcionando como um lubrificante e dando à argila plasticidade quando molhada. No entanto, quando seca, as partículas em forma de prato têm uma grande área de contacto entre elas ficando assim a argila com uma certa rigidez.

3. Solo, Plantas, e suas Relações

A textura de um solo é expressa por classes, como mostra a figura 3.1. Como se pode observar, a soma das porcentagens de areia, silte e argila resultam na textura de um solo representado por um ponto no gráfico triangular (diagrama de Finetti), da figura 3.1 (Foth, 1990).

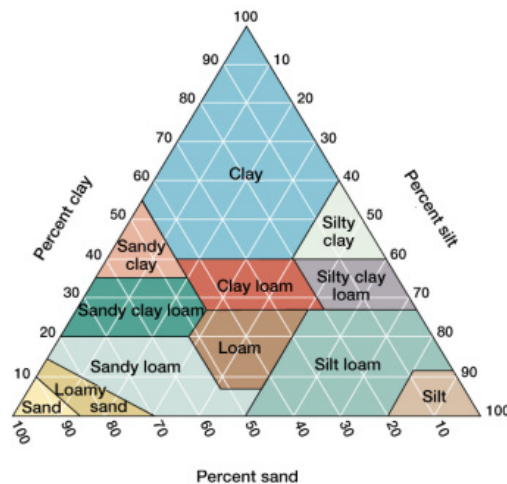


Figura 3.1.: Gráfico triangular de texturas do solo (Foth, 1990).

3.1.2.2. Estrutura

A estrutura do solo relaciona o arranjo em que as partículas constituintes do solo (areia, silte e argila) se encontram. Estes componentes em conjunto compõem partículas secundárias chamadas de aglomerados. A forma e tamanho destes aglomerados determinam a estrutura do solo.

A estrutura modifica a textura no que diz respeito à água, ao ar e à penetração das raízes no solo. O tamanho macroscópico destes aglomerados resulta em poros maiores que os já existentes entre os componentes do solo (areia, silte e argila). Estes aglomerados podem ser classificados quanto à sua forma: esféricos, côncavos (formas de prato), paralelepípedos (blocos) ou ainda prismáticos.

A estrutura do solo, na camada de superfície tem a vantagem (para o crescimento de plantas) de promover uma mais rápida infiltração da água no solo e também de armazenamento de água, dificultando deste modo a erosão do solo. No entanto, a estrutura da camada de solo pode ser alterada com a força das gotas da chuva e com o lavar das terras de cultivo (Foth, 1990).

3. Solo, Plantas, e suas Relações

3.1.2.3. Consistência

A consistência do solo é a resistência que este tem a deformar-se, ou seja, as propriedades coesivas de todo o solo como uma massa compacta. A consistência trata das forças entre as partículas de areia, de silte e de argila. A consistência do solo é um ponto importante a ter em conta considerando que este é normalmente lavrado (sachado ou mondado). Como exemplo, as dunas de areia têm pouca consistência enquanto que solos argilosos, quando molhados, tornam-se bastante viscosos (Foth, 1990).

3.1.2.4. Densidade

A massa específica ou densidade do solo é subdividida na densidade das partículas e na densidade volumétrica do solo no seu estado natural, ou seja incluindo as partículas e os espaços vazios entre elas (poros). A densidade média das partículas constituintes do solo é de $2,65g/cm^3$. A densidade volumétrica de um solo é inversamente relacionada com a porosidade, ou seja, se a porosidade é elevada a densidade volumétrica é diminuta (Foth, 1990).

Porosidade

O facto de os solos minerais terem por norma uma densidade média das partículas de $2,65g/cm^3$ e uma densidade volumétrica de $1,3g/cm^3$, significa que o solo tem aproximadamente 50% de espaço vazio (poros).

A areia contém poros de maiores dimensões pelo que não consegue reter água, no entanto consegue transmitir (espalhar) água muito mais facilmente, já solos de poros pequenos conseguem reter água contra a força gravítica mas não a conseguem transmitir rapidamente. Em geral, o desejável para um solo é que tenha uma porosidade aproximada de 50% onde metade seja de macro-poros e outra metade de micro-poros, para que tenha um bom balanço entre retenção de água, distribuição de água e oxigénio, permitindo assim que as plantas cresçam favoravelmente (Foth, 1990).

3.1.2.5. Cor

A cor do solo é a característica mais óbvia para inferir as suas propriedades. Através da observação da cor (método indirecto), pode-se conhecer informação sobre a drenagem, oxigénio e conteúdo de matéria orgânica no solo.

A matéria orgânica é o factor que mais influencia a cor do solo, todavia substâncias como: substâncias ferrosas, compostos químicos, sal, entre outros, também possuem alguma in-

3. Solo, Plantas, e suas Relações

fluência (Foth, 1990).

3.1.2.6. Temperatura

Os processos químicos e actividades dos microrganismos importantes para as plantas, dependem da temperatura. A valores de temperatura muito baixas ($5^{\circ}C$), a água não se move por entre o solo, limitando a actividade biológica. E a elevadas temperaturas, a água evapora. Assim, a temperatura é uma propriedade importante do solo. Da radiação solar, 47% é absorvida pelo solo e transformada em calor. Este calor é perdido pelo solo através de: evaporação da água, radiação de volta para atmosfera, aquecimento do ar acima do solo e aquecimento do solo (Foth, 1990).

3.1.3. Perfil dos Solos

Os solos não podem ser estudados apenas a nível superficial. Assim, para um estudo correcto do solo, tem de ser recolhida uma amostra (ou observada no terreno), onde se observem os diferentes tipos de camadas que o formam, desde a camada vegetal (superfície) até à zona da rocha não alterada. Esta sucessão de camadas constitui o perfil do solo. Tal perfil pode ser observado num pédon (palavra grega para solo); cada pédon é uma coluna hexagonal correspondente a uma área de um a dez metros quadrados, com altura variável. O polipédon (conjunto de vários pédon) é a base utilizada para estabelecer mapas de solos (Roque *et al.*, 2001).

Cada camada exposta num pédon constitui um horizonte do solo. Cada horizonte é geralmente paralelo à superfície do pédon e contém características que permite distingui-lo de outro horizonte. Essas características são consequência de processos geradores do solo. A separação entre os vários horizontes pode conhecer-se através das propriedades físicas dos solos. Os horizontes são a base das classificações dos solos e cada horizonte é identificado com uma letra diferente. Numa situação ideal pode-se considerar os seguintes horizontes: o Horizonte O, caracterizado pela sua composição orgânica, detritos vegetais e animais, depositados na superfície, é constituído por 30% de matéria orgânica, importante pela sua capacidade de absorver água e fornecer nutrientes, é a camada superior; o Horizonte R, é a base do perfil do solo constituído por material não consolidado ou rocha não alterada; os Horizontes A, E, B e C, marcam os diferentes estratos minerais entre os horizontes O e R, são constituídos por areia, silte e outros produtos resultantes da meteorização. Um exemplo de pédon com os diferentes horizontes encontra-se representado na figura 3.2 (Roque *et al.*, 2001).



Figura 3.2.: Representação de um pédon ideal (Roque *et al.*, 2001).

3.1.4. Aragem do Solo

Lavar ou arar a terra é uma manipulação mecânica do solo, necessária para preparar a terra para plantação, controlo de ervas daninhas e resíduos das colheitas anteriores. No entanto lavar o solo e o movimento de tractores e animais pelo solo, tendem a compactá-lo cada vez mais, diminuindo-lhe os poros e conseqüentemente a capacidade de armazenar água, aumentando a densidade volúmica. Assim, alguns métodos de plantação foram desenvolvidos para realizar as acções de aragem do solo em apenas uma passagem, com o objectivo de compactar menos o solo, (Foth, 1990).

3.2. Relação do Solo com a Água

Quando um determinado solo começa a ficar seco, existe uma diminuição contínua de energia da água no solo, do mesmo modo que quando este, por alguma razão, fica mais húmido, há um aumento contínuo dessa energia. Assim, a quantidade de água presente no solo corresponde às suas mudanças de energia. A água movimenta-se de zonas de menor energia para zonas com maior energia, como é descrito em pormenor no ponto 4.1. Desta forma a retenção, mobilidade e disponibilidade de água no solo (nos poros dos solo) é realizada através de forças de atracção entre as moléculas de água e moléculas do solo, dependendo da força

3. Solo, Plantas, e suas Relações

da gravidade. Logo, num solo bastante húmido, a energia, a mobilidade e disponibilidade da água no solo são elevadas, sucedendo o oposto no caso do solo estar seco. A água no solo está normalmente em movimento, seja numa trajectória descendente para o lençol freático (devido à gravidade), seja para as raízes. Quando o solo está saturado e a força gravítica nas moléculas de água é pouco significativa, a água move-se lateralmente dos poros para as raízes através das forças de atracção das várias moléculas (Foth, 1990).

Capacidade de Armazenamento de Água

A capacidade de armazenamento de água consiste na quantidade de água que o solo consegue armazenar. A quantidade de água disponível encontra-se sempre entre dois pontos, o ponto de capacidade do solo (*field capacity*) e o ponto de seca das plantas (*wilting point*). Esta quantidade de água relaciona-se com a estrutura e textura do solo, isto é, depende do tipo de solo e consequentemente do tamanho dos poros, como se pode observar no gráfico 3.3.

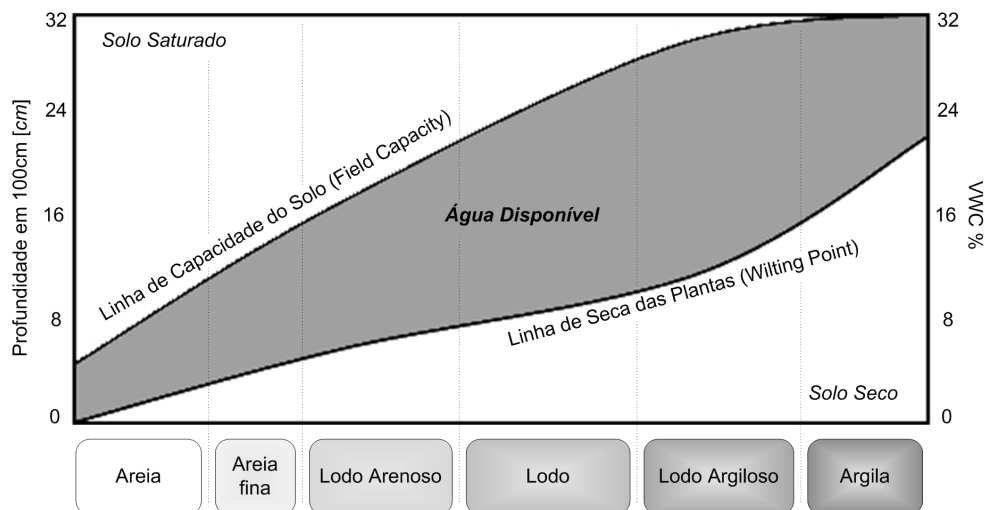


Figura 3.3.: Relação da textura do solo com a capacidade deste de retenção de água (Foth, 1990).

3.3. Relação das Plantas com a Água

As plantas perdem grande parte da água por transpiração durante o dia, sendo que de noite quase não existe transpiração. A água é recolhida no solo pelas raízes das plantas, e a luz

3. Solo, Plantas, e suas Relações

solar dá à planta toda a energia necessária para transformar a água extraída do solo em vapor libertado pelas folhas. Ao conjunto destes dois processos de evaporação e transpiração da planta é chamado de forma frequente de evapotranspiração como refere Roque *et al.* (2001). Ainda, através da água, absorvida pelas raízes no solo, a planta recebe os nutrientes e minerais de que necessita. Uma pequena parte da água é ainda combinada quimicamente para a planta crescer, mas a maioria da água evapora para a atmosfera através dos poros e folhas da planta. No caso da água evaporada pelas folhas ser em maior quantidade do que a água recolhida pelas raízes, a planta começa a secar (a murchar, *wilting*), deixa de conseguir absorver a luz solar e realizar a fotossíntese, pára de crescer e eventualmente morre. No caso de o solo estar no ponto de saturação máximo (*saturation point*), ou seja todos os poros contêm água, a planta vai sofrer de falta de oxigénio (apesar de ter muita água), levando-a assim a uma diminuição da fotossíntese e conseqüente morte da planta. Deste modo para uma planta crescer de forma saudável deve encontrar-se num solo com conteúdo de água perto do ponto máximo (*field capacity*) mas com alguma disponibilidade para que exista oxigénio entre os espaços livres (DTI, 2004). Na figura 3.4, está representado os vários pontos de estado no solo.

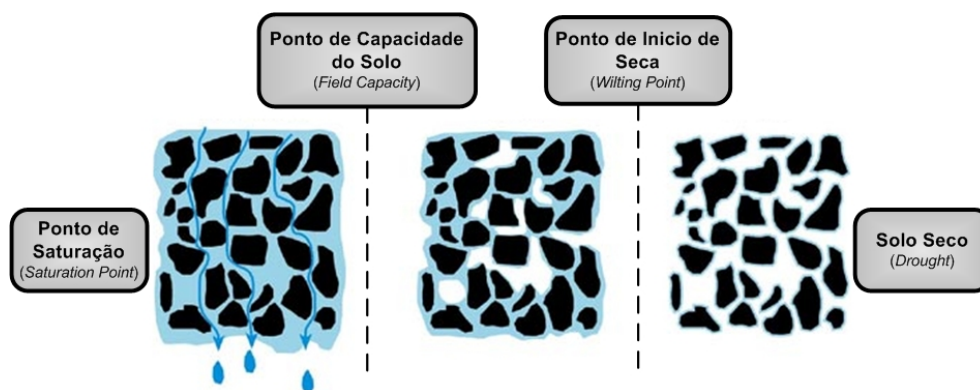


Figura 3.4.: Tipos de estado do solo em relação à quantidade de água (DTI, 2004).

Com o crescimento do valor económico de algumas plantações, com mais interesse estudam-se pontos como: a possibilidade de haver pouca água, a capacidade do solo em guardar água (contra a força gravítica) e conseqüentemente uma irrigação eficiente (Foth, 1990).

3.4. Relação das Plantas com o Oxigénio

Se o solo tiver demasiada água (solo saturado), expulsa todo o oxigénio do interior do solo criando uma deficiência em oxigénio. Algumas raízes de plantas não crescem em solos que

3. Solo, Plantas, e suas Relações

tenham demasiada água e sejam carentes em oxigénio. Para um bom crescimento de raízes o solo deve ser húmido mas deverá conter também nutrientes e oxigénio (as quantidades dependem de cada planta).

As raízes têm na sua constituição uns poros que permitem a troca de gases com o solo. O oxigénio da atmosfera difunde-se por entre os poros no solo, onde estas respiram. A respiração permite libertar energia que a planta necessita para a translocação dos compostos orgânicos necessários ao crescimento.

3.5. Relação da Água com o Oxigénio no Solo

Um poço de água revela o topo do lençol de água freática (camada de água profunda no solo, que normalmente alimenta as nascentes). A água normalmente não sobe acima desse valor, excepto no solo adjacente devido ao fenómeno da capilaridade, que faz com que a água suba a níveis mais altos através dos poros no solo. Por este motivo, uma camada de solo saturado de água aparece acima do nível freático, exceptuado os casos em que o solo não provoca o efeito capilar (como solos arenosos). Acima desta camada de solo saturado existe outra camada onde há algum efeito capilar mas onde também existe ar em conjunto com água dentro dos poros do solo. Esta zona é composta por cada vez menos água e cada vez mais ar quando mais próximo da superfície (ver figura 3.5).

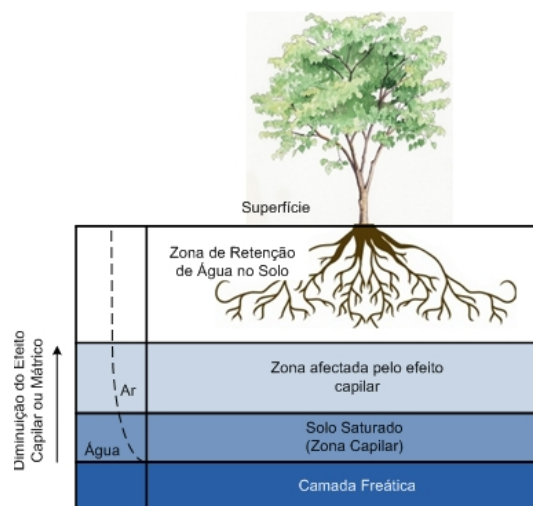


Figura 3.5.: Relação entre a camada freática com o ar e com a zona das raízes (Foth, 1990).

3. Solo, Plantas, e suas Relações

Geralmente, no solo acima da zona capilar há uma camada em que o conteúdo de água é dado pelo balanço entre a água infiltrada, a perda de água por transpiração das plantas e a percolação da água (infiltração até à camada freática) (Foth, 1990).

3.6. Plantas e as suas Raízes

O crescimento das plantas através do solo é feito pelas suas raízes. Quanto maior forem as raízes de uma determinada planta, mais nutrientes e água essa planta extrai do solo. O crescimento das raízes é influenciado pelo seu ambiente envolvente, pelo solo, e ainda pelo tipo de planta.

Quando uma semente é colocada no solo, esta absorve água e nutrientes por osmose, algum tempo depois as primeiras folhas e raízes desenvolvem-se e a fotossíntese começa. Depois das raízes emergirem da semente, alongam-se e vão ocupando no solo os espaços vazios, sempre alimentando a planta de água e nutrientes. As raízes tendem a crescer sempre em posições onde não existam outras raízes de modo a conseguirem nesse local extrair o máximo de água. Assim, apesar de crescerem de uma forma quase aleatória, têm uma distribuição no solo muito uniforme (sempre que não encontrem qualquer barreira física). A maioria das raízes não cresce em solos muito secos, sem nutrientes, ácidos, ou saturados (muita água) e com pouco oxigénio (Foth, 1990).

3.7. Gestão da Água

As técnicas usadas para a gestão, conservação e armazenamento de água, foram desenvolvidas para proporcionar um uso eficiente e aumento de água disponível para irrigação do solo.

Existem três métodos básicos para a gestão de água em áreas agrícolas (muitas vezes utilizados em conjunto):

- Conservação da água da precipitação natural;
- Remoção da água de zonas onde esta existe em maiores quantidades;
- Adição de água da rede de distribuição, como suplemento à da precipitação (na irrigação).

Em áreas de grande déficit de água, são utilizadas técnicas de conservação de água para aumentar a quantidade de água que entra no solo, tornando mais eficiente a utilização da mesma. Altas taxas de infiltração de água no solo, não só aumentam a quantidade de água armazenada como reduzem as cheias e erosão do solo. Superfícies protegidas por vegetação

3. Solo, Plantas, e suas Relações

tendem a ter taxas de infiltração de água muito maiores que os solos expostos em áreas cultivadas. O impacto das gotas da chuva no solo faz com que este forme uma crosta na superfície e assim o tamanho médio dos poros diminui causando uma consequente diminuição na infiltração da água. Tem-se assim que a desflorestação diminui a infiltração de água nos solos, tornando-os mais secos. Um outro factor que melhora a infiltração da água, são os canais, mais largos que os poros normais no solo, realizados por insectos como por exemplo minhocas, permitindo levar em maiores quantidades a água pelo seu percurso.

Em zonas secas onde se produzem cereais há uma prática que consiste em deixar a zona em que existe pouca água, um ano sem produção de cereais e com pouca vegetação ou rasteira. Este método consiste em deixar a área de cultivo no fim da colheita sem qualquer plantação e a vegetação que irá crescer terá o intuito de minimizar as perdas de água por consumo e transpiração. Este é chamado de um período de armazenamento de água, onde o solo que se encontra seco vai saturar rapidamente com as primeiras chuvas, infiltrando-se alguma água e criando uma camada de solo húmido. À posteriori, o solo da superfície rapidamente perderá água por evaporação e secará novamente, pelo que quando chover deixará infiltrar uma nova camada de água e aumentará a profundidade das camadas anteriores. Sucessivos processos deste tipo irão criar no solo um reservatório importante de água, que no ano seguinte juntamente com as chuvas será essencial para o cultivo de cereais.

De forma contrária existem zonas onde o controlo da água tem de ser realizado no sentido inverso. Por exemplo, na Holanda desde à 800 anos que se utilizam diques e canais para drenar a água em excesso e não serem afectados por marés e cheias. Isto acontece neste país, porque algumas zonas se encontram abaixo do nível do mar. A drenagem de água consiste em baixar o nível da camada freática, pois encontra-se perto da superfície do solo. Desta forma retira-se a água em excesso que há na zona das raízes (estas não crescem em solo saturado, conforme referido na secção 3.6), da zona das fundações dos edifícios, mantendo-os mais seguros e as suas caves secas, permitindo ainda o bom funcionamento dos sistemas de esgotos (Foth, 1990).

3.7.1. Irrigação

A irrigação de culturas agrícolas é uma prática muito antiga. Aproximadamente 11% das plantações agrícolas do mundo são irrigadas. Assim, a irrigação é essencial para aumentar a produtividade do solo por todo o mundo (Foth, 1990).

Para a implementação de um sistema de irrigação é necessário ter uma adequada, disponível e de qualidade, reserva de água. A água pode ser obtida de variadas formas, da superfície (em rios, lagos e riachos), do subsolo (através de poços ou furos) ou ainda obter a água através rede pública de distribuição. A sustentabilidade de cada opção deve ser cuidadosamente

3. Solo, Plantas, e suas Relações

avaliada e escolhida a mais confiável. Normalmente, o volume de água necessário para o objectivo de irrigar uma cultura é bastante elevado, assim o armazenamento de água pode ser necessário. A quantidade de água armazenada, tem de ser em função do pico de necessidade e da fiabilidade da origem da água, pelo que de uma forma geral, o volume da reserva de água pode ser equivalente à quantidade de água utilizada durante um dia na época de pico da irrigação. Os reservatórios físicos podem ser do tipo de pequenos tanques, ou no caso de instalações grandes onde a recolha de água tem de ser efectuada nos meses de Inverno, pode ser necessário ter pequenas lagoas (DTI, 2004).

Existem pelo mundo fora variadíssimos métodos de irrigação, uns simples outros mais complexos, outros até compostos e mistos de vários sistemas, no entanto, há métodos básicos e com muita aplicação nos nossos dias. Para a selecção de qual dos vários métodos de irrigação a utilizar, devem ser levados em consideração vários aspectos, tais como: cadência de infiltração, natureza e declive da superfície a irrigar, quantidade de água e como é transportada, rotação da cultura, e pluviosidade sazonal.

No fim de se conhecer estes parâmetros, a correcta escolha do sistema de irrigação é facilitada. Nos pontos seguintes apresentam-se alguns dos métodos mais utilizados.

Irrigação por Cheia

Este é o método que tem menores custos tendo em conta que a água nesse local deve ser relativamente barata. Consiste em inundar a terra distribuindo a água pela força da gravidade (ver figura 3.6). Por esse motivo deve apenas ser utilizado em campos planos e sem inclinação, caso contrário facilmente este método poderá regar demasiado umas áreas e deixar outras por regar. Este método baseado na inundação do solo é bastante útil para retirar o sal do solo, no entanto é ineficiente caso se tiver em conta a perda de água por evapotranspiração. Um exemplo de aplicação deste método é um arrozal.



Figura 3.6.: Fotografia de uma cultura onde é utilizada irrigação por cheia.

Irrigação por Regos

Pequenas valas paralelas são feitas no solo, regos, por onde a água circulará, conforme apresentado na figura 3.7. As plantas usualmente crescem no solo mais elevado entre as valas. Este sistema é similar ao anterior exceptuando que neste a distribuição da água é realizada através dos regos. Este é o método mais utilizado nos países em desenvolvimento, pois pode ser realizado apenas através de trabalho humano. Um exemplo da aplicação deste método é numa pequena horta particular.

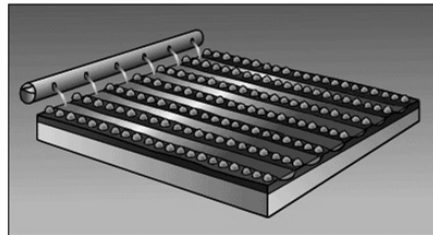


Figura 3.7.: Representação de um sistema de rega por inundação de regos.

Para este método é necessário ter em conta a profundidade dos regos, o espaçamento entre eles e ainda o tipo de solo, isto para que a água ao se infiltrar no solo tenha um movimento capilar lateral, indo desta forma humedecer o solo na zona das raízes das plantas, como pode ser visualizado na figura 3.8.

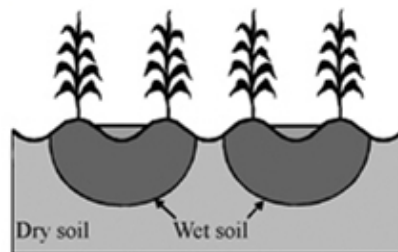


Figura 3.8.: Representação do solo húmido com o método de irrigação por regos.

Irrigação por Aspersores

Este sistema é muito utilizado, pois é bastante versátil, pode ser observado de forma mais comum em relvados. Para a utilização deste sistema o nivelamento do terreno não é

3. Solo, Plantas, e suas Relações

necessário. A sua natureza portátil torna-os adequados para suplementar a chuva natural. Quando ligados a sistemas de medição, estes sistemas podem ter um funcionamento automático. Quando utilizados em grandes áreas podem causar o desaparecimento das reservas subterrâneas de água, podem ainda alterar o ambiente envolvente, pois ao molhar as folhas das plantações e solo à superfície afecta a temperatura ambiente, como refere Foth (1990).

Estes mecanismos funcionam libertando a água em forma de spray, e são utilizados geralmente em locais onde existe uma reserva de água de boa quantidade e qualidade. Grandes quantidades de água podem ser distribuídas em grandes áreas e em curtos espaços de tempo. A desvantagem óbvia destes sistemas é a relativa grande perda de água pelo vento, ou seja, as pequenas gotículas de água (spray) podem seguir o movimento do vento e não ir ter ao solo no local desejado. Há um número imenso de diferentes aspersores, tais como: fixos, *pop-up*, diferentes sprays e rotações variadas, etc.. É usual na instalação de aspersores definir as irrigações para a noite ou fim da tarde, pois dessa forma tende-se a diminuir as perdas por evapotranspiração e é realizada de forma menos incómoda para os humanos (DTI, 2004).



Figura 3.9.: Fotografia da utilização de aspersores numa determinada cultura.

Dentro do tipo de aspersores, encontram-se sistemas que utilizam aspersores em máquinas móveis. Estas têm o objectivo de cobrir uma maior área agrícola, são os chamados *Pivôs*. Estes podem ser centrais (formando um círculo, como se vê na figura 3.10) ou lineares. Pequenos motores eléctricos permitem o movimento da estrutura, a água é transportada por tubos até ao pivô e este eleva a água e distribui-a pelos vários aspersores que libertam um spray por toda a cultura.

3. Solo, Plantas, e suas Relações



(a) Área agrícola irrigada por pivô central.



(b) Fotografia de um pivô linear a irrigar.

Figura 3.10.: Figuras representativas da utilização de um pivô na irrigação.

Irrigação Gota a Gota

Este método ocorre de forma contínua, e consiste em aplicar uma reduzida quantidade de água numa área localizada do solo. Mangueiras são distribuídas por filas de plantas ou árvores. Somente uma pequena parte da área das raízes é molhada, e estas absorvem rapidamente a água. A maior vantagem deste sistema consiste na redução na quantidade total de água utilizada e também a possibilidade de ser implementado em superfícies muito íngremes onde outros sistemas não se adaptam (Foth, 1990). No entanto a maior desvantagem consiste em haver a possibilidade de entupimentos, o que implica a necessidade de haver uma filtragem de água de boa qualidade. Este método é aplicado usualmente em pomares, cultivo de árvores de fruto.

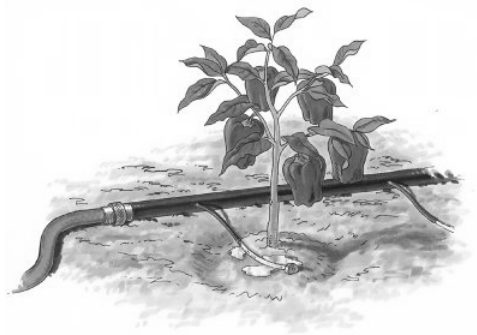


Figura 3.11.: Representação de irrigação gota a gota.

Irrigação no Sub-solo

Este método consiste numa tubagem enterrada no solo com várias perfurações por onde a água sairá entrando em contacto com o solo. A maior vantagem deste sistema baseia-se em fornecer água directamente na zona das raízes das plantas. No entanto é preciso ter em conta que as raízes finas crescem na direcção da água e rapidamente alcançam os tubos e bloqueiam as perfurações afectando assim a eficiência do sistema. Estes sistemas não são considerados adequados para áreas agrícolas muito grandes.

3.7.2. Taxa e Momento da Irrigação

Uma aplicação ideal consiste em levar o solo na zona das raízes das plantações a ficar bastante húmido. Mais água que a necessária para alcançar esse ponto pode resultar em alagar essa porção de solo, conseguindo-se perdas de água para os lençóis freáticos por taxas de infiltração muito elevadas. Uma generalização aceitável é que uma rega deve acontecer quando 50 a 60% água disponível na zona das raízes tiver sido consumida.

Muitos agricultores iniciam a irrigação dependendo da aparência das culturas. A variação na sua cor normalmente indica que é necessário realizar rega. Sensores são utilizados para medir o potencial mátrico ou “capilar” (Larcher, 1995), que é a energia com que a água é retida por forças superficiais na zona das raízes e através desses resultados pode-se depender a irrigação do potencial de água no solo.

Quando a água para as irrigações é escassa, é aconselhável reduzir (atrasar) as irrigações no início da estação, para que exista água suficiente no momento da reprodução e crescimento das plantações, onde a falta de água é muito mais grave para as plantas (Foth, 1990).

3.7.3. Qualidade da Água

A água das chuvas e da neve é bastante pura, no entanto quando esta chega aos campos agrícolas já adquiriu muitos materiais solúveis (sais) das pedras e rochas no seu percurso. Para se determinar a qualidade da água é necessário ter em conta factores como:

- Concentração total de sal;
- Taxa da absorção de Sódio;
- Concentração de Boro e outros elementos tóxicos;
- Concentração de Bicarbonato.

Com o continuar da irrigação, um dos conteúdos da água é sal, mesmo que a água tenha boa qualidade. Com o tempo existe a possibilidade de se criar no solo alto teor de sal, diminuindo

3. Solo, Plantas, e suas Relações

assim a sua produtividade. Neste caso é necessário retirar o sal do solo visto que este não se infiltra naturalmente como a água. A concentração total de sal, ou salinidade (s) é expressa em termos de condutividade eléctrica da água. Quatro classes de salinidade foram estabelecidas: água com baixa salinidade (C1) pode ser utilizada na maioria das plantações; água com nível de salinidade médio (C2) pode ser utilizada para irrigação em algumas culturas, em que as plantas tolerem algum conteúdo de sal; água com alta salinidade (C3) não pode ser utilizada em solos com drenagem restrita, apenas em solos com controlo de salinidade e para plantas com alta tolerância ao sal; por fim água com muito alto nível de salinidade (C4) é apenas possível ser utilizada para irrigação em condições muito especiais, em que o solo deve ser permeável e plantas capazes de alta tolerância ao sal que absorverão desta água. A qualidade da água também depende da taxa de absorção do sódio (SAR - *Sodium Absorption Rate*), que consiste na quantidade de sódio relativamente a outros catiões. Por exemplo, a carga negativa da argila e partículas de húmus são neutralizadas pelos catiões que são absorvidos e nivelarão a carga negativa. Quando 15% ou mais da carga é neutralizada pelo sódio, a argila e as partículas de húmus tendem a diminuir a condutividade hidráulica do solo. Existem também quatro classes de SAR (S1 até S4), que se combinam com as quatro classes da salinidade.

Em relação à concentração de Boro, apesar deste ser essencial para o crescimento das plantas apenas se pode encontrar em quantidades muito diminutas, pois quando em quantidades maiores pode ser tóxico. As plantas têm normalmente alguma tolerância, como se pode observar na tabela 3.2. A existência de Boro em concentrações tóxicas pode ter de levar um controlo rigoroso da água em certas irrigações.

Tabela 3.2.: Tabela com os limites permissíveis de Boro em algumas classes para determinadas tolerâncias de plantas [em partes por milhão de água] (Foth, 1990).

Classe de Boro	Cultura Sensível	Cultura Semi-tolerante	Cultura Tolerante
1	<0,33	<0,67	<1,00
2	0,33-0,67	0,67-1,33	1,00-2,00
3	0,67-1,00	1,33-2,00	2,00-3,00
4	1,00-1,25	2,00-2,50	3,00-3,75
5	>1,25	>2,50	>3,75

Em água que contenha altas concentrações do ião de Bicarbonato (HCO_3^-), este que tende a reagir com o cálcio e o magnésio, o que provoca um aumento na concentração de sódio. Quando ocorre esta reacção o SAR aumenta, diminuindo a qualidade da água (Foth,

1990).

Algum cuidado é necessário no uso de água para sistemas de rega, principalmente se esta for de fontes à superfície. Assim, a água pode ter algum (pequeno) grau de poluição com boa aceitação pelas plantas, mas estas condições devem ser avaliadas especialmente em momentos de cheia ou seca, como refere o DTI (2004).

De outro ponto de vista, a água com elevado nível de matéria sólida suspensa pode rapidamente entupir o equipamento, reduzindo a eficiência da instalação, por exemplo, depósitos de cálcio tendem a bloquear as pequenas saídas de água de alguns sistemas de irrigação.

3.7.4. Importância da Utilização de Sensores na Gestão da Água

Como já foi brevemente referido anteriormente, a agricultura realizada com sistemas de irrigação fornece a maioria da reserva de comida ao mundo. Aproximadamente 50% do total anual de água usada em áreas urbanas é para relvados e jardins. Devido às vertentes económicas, políticas e ambientais aliadas a este sector, urge reduzir ou eliminar o desperdício de água e recursos energéticos tanto na agricultura como no paisagismo. Demasiada irrigação leva à erosão do solo, aumenta o potencial de contaminação da superfície e lençóis freáticos com água correntes e conduz ao aumento da utilização de químicos e fertilizantes. No caso contrário, baixa irrigação deteriora a cultura no seu crescimento e qualidade final. Assim, e tendo em conta algumas culturas muito sensíveis à falta de água, uma boa gestão da irrigação deve ser utilizada.

Uma gestão cuidadosa de irrigação está dependente de instrumentação de controlo, entre esta incluem-se os sensores de humidade do solo. Não existe um dispositivo perfeito que permita uma leitura rigorosa para todos os tipos de solo e para todos os tipos de plantas a baixo custo. Assim para culturas específicas deve-se encontrar o sensor mais indicado para essas características. Para necessidades mais gerais há neste momento alguns sensores que solucionam o problema (Shock *et al.*, 1998).

Como descrito na motivação deste trabalho, os sensores são o interface entre o meio das plantas e o meio humano para que desta forma se possa executar uma alimentação das mesmas com mais eficiência. Esta eficiência consiste em utilizar menos recursos energéticos (como a água) e obter no final, e se possível, mais dividendos tanto em quantidade como em qualidade nas culturas que se estejam a produzir.

3.8. Cálculos Básicos para Conhecimento de Quantidade da Irrigação

Para efeitos de uma definição simples da irrigação a aplicar numa determinada cultura agrícola, há que conhecer algumas características importantes

Primeiro há que definir a quantidade de água que está armazenada no solo (*SWS - Soil Water Storage*) na zona das raízes das plantas dessa cultura. A textura do solo e a profundidade a que as raízes se encontram determinam esta capacidade de armazenamento. A maiores profundidades existe mais água armazenada no solo e por conseguinte maior facilidade para as plantas adquirirem água entre irrigações. Desta forma pode-se ter uma noção aproximada da quantidade de água a regar e o tempo necessário até a nova irrigação (MAFF, 2002). E segundo o mesmo autor, pode-se obter *SWS* ([*mm*]) pela equação 3.1.

$$SWS = RD \times AWSC \quad (3.1)$$

Onde *RD* é a profundidade das raízes (*Root Depth* [*m*]) que se pode obter na tabela 3.3, e *AWSC* é a capacidade de armazenamento de água disponível pelo solo (*Water Storage Capacity of the Soil* [*mm/m*]) que se pode obter na tabela 3.4.

Apenas um porção da água no solo está facilmente disponível para utilização das plantas, ou seja, as plantas apenas conseguem extrair um certa quantidade de água até que comecem a murchar. Assim, outro coeficiente é definido para conhecer a percentagem de água que está facilmente disponível às plantas, chamado de *défice máximo de água no solo (MSWD - Maximum Soil Water Deficit)*. Com este conhece-se que uma nova irrigação deve ocorrer quando esta quantidade de água for retirada do solo. É ainda, a quantidade máxima de água a fornecer pela irrigação no caso de não se desejar que se alcance um ponto de saturação do solo (MAFF, 2002). Segundo MAFF (2002), pode-se obter *MSWD* (percentagem) pela equação 3.2.

$$MSWD = SWS \times ACW \quad (3.2)$$

Onde *SWS* é a capacidade de armazenamento de água já calculada e *ACW* é o coeficiente de água necessário pela cultura (*Availability Coefficient of the Water to the crop* [%]) que se pode obter na tabela 3.5.

Para a colocação correcta dos sensores de humidade tem que se conhecer qual a profundidade em que se encontram as raízes. Visto que em cada tipo de planta as raízes encontram-se

3. Solo, Plantas, e suas Relações

a profundidades diferentes, os sensores vão ter que ser colocados conforme a profundidade de cada uma delas. Na tabela 3.3, apresentam-se as profundidades médias das raízes de determinadas culturas.

Tabela 3.3.: Tabela das profundidades efectivas de raízes de algumas culturas (MAFF, 2002).

Baixa Profundidade 0,45m	Media-Baixa Profundidade 0,60m	Média-Alta Profundidade 0,90m	Alta Profundidade 1,20m
Couve	Feijão	Couve de Bruxelas	Espargos
Couve-flor	Beterraba	Milho (doce)	Amoras
Pepinos	Brócolos	Beringela	Uvas
Alface	Cenouras	Kiwi	Framboesas
Cebolas	Aipo	Pimentos	
Rabanetes	Batatas	Botelho	
Nabos	Ervilhas		
	Morangos		
	Tomates		

Outros valores de profundidade de raízes de várias plantas (autor diferente) são apresentadas no anexo B.

Tabela 3.4.: Tabela da capacidade de armazenamento de água para cada tipo de solo (MAFF, 2002).

Textura do solo	AWSC [mm/m]
Areia	83
Areia lodosa	100
Lodo Arenoso	125
Areia fina	142
Lodo	175
Lodo Argiloso	200
Argila Lodosa	200
Argila	200

3. Solo, Plantas, e suas Relações

Tabela 3.5.: Tabela dos coeficientes das necessidades das culturas (MAFF, 2002).

Cultura	Percentagem Máxima
Ervilhas	35
Batatas	35
Árvores de Fruta	40
Uvas	40
Tomates	40
Outras Culturas	50

4. Módulo de Sensorização

Desde o início dos tempos que os agricultores medem a quantidade de água no solo. Mas esta era efectuada de um modo simples, ou seja, se as plantas começassem a murchar, com certeza que era necessária água. No entanto, este tipo de observação, para além de não fornecer informação para uma rega regular à plantação, também tem pouco controlo sobre a quantidade de água necessária (IAEA, 2008). Com o desenvolvimento da tecnologia foram surgindo métodos de medição mais fiáveis, que possibilitaram um maior controlo e conhecimento na agricultura. Esta tecnologia é composta por um variado número de sensores de medição.

Estes sensores medem a quantidade de humidade no solo através de processos electrónicos e magnéticos, sendo elementos relevantes para um planeamento da irrigação.

4.1. Métodos de Medição da Humidade do Solo

Como é de fácil percepção, os sensores neste sistema têm como objectivo medir num determinado instante o valor de humidade presente no solo onde o sensor está inserido. Na actualidade, e com a inovação tecnológica que observamos, existem no mercado vários sensores que por diferentes métodos medem a humidade do solo. De seguida apresenta-se os diferentes métodos de medição desta grandeza.

Conteúdo de Água no Solo (VWC)

Conteúdo de água no solo é uma expressão que relaciona a massa ou o volume da água presente no solo.

O conteúdo gravimétrico de água no solo (θ_g), tem como base a massa, e segundo o WMO (2008) é expresso pela equação 4.2:

$$\theta_g = \frac{M_w}{M_s} \quad (4.1)$$

Onde M_w é a massa de água numa amostra de solo e M_s é a massa de solo seco contido na mesma amostra. Os resultados de θ_g , são normalmente expressos em percentagem.

4. Módulo de Sensorização

A precipitação e evapotranspiração são grandezas expressas de forma comum em termos de fluxo, pois na generalidade as expressões volumétricas têm uma aplicabilidade mais célere que as mássicas. O conteúdo volumétrico da água no solo (θ_v) é definido pelo WMO (2008) conforme expresso na equação 4.2:

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_{spl}} \quad (4.2)$$

Onde V_w é o volume de água numa amostra de solo e V_{spl} é o volume total da amostra (*sample*), ou seja o volume de solo seco em conjunto com o volume do ar e o volume de água na amostra. Novamente, os resultados de θ_v , vêm expressos em percentagem.

A relação, segundo WMO (2008), entre o conteúdo de água gravimétrico e volumétrico é dado pela equação 4.3:

$$\theta_v = \theta_g \left(\frac{\rho_b}{\rho_w} \right) \quad (4.3)$$

Onde ρ_b é a massa específica do solo seco e ρ_w é a massa específica do solo no seu estado normal (com água).

Como este método é baseado em medições directas, é normal que todos os outros métodos sejam comparados a este. Infelizmente, a obtenção destas amostras é realizada de forma destrutiva o que torna a repetição das medições de forma regular impossível (WMO, 2008).

As unidades básicas para expressar o conteúdo de água gravimétrico contido no solo é $[kg/kg]$. Da mesma forma o conteúdo volumétrico de água no solo vêm em $[m^3/m^3]$. Desta forma estas grandezas vêm referidas em [%], especificamente o volume de água volumétrico é referido em [%VWC].

Potencial do Solo Húmido e Tensão no Solo

Este método descreve o estado de energia do solo húmido e é um parâmetro importante para análise do transporte de água, armazenamento de água e relação entre o solo, plantas e a água. A diferença do potencial da água entre dois locais diferentes indica o fluxo de água entre eles, ou seja do local de maior potencial para o de menor. Quando o solo seca, o potencial torna-se negativo e o trabalho necessário para extrair água desse local aumenta. Desta forma as plantas têm maior dificuldade em obter água o que as faz ir murchando (WMO, 2008).

Formalmente, o potencial é a medição da capacidade da água no solo realizar trabalho ou, no caso de o potencial ser negativo, o trabalho necessário para movimentar água no solo. O

4. Módulo de Sensorização

potencial de água no solo total (ψ_t), é o efeito combinado de todos os campos de forças e é representado pela equação 4.4:

$$\psi_t = \psi_z + \psi_m + \psi_o + \psi_p \quad (4.4)$$

Onde ψ_z é o potencial gravitacional (baseado na elevação acima do nível da água), ψ_m é o potencial mátrico (atracção e sucção da água ao solo, efeito capilar), ψ_o é o potencial osmótico (devido à energia dos componentes solúveis na água), e ψ_p é o potencial de pressão (pressão hidrostática abaixo do nível da água), como mostra WMO (2008).

A unidade básica do potencial de água no solo é a energia por unidade de volume que é equivalente a pressão [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$] = [Pa] (Pascal) ou em alguma literatura [bar] (WMO, 2008).

É importante esclarecer que o Potencial da Água no Solo (*Soil Water Potencial*) é o inverso da Tensão da Água no Solo (SWT - *Soil Water Tension*), sendo que esta última forma é utilizada nos dispositivos de medida e vem em unidades positivas [cbar] (Shock *et al.*, 2005).

As empresas que disponibilizam sensores que utilizam este método, para conhecer quando o melhor momento de efectuar a rega, afirmam que este método é muito mais eficiente que o anterior, isto é, asseveram que o valor do volume de água presente no solo não é importante, mas sim a dificuldade que a planta tem em extrair do solo a água que necessita para sobreviver. Assim, para as plantas moverem água para as suas raízes têm de ultrapassar as tensões presentes no solo. No entanto, é preciso ter em conta que para diferentes tipos de solos, diferentes valores de tensão para o mesmo valor volumétrico poderão ser obtidos (Irrometer Company, 2008).

Quando uma grande quantidade de água é adicionada a uma porção de solo (solo seco), este vai rapidamente drenar a grande parte da água pelos seus poros e canais pela força da gravidade. Alguma dessa água tenderá a retirar o ar de alguns poros e ocupar o seu lugar. Ou seja, uma camada de água vai mover-se no sentido descendente deixando o solo bastante húmido à sua passagem. Esta camada de solo húmido diz-se no seu ponto de armazenamento máximo (*field capacity*), este ocorre, para a maioria dos solos, a uma pressão de 10kPa. Este estado do solo não pode ser confundido com estado (indesejado) de saturação do solo, onde todos os poros estão ocupados por água. Depois de um evento de saturação, com elevada precipitação, o solo necessita de pelo menos vinte e quatro horas para chegar ao ponto de armazenamento máximo. Quando o conteúdo de humidade do solo baixa do ponto de armazenamento máximo, os movimentos de água são feitos em parte por água líquida, em

4. Módulo de Sensorização

parte por evapotranspiração e também por absorção das raízes. As raízes vão extrair água dos poros com que estão em contacto. Chegar-se-á a um ponto onde as forças que mantêm a água nos poros não conseguem ser suplantadas pelas forças da sucção das raízes das plantas. As plantas começarão a ficar desidratadas e perderão a sua rigidez, a humidade do solo alcançará o ponto de seca (*wilting point*), onde na maioria dos casos ocorre o potencial de $-1,5MPa$. Na agricultura, a água disponível no solo, para as plantas, é comum situar-se entre estes dois pontos (WMO, 2008).

4.1.1. Métodos de Medição

Segundo WMO (2008) os métodos e instrumentos disponíveis para avaliar o estado da humidade do solo têm de ter em conta três características:

- Fazer a distinção entre a determinação do conteúdo de humidade do solo (VWC) e a determinação da tensão de humidade no solo (SWT);
- A utilização do método directo (necessita de disponibilidade representativa de terreno para obter um número de amostras de solo que serão analisadas de forma destrutiva), ou utilização do método indirecto (colocação de um instrumento de medição no solo para medir uma propriedade relacionada com a humidade do solo);
- Os métodos de medição devem ter em conta o trabalho regular envolvido no solo, ou seja, devem ter uma aplicabilidade operacional.

4.1.1.1. Medição da Humidade Gravimétrica do Solo pelo Método Directo

O conteúdo da humidade gravimétrica do solo θ_g , é determinada tipicamente, com amostras de solo de aproximadamente 50g removidas do campo. A amostra e o seu reservatório devem ser pesados em laboratório antes e depois da secagem do solo num forno. O procedimento de secagem consiste em colocar o reservatório aberto num forno electricamente aquecido a $105^\circ C$ até a massa estabilizar num valor constante. O tempo de secagem varia normalmente entre dezasseis a vinte e quatro horas. A diferença da massa antes e após a secagem fornece a humidade gravimétrica libertada pelo solo por evaporação na secagem. O conteúdo de água volumétrico, θ_v , pode variar entre 40% e 50%. Da mesma forma, o volume da amostra tem de ser medido antes e após a secagem (WMO, 2008; IAEA, 2008).

4.1.1.2. Métodos Radiológicos (Método Indirecto)

Dois métodos radiológicos diferentes são conhecidos para medição da humidade do solo. Um dos métodos com elevada utilização consiste num dispositivo de neutrões, que se baseia na

4. Módulo de Sensorização

interacção de neutrões de alta energia e os núcleos dos átomos de hidrogénio presentes no solo. O outro método mede a atenuação dos raios gama ao longo da sua passagem pelo solo. Ambos os métodos utilizam equipamentos portáteis para múltiplas medições, e necessitam de cuidadosa calibração. Visto estes métodos serem radiológicos é necessário sempre alguma protecção aos utilizadores (WMO, 2008).

4.1.1.3. Sensores Dieléctricos (Método Indirecto)

Quando uma substância é colocada num campo eléctrico influencia este mesmo campo, alterando a permissividade eléctrica. Esse fenómeno é chamado constante dieléctrica, que é vinte vezes maior para a água líquida que para um solo seco. Assim, o conteúdo volumétrico num solo pode ser facilmente determinado através das características dieléctricas do solo molhado. Esta medição é realizada de forma não destrutiva, rápida, fiável e sem os perigos associados aos dispositivos radioactivos. Além disso, este método pode ser totalmente automatizado para aquisição de dados. Neste momento são comercializados e muito utilizados dois modos distintos de avaliar a humidade do solo, um baseado na frequência (*frequency-domain reflectometry*) e outro no tempo (*time-domain reflectometry*) (WMO, 2008).

Time-domain Reflectometry

Este método determina a constante dieléctrica do solo monitorizando o caminho dum pulso electromagnético que é lançado ao longo de uma guia formada normalmente por um par de varetas inseridas no solo. O pulso é reflectido no final da guia e a velocidade de propagação é facilmente medida. Estas sondas devem ser enterradas horizontalmente (WMO, 2008).

Frequency-domain Reflectometry

Este método utiliza microondas a frequências na ordem dos gigahertz. Estes sensores medem a constante dieléctrica, pela medição da amplitude e fase a uma determinada frequência. As medições são comparadas com o ar e calibradas com blocos dieléctricos ou líquidos de propriedades dieléctricas conhecidas (WMO, 2008).

4.1.1.4. Instrumentação de medição do potencial do solo

Os instrumentos capazes de medir o potencial matricial (efeito capilar) são económicos e fiáveis para utilizar em sistemas de grande escala. No entanto, cada instrumento tem um alcance de medição algo limitado (WMO, 2008).

Tensiómetros

Estes são os dispositivos mais utilizados e mais baratos para medir o potencial do solo. São instrumentos simples, que usualmente consistem numa ponta cerâmica (porosa) e um tubo cilíndrico (cheio de água) que liga a ponta cerâmica a um dispositivo de medição (que mede a tensão do solo de forma mecânica, manómetro, ou através de um transdutor, conforme indicado por Irrometer Company (2008)). Estes dispositivos estabelecem uma condição de quase equilíbrio com a humidade do solo, em que a ponta cerâmica porosa actua como uma membrana por onde a água flui. Uma vez colocado no solo, o tensiómetro é sujeito a um potencial negativo, levando a água a mover-se do seu interior para o meio envolvente, o solo (por efeito capilar ou efeito mátrico). O movimento da água vai criar um potencial negativo (ou sucção) no cilindro do tensiómetro, o qual vai ser registado pelo dispositivo de leitura. No caso contrário, quando o potencial do solo é maior, a água movimentada-se do solo para dentro do tensiómetro, resultando num menor potencial negativo alterando a medição (WMO, 2008). No entanto as unidades deste tipo de sensores é a tensão do solo e vêm em [*cbar*].

Este método tem associado alguma manutenção periódica para manter água no seu interior. Os sensores necessitam ainda de ser removidos do terreno durante o Inverno, pois a água presente no seu interior pode congelar (Irrometer Company, 2008).

Blocos Resistivos

Os sensores resistivos consistem em eléctrodos encapsulados num determinado material poroso, de forma a que depois de algum tempo atinja um estado de quase equilíbrio com o solo. Os sensores mais comuns são compostos no seu bloco poroso por uma estrutura de nylon, fibra de vidro e gesso. Tem um intervalo de funcionamento de $-50kPa$ (nylon), $-100kPa$ (gesso) a $-1500kPa$. Este método determina o potencial do solo húmido em função da resistência eléctrica medida com uma ponte de corrente alternada ($\approx 1000Hz$), visto que a corrente contínua provoca efeitos de polarização. Para uma medição mais rigorosa o sinal de saída dos sensores deverá ser corrigido segundo a temperatura de funcionamento. Apesar destes sensores serem bastante baratos existe necessidade de serem calibrados individualmente (WMO, 2008).

Psicómetros

Este dispositivo é constituído por um termopar colocado dentro de uma câmara com uma parede porosa. O termopar é arrefecido através do efeito de Peltier condensando água numa junção, pelo que a temperatura decresce e uma corrente é criada, através da qual se produz uma medição. Estes dispositivos são muito sensíveis a variações de temperatura, por isso a sua utilização é maior em laboratórios. No geral, este é um método com alguma dificuldade

4. Módulo de Sensorização

mesmo para especialistas pois está sujeito às leis da psicometria (WMO, 2008).

4.1.2. Relação entre os dois Métodos (VWC vs SWT)

Basicamente os dois métodos descritos anteriormente são realizados para o mesmo fim, otimizar a irrigação de uma qualquer plantação, e baseiam-se no mesmo fenómeno, a presença de água no interior do solo. Assim, a relação entre os dois métodos é chamada de retenção de água no solo, conforme apresentado na figura 4.1:

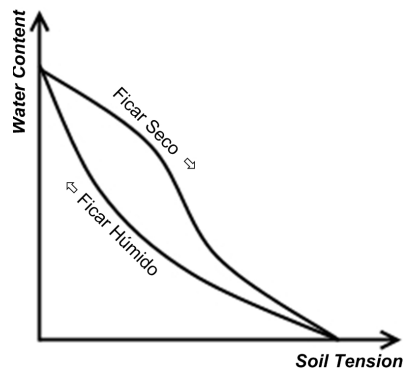


Figura 4.1.: Relação entre VWC e SWT.

4.2. Selecção do Sensor

Apesar deste método de rega inteligente ser já algo conhecido e até já utilizado em alguns locais, estes sensores de leitura de humidade do solo ainda não são facilmente encontrados nas distribuidoras de material electrónico na Europa e muito em particular em Portugal. Numa pesquisa pela internet, rapidamente se observa que os sensores que se encontram são na sua grande maioria desenvolvidos por empresas sediadas nos Estados Unidos da América que trabalham nesta área. Para os podermos obter em Portugal temos de conhecer os seus distribuidores, e estes por sua vez têm de fazer a encomenda ao produtor, visto não terem em *stock* estes sensores. Todo este processo encarece o sensor, pois todos os intermediários, passagem na alfândega e portes de envio, incrementam o valor monetário do sensor. E um dos objectivos foi seleccionar um sensor que tivesse um preço acessível, para o projecto ter maior aplicabilidade na área agrícola.

4. Módulo de Sensorização

É importante salientar que a maioria dos produtores aconselham comprar juntamente com o sensor um dispositivo de leitura que facilmente se liga ao sensor com o intuito de obter as medições proporcionadas por este. Para além do óbvio aumento do custo também não é do âmbito deste trabalho utilizar, no funcionamento do sistema, esses dispositivos, ou seja, utilizar apenas os sensores. Todos os processos de leitura das grandezas medidas serão descritos no ponto 4.3.

4.2.1. Sensores Excluídos

Vários sensores foram encontrados e estudados, mas a maioria foi abandonada devido ao elevado preço. Isto apesar dos sensores que foram excluídos da selecção terem do ponto de vista electrónico, uma utilização mais simples. No entanto, o objectivo principal era encontrar sensores baratos que fornecessem leituras minimamente fidedignas. A seguir apresentam-se alguns sensores de vários produtores que foram excluídos da selecção.

Decagon

Os primeiros sensores encontrados pertencem a um produtor americano que disponibiliza várias soluções diferentes na medição de grandezas relacionadas com a agricultura. A empresa Decagon¹, disponibiliza na gama baixa (mais simples e baratos) o sensor 10HS *Soil Moisture Sensor* e o sensor EC-5, como solução para medir o conteúdo volumétrico de água presente no solo, bem como o sensor 5TE que para além de medir a humidade do solo mede também a temperatura (este é um sensor de gama alta). Estes sensores obtêm o volume de água no solo, medindo a constante dieléctrica do meio através da utilização de uma tecnologia de capacitância/frequência. O seu funcionamento tem por base um oscilador de alta frequência que permite uma medição precisa da humidade em qualquer solo (Decagon Devices, 2008).



Figura 4.2.: Sensores da Decagon.

¹http://www.decagon.com/soil_moisture/

4. Módulo de Sensorização

Tabela 4.1.: Tabela de especificações dos sensores da Decagon (Decagon Devices, 2008).

Especificação	EC-5	10HC	5TE
<i>Campos de medição</i>	0 a 100% VWC	0 a 57% VWC	0 a 100% VWC
<i>Alimentação</i>	2,5 a 5V (DC); 10mA	3 a 15V (DC); 12 a 15mA	3,6 a 15V (DC); 10mA
<i>Saída</i>	0,25 a 1V	0,3 a 1,25V	RS232
<i>Resolução</i>	0,25% VWC	0,08% VWC	0,08% VWC
<i>Precisão</i>	±2% VWC	±3% VWC	±2% VWC
Preço Unidade	91€	91€	264€

Nenhum destes sensores foi seleccionado devido ao preço elevado, como se pode observar na tabela 4.1, para além de que o distribuidor oficial em Portugal teria de importar os sensores dos Estados Unidos da América o que os tornaria ainda mais caros.

Vernier

Outro sensor encontrado é disponibilizado pela Vernier Software & Technology². Este sensor, representado na figura 4.3, tem um funcionamento baseado na medição da permissividade dieléctrica do solo, visto que esta grandeza é função da água presente no solo (Vernier Software & Technology, 2009).



Figura 4.3.: Sensor de humidade do solo da Vernier (Vernier Software & Technology, 2009).

Este sensor não foi seleccionado devido ao preço elevado, como se pode observar na tabela 4.2.

²<http://www.vernier.com/probes/sms-bta.html>

4. Módulo de Sensorização

Tabela 4.2.: Tabela de especificações do sensor de humidade do solo da Vernier (Vernier Software & Technology, 2009).

Especificação	Vernier
<i>Campos de medição</i>	0 a 45% VWC
<i>Alimentação</i>	5V (DC); 5mA
<i>Saída</i>	(não referido)
<i>Resolução</i>	0,1% (12 bits)
<i>Precisão</i>	±4% VWC
Preço Unidade	137,58€

Delta-T³

Comercializa os sensores SM200 e o ML2x *ThetaProbe*. Estes são do tipo dos anteriores, ou seja, medem a humidade do solo em função do conteúdo de água no mesmo através de um fenómeno electromagnético nas suas “hastes”.



Figura 4.4.: Sensores da Delta-T (Delta-T Devices, 2007).

Nenhum destes sensores foi seleccionado devido ao elevado preço, como se pode observar na tabela 4.3.

³<http://www.delta-t.co.uk/groups.html?group2005092332137>

4. Módulo de Sensorização

Tabela 4.3.: Tabela de especificações dos sensores da Delta-T (Delta-T Devices, 2007).

Especificação	SM200	ML2x
<i>Campos de medição</i>	0 a 50% VWC	5 a 50% VWC
<i>Alimentação</i>	5 a 14V; 12mA	5 a 15V; 15mA
<i>Saída</i>	0 a 1V	0 a 1V
<i>Resolução</i>	(não referido)	(não referido)
<i>Precisão</i>	±0,01% VWC	±0,01% VWC
Preço Unidade	266,20€	600€

Spectrum

Disponível está também o sensor SM100 produzido pela Spectrum⁴. O sensor é constituído por dois eléctrodos e o solo funciona como meio dieléctrico. Com um sinal de 80MHz, obtém-se um sinal da saída proporcional à permissividade dieléctrica do solo (Spectrum Technologies, n.d.b).



Figura 4.5.: Sensor SM100 da Spectrum.

Tabela 4.4.: Tabela de especificações do sensor SM100.

Especificação	SM100
<i>Campos de medição</i>	0 a saturação % VWC
<i>Alimentação</i>	3 a 5V; 6 a 10mA
<i>Saída</i>	0,5 a 1,5V (3V)
<i>Resolução</i>	0,1% VWC
<i>Precisão</i>	±3% VWC
Preço Unidade	62,61€ (\$89USD)

Pelo mesmo motivo dos anteriores, este sensor não foi seleccionado devido ao preço, tabela

⁴http://www.specmeters.com/international/Soil_Moisture/WaterScout_SM_100.html

4. Módulo de Sensorização

4.4, para além de que tinha de se adicionar o custo dos portes de envio dos Estados Unidos da América para Portugal.

IMKO

Outra produtora de dispositivos de medição, a IMKO⁵, disponibiliza várias soluções para medir a humidade do solo, entre elas estão os sensores TRIME-PICO64 e TRIME-PICO32. Após uma breve análise às características destes sensores, observa-se que são sensores de gama alta, pois incluem nas suas funcionalidades a medição da temperatura da solo para além da medição da humidade do solo. O método de funcionamento é similar ao já descrito, um oscilador (1GHz) cria um campo electromagnético e através dessa medição infere-se a permissividade dieléctrica do solo e conseqüente conteúdo de água (IMKO, 2009).



Figura 4.6.: Sensor SM100 da Spectrum (IMKO, 2009).

Tabela 4.5.: Tabela de especificações do sensor SM100 (IMKO, 2009).

Especificação	TRIME-PICO64	TRIME-PICO64
<i>Campos de medição</i>	0 a 100 % VWC	0 a 100 % VWC
<i>Alimentação</i>	7 a 24V; 100mA	7 a 24V; 100mA
<i>Saída</i>	0 a 1V	0 a 1V
<i>Resolução</i>	(não referido)	(não referido)
<i>Precisão</i>	±2% VWC	±2% VWC
Preço Unidade	450€	450€

Como se pode observar nas tabelas 4.1 à 4.5, estes sensores estão muito além do objectivo de custo reduzido inerente ao trabalho, pelo que foram descartados como opções válidas.

⁵http://www.imko.de/ENG/index.php?option=com_content&task=view&id=11&Itemid=11

4.2.2. Sensores Seleccionados

Foram encontrados alguns sensores que tendo em conta o seu preço e funcionamento, foram considerados interessantes. E dessa forma escolhidos para serem utilizados e experimentados neste sistema.

Delmhorst

Este sensor da Delmhorst⁶, GB-1, consiste num bloco de gesso, figura 4.7, que no seu interior contem dois eléctrodos concêntricos. O gesso actua como *buffer* (“protecção”) contra o efeito que os minerais no solo provocam na condutividade eléctrica. Quando um destes blocos está colocado no solo, vai absorver a sua humidade até atingir o equilíbrio.

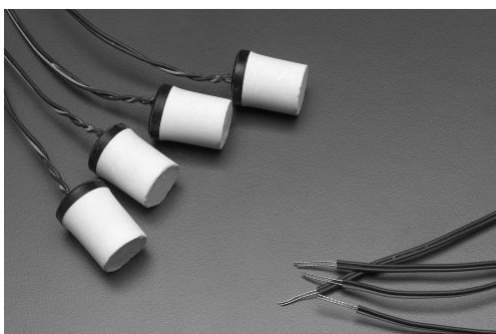


Figura 4.7.: Fotografia do sensor GB-1 da Delmhorst.

Para efectuar a medição, a corrente eléctrica alternada flui entre os eléctrodos e a resistência é medida. Estas medidas são uma indicação da humidade presente no solo e disponível para as plantas no local próximo do sensor.

Tabela 4.6.: Tabela de especificações do sensor GB-1 da Delmhorst (Delmhorst, 2003).

Especificação	GB-1
<i>Campos de medição</i>	0,1 a 15Bar SWT \Leftrightarrow (4 a 99% VWC)
<i>Preço Unidade</i>	11,50€

Apesar da pouca informação nas especificações do sensor, foi determinado que este funciona

⁶http://www.delmhorst.com/products_soil.html

4. Módulo de Sensorização

no intervalo de humidade desejado, logo é minimamente fiável.

Este sensor é vendido ao público com a possibilidade de aquisição de um dispositivo de leitura, para uma utilização fácil do mesmo. Neste trabalho não é utilizado este dispositivo. Deste modo, o sinal do sensor é enviado para o microprocessador para assim conhecer o valor da grandeza a medir.

Este sensor foi seleccionado para o desenvolvimento do sistema pelo baixo custo que apresenta, embora seja um sensor de gama baixa, pelo que terá certamente um tempo de vida útil menor que os já referenciados.

Instalação dos Sensores: Antes de se colocarem os sensores no solo, estes devem estar dois a três minutos submersos em água. De seguida deve-se abrir um buraco no solo e colocar-se um pedaço de terra bem húmida (“lama”) no mesmo buraco. O passo seguinte é colocar o sensor no solo húmido, de forma a que este cubra totalmente o sensor. Finalmente deve-se tapar o local do buraco e do solo húmido, e localizar de alguma forma o local.

O local onde se colocarão os sensores deve ser o mais possível, uma área representativa do solo dessa área, ou seja, não se deve colocar o sensor em locais com características específicas como zonas altas de baixa irrigação. A zona activa das raízes de uma determinada plantação, indica que será nessa mesma profundidade a que se deve colocar os sensores. Também se deve ter em conta (para além do tipo de plantação) a fase do crescimento da plantação. Para um excelente controlo de plantação, num mesmo ponto podem ser colocados dois sensores a profundidades diferentes (Delmhorst, 2003).

Watermark

Os sensores Watermark (figura 4.8), são sensores distribuídos por muitas empresas. No seu funcionamento utiliza um método indirecto de medição da quantidade de água presente no solo. São sensores do tipo resistivo, que convertem a resistência eléctrica para uma leitura calibrada de tensão de sucção do solo (com o apoio do dispositivo de leitura). Estes sensores operam da mesma forma que os sensores de bloco de gesso (4.2.2), mas incorporam uma cobertura exterior de aço inoxidável que protege a membrana, dando deste modo uma maior longevidade ao sensor mesmo em condições mais difíceis. O princípio de funcionamento consiste em o encapsulamento da sonda, ao ser um meio poroso, deixa que a humidade presente no solo se movimente para o seu interior ou exterior (quando existe irrigação ou não, respectivamente). Assim, quanto mais água existe no sensor, maior será a passagem de iões entre os eléctrodos, variando assim a resistência do mesmo com a variação da humidade (mais humidade implica melhor condutividade, que implica menor resistência), (ICT, n.d.).

4. Módulo de Sensorização



Figura 4.8.: Fotografia do sensor Watermark.

Tabela 4.7.: Tabela de especificações do sensor GB-1 da Delmhorst (Delmhorst, 2003).

Especificação	GB-1
<i>Campos de medição</i>	0 a 20bar SWT \Leftrightarrow (0 a 100% VWC)
<i>Preço Unidade</i>	32,75€

Normalmente estes sensores fazem-se acompanhar por um sistema de medida de interface (microprocessador) que fornece tensão alternada (AC) para excitar o sensor e guarda em memória a equação de calibração para corresponder a resistência medida à tensão de sucção do solo (em *kPa*). Neste trabalho não se irá utilizar o dispositivo de leitura (ICT, n.d.).

Como este sensor é um dos mais baratos no mercado é também aquele mais fácil de encontrar, diminuindo dessa forma qualquer custo com portes de envio de outro continente.

Este foi outro dos sensores escolhidos, já tem mais alguma robustez em relação ao anterior, apesar de ser também um pouco mais caro. Porém, não deixa de ter um preço acessível, pelo que apresenta aplicabilidade neste sistema.

Colocação dos Sensores

Os sensores devem ser colocados na zona activa das raízes e localizações representativas da humidade do solo. Este tipo de sensor, quando colocado no solo, deve estar saturado, ou seja, deve ter estado algum tempo em água, ou se possível realizar alguns ciclos de húmido-seco, isto é, mergulhar o sensor em água durante 30 minutos seguido de algumas horas de

4. Módulo de Sensorização

secagem. Este método irá melhorar a resposta do sensor durante as primeira irrigações. Tem de se fazer um buraco com a devida precaução para não danificar o sensor, e com a profundidade necessária para o colocar de forma correcta. O sensor deve ser coberto com uma camada de solo muito húmido ("lama"). Para óptima colocação, deve-se encher o buraco no solo com água e colocar o sensor com cuidado no seu interior. O buraco deve ser cuidadosamente tapado de modo a não deixar nenhuma bolsa de ar. Muito importante é que o solo esteja em contacto com o sensor, para reduzir erros nas leituras (Spectrum Technologies, n.d.a).

Vegetronix

A empresa Vegetronix⁷, disponibiliza o sensor VG400 como solução para medir a humidade do solo. Este sensor obtém a medição da humidade do solo medindo a constante dieléctrica do mesmo (Vegetronix, 2009).



Figura 4.9.: Sensor VG-400 da Vegetronix.

Tabela 4.8.: Tabela de especificações dos sensores da Decagon. (Decagon Devices, 2008)

Especificação	VG-400
<i>Campos de medição</i>	0 a 100% VWC
<i>Alimentação</i>	3,3 a 20V (DC); 0,8mA
<i>Saída</i>	1 a 3V
Preço Unidade	21,05€ (29,95USD)

Observando as características deste sensor, verifica-se que encaixa perfeitamente nos parâmetros de selecção definidos. No entanto, tem de se referir que este produtor não tem dis-

⁷<http://www.vegetronix.com/Products/VG400/>

4. Módulo de Sensorização

tribuidores associados, ou seja, tem de se adquirir o sensor ao produtor que está sediado nos Estados Unidos da América. Face a este constrangimento, tem de acrescer a este o custo dos portes de envio (31,63€ - 45USD), o que totaliza um valor de 52,68€ (74,95USD). É importante salientar que tem sido indicado o custo unitário tanto deste sensor como dos apresentados anteriormente, pelo que seguramente a compra em quantidade elevada faria o custo unitário diminuir.

Conclui-se assim que este sensor tem aplicabilidade no sistema, e apesar de ter algum custo associado consegue manter ainda valores aceitáveis, apresentando ainda a vantagem de ser um sensor que pode ser muito mais facilmente acoplado ao sistema que os outros sensores seleccionados, visto não necessitar (à primeira vista) de nenhuma electrónica de condicionamento de sinal.

No entanto não se avançou para a compra deste sensor visto a resposta do produtor relativamente ao preço ter sido tardia, não tendo havido disponibilidade temporal de os testar. Todavia, é apresentada a sua referência já que se apresenta como potencial solução para este problema.

4.3. Leitura do Sinal dos Sensores

Como referido nos pontos anteriores, os sensores escolhidos incorporam um dispositivo de leitura próprio que inclui toda a instrumentação necessária para a aquisição e condicionamento do sinal. Um destes dispositivos está representado na figura 4.10. Para este trabalho apenas foram adquiridos os sensores e não o dispositivo de leitura, face a diferentes factores: o sistema de leitura já existente não se enquadra no sistema que se está a criar, e também caso se adquirisse um destes sistemas, o custo iria aumentar consideravelmente. Assim e desta forma, é definido um método de aquisição e condicionamento de sinal de forma a se obterem leituras viáveis. De referir ainda que os distribuidores para venderem o sistema de leitura juntamente com os sensores, pouca informação disponibilizam sobre o funcionamento dos sensores, para além dos princípios básicos descrito no ponto 4.2.2.

A correcta medição do sinal requer que o funcionamento deste tipo de sensores seja analisado em pormenor. Estes são normalmente caracterizados como sensores resistivos. Com a variação da humidade (água presente no gesso), varia a constante dieléctrica e a resistência à passagem da corrente de um eléctrodo para o outro. Assim a grandeza fulcral a medir para se obter o valor da humidade é a resistência momentânea do sensor.

4. Módulo de Sensorização



Figura 4.10.: Fotografia do Medidor Watermark.

4.3.1. Medição da Resistência

Segundo WMO (2008), a forma correcta de medir a resistência destes sensores de bloco resistivo é excitá-los com um sinal de corrente alternada a uma frequência aproximada de 120Hz (Irrrometer Company, n.d.), pois ao utilizar corrente contínua, os eléctrodos são polarizados. Tem-se assim de simular o funcionamento da maioria dos dispositivos de leitura deste tipo de sensores, que utilizam uma onda quadrada de corrente ou tensão alternada, visto uma onda quadrada ser muito mais fácil de gerar que uma onda sinusoidal pura. Normalmente, o sinal de excitação deve ser simétrico em relação ao potencial da Terra, como refere IHRWM (2002).

Com base nesta informação definiu-se um pequeno circuito de condicionamento de sinal onde é gerada uma onda quadrada de 0V a 3V (devido à facilidade na geração desta onda com o auxílio do microcontrolador). Assim, elaborou-se o circuito de excitação do sensor, representado na figura 4.11.

Este circuito será composto por um oscilador, alimentado por um porto de saída do microcontrolador, que fornecerá ao sensor uma onda quadrada a uma dada frequência.

Os circuitos osciladores são montagens desprovidas de sinal de entrada (mas requer alimentação), que produzem sinais de tensão periódicos. A saída será próxima de um sinal rectangular de período T e *Duty Cycle* α . Um oscilador deste tipo possui geralmente como principal tarefa, o fornecimento de um sinal de relógio, o que não ocorre nesta aplicação.

4. Módulo de Sensorização

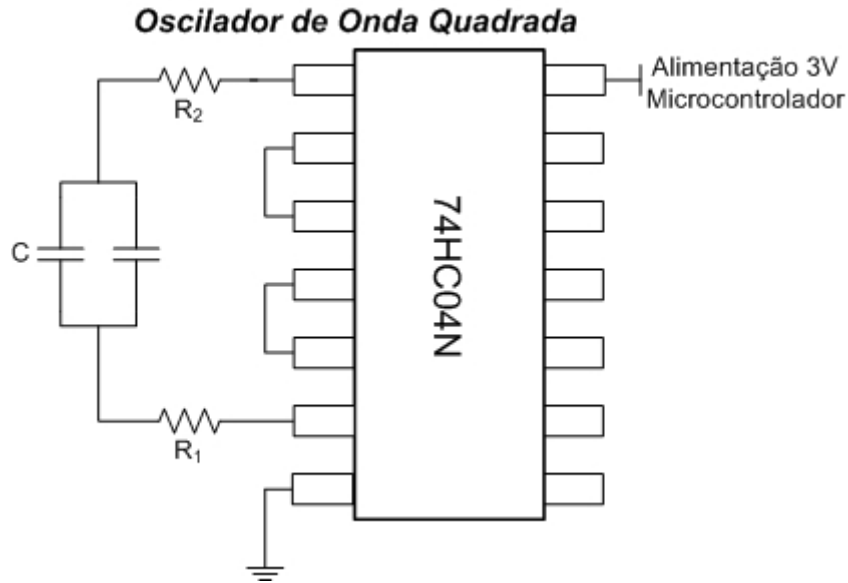


Figura 4.11.: Circuito de excitação do sensor.

Os parâmetros T e α são fixos pela escolha dos componentes passivos. Existem vários osciladores de onda quadrada que utilizam elementos lógicos. Estes circuitos têm como principais qualidades: boa estabilidade, operam a frequências de 1Hz a 15MHz, baixo consumo, etc. Qualquer número ímpar de portas inversoras, ligadas em anel, criam um oscilador. Para esta aplicação vai-se utilizar um oscilador RC (figura 4.12) com um *Duty Cycle* de aproximadamente 50%, onde a frequência pode ser obtida através da equação 4.5 (FSC, 1998).

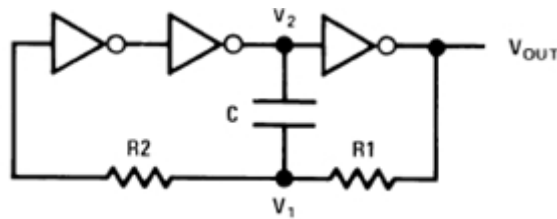


Figura 4.12.: Circuito do oscilador RC (FSC, 1998).

$$f \simeq \frac{1}{2R_1C \left(\frac{0,405R_2}{R_1+R_2} + 0,693 \right)} \quad (4.5)$$

4. Módulo de Sensorização

Onde f [Hz] é a frequência a que o circuito vai oscilar em função das resistências (R_1 e R_2) e o condensador (C). Que tomam os valores de:

- $R_1 = 17,98k\Omega$
- $R_2 = 232,5k\Omega$
- $C = 100nF + 100nF = 200nF$
- $f \simeq 130Hz$

Obtém-se assim um sinal de excitação do sensor numa onda quadrada de 156Hz, próximo do 130Hz calculados (como a fórmula expressa, este é um cálculo aproximado). Este tem também um circuito de condicionamento de sinal para que seja possível medir a resistência do sensor. Para se poder medir a resistência do sensor, e segundo a lei de Ohm ($U = RI$), tem de se conhecer a corrente e a queda de tensão nessa mesma resistência. Por isso, uma outra resistência auxiliar ($R = 10,5\Omega$) é necessária no circuito, representado na figura 4.13. Esta resistência vai influenciar o valor da resistência do sensor, mas ao ter um valor pequeno não alterará o funcionamento do sistema.

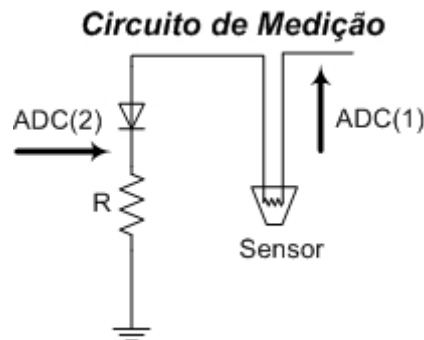


Figura 4.13.: Circuito do sensor.

Realizando as medições nos pontos ADC(1) (V_1 [Ω]) e ADC(2) (V_2 [Ω]), mede-se a corrente (I [A]) que passa no sensor através da equação 4.6 e de seguida a resistência do sensor (R_s [Ω]) pela equação 4.7.

$$I = \frac{V_2}{R} \quad (4.6)$$

4. Módulo de Sensorização

$$R_s = \frac{V_1 - V_2 - 0,7}{I} \quad (4.7)$$

Onde a queda de tensão no diodo é de $0,7V$. Desta forma apenas duas medições são necessárias (V_1 e V_2) para obter o valor da resistência do sensor.

Como o nome indica, as medições vão ser realizadas por um conversor analógico/digital (ADC) do microcontrolador a utilizar, que vai digitalizar os valores para de seguida se obter o valor da resistência. Visto que este sinal de excitação não é contínuo, tem de se ter algum cuidado na sua medição. É assim necessário realizar uns cálculos adicionais para obter o valor eficaz das tensões e dessa forma calcular a resistência. Com base numa onda quadrada de *Duty Cycle* de aproximadamente 50%, calcula-se o valor eficaz da tensão no sensor com base na equação 4.8.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^2} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2}{n}} \quad (4.8)$$

Onde V_{RMS} é a tensão eficaz ($[\Omega]$) a ser medida (RMS -*Root Mean Square*), e V_i é a tensão eficaz de cada medição ($[\Omega]$) e n é o número de medições.

4.3.2. Relação da Humidade do Solo com a Resistência do Sensor

Nos sensores utilizados, a resistência depende da temperatura. Assim, para uma medição mais precisa não se deve relacionar directamente o valor calculado da resistência com o valor de tensão no solo (SWT), mas utilizar uma equação não linear desenvolvida por Shock *et al.* (1998):

$$SWT = \frac{(4,093 + (3,213 \times R_s))}{(1 - (0,009733 \times R_s) - (0,01205 \times T_s))} \quad (4.9)$$

Onde, SWT ($-\psi_t$) é o potencial do solo (tensão) em $[kPa = cbar]$, a resistência R_s em $[k\Omega]$ e $T_s [^\circ C]$ é a temperatura estimada ou medida perto do sensor. De referir que esta equação foi deduzida para a sonda Watermark.

Com este valor pode-se assim perceber qual o nível de humidade presente no solo e qual o momento indicado a iniciar a irrigação. Para tal toma-se por base a tabela 4.9.

Outra fonte de conversão de resistência para as grandezas relativas à humidade no solo é a tabela 4.10.

4. Módulo de Sensorização

Tabela 4.9.: Tabela de relação entre SWT e o momento indicado para irrigar.

SWT [<i>cbar</i>]	Estado do Solo
0 a 10	Solo no estado de capacidade máxima (<i>Field Capacity</i>)
10 a 30	Solo adequadamente húmido
30 a 60	Iniciar irrigação para a maioria dos solos
60 a 100	Iniciar irrigação para solos argilosos (<i>Wilting Point</i>)
100 a 200	Solo perigosamente seco

Tabela 4.10.: Tabela de relações entra a resistência do sensor GB -1 com SWT e VWC.

VWC %	SWT [<i>cbar</i>]	Resistência [Ω]	VWC %	SWT [<i>cbar</i>]	Resistência [Ω]
99	1	60	53	20	5000
98	2	130	43	30	7200
96	3	260	37	40	9000
94	4	370	32	50	10700
91,5	5	540	28	60	12500
89	6	750	21	80	16540
87	7	860	15	100	21130
84,5	8	1100	10	120	26270
80,5	9	1400	4	150	35000

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

Para a comunicação entre os microcontroladores, onde serão recolhidos e armazenados temporariamente os dados, e o computador onde os mesmos dados serão analisados, utiliza-se um sistema de comunicação em rádio frequência de baixo consumo. Este é um sistema sem fios que vai permitir uma maior liberdade na colocação dos pontos de medida (sensor mais microcontrolador), ao não conter fios pelo solo ou pelo ar, permitindo uma locomoção livre de pessoas e veículos (ex: máquinas agrícolas). Este sistema tem de ser de baixo consumo energético, para que se mantenha activo e em funcionamento durante bastante tempo.

A Texas Instruments, produtora de material electrónico, dispõem de várias soluções.

5.1. Comunicação Sem Fios

Hoje em dia, cada vez mais as comunicações sem fios (*wireless*) estão a ser a principal escolha entre os utilizadores. É cada vez mais um método de comunicação usual, visto haver possibilidade de ser utilizada em variadíssimos locais, mesmo que nestes seja também possível utilizar comunicações com fios (Labiód *et al.*, 2007).

Para além do conforto pessoal, outros motivos influenciam uma utilização cada vez maior de redes sem fios. A necessidade de mobilidade e o custo, cada vez mais elevado, em distribuir fios, a possibilidade de conexão pessoal e independente do local a uma rede, numa grande área, são motivos e vantagens das redes sem fios (Ergen, 2004).

Os avanços recentes das tecnologias de redes sem fios possibilitaram o surgimento de vários sistemas diferentes. Até recentemente, a grande maioria destes sistemas tinha como premissa principal prover um conjunto de protocolos que garantissem a qualidade na transmissão de voz ou de dados com altas taxas de transferência, o que tornava os equipamentos bastante caros e pouco atraentes para outras aplicações mais simples. Começam a aparecer cada vez mais padrões de redes sem fios para aplicações em redes locais utilizando sensores e outros dispositivos de controlo. Estes sistemas não necessitam de uma largura de banda elevada para funcionarem, mas necessitam de uma latência baixa e consumo de energia igualmente baixo (Pinheiro, 2008).

As recomendações do IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*; organização

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

sem fins lucrativos que rege as regras das comunicações sem fios), em particular a série IEEE 802.11, são os exemplos mais conhecidos para as redes sem fios. Estas permitem considerar a existência de quatro grandes grupos:

- **WPAN** (*Wireless Personal Area Network*) - tecnologias de pequeno alcance (entre 10 a 100m). É um padrão para redes locais, definido pelo IEEE 802.15, para dispositivos portáteis ou móveis tais como PC's, PDA's, periféricos, telemóveis, etc;
- **WLAN** (*Wireless Local Area Network*) – tecnologias sem fios destinadas à interligação de redes locais (100 a 300m). Trata-se de padrão implementado como extensão ou alternativa para as redes de cabos convencionais (fibra óptica);
- **WMAN** (*Wireless Metropolitan Area Network*) - tecnologias que tratam dos acessos de banda larga para redes em áreas metropolitanas, com alcance em torno de 6km;
- **WWAN** (*Wireless Wide Area Network*) – tecnologias voltadas para redes de longa distância em telecomunicações, atendendo aos serviços de voz e alguns serviços de dados.

Presentes nestes quatro grupos temos várias tecnologias a operar, definidas pelo IEEE, algumas das quais apresentadas na figura 5.1.

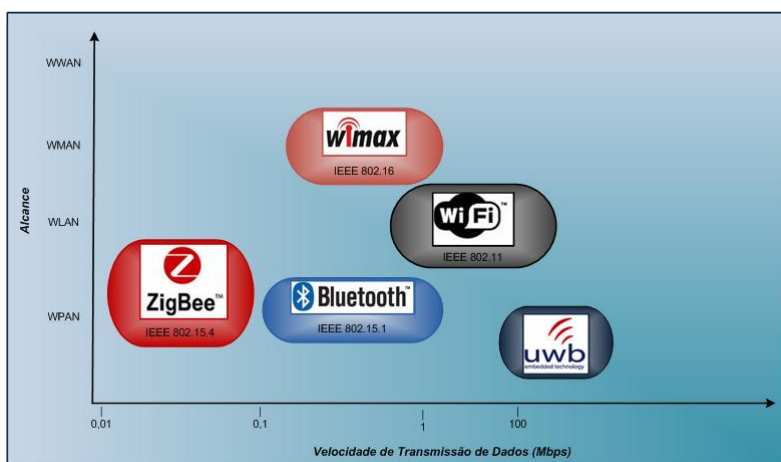


Figura 5.1.: Tecnologias de redes sem fios.(da Silva, 2007)

Neste momento as redes *wireless* comerciais focam-se no contexto das redes locais (WLAN's), tanto em soluções proprietárias como nos padrões desenvolvidos pelo IEEE. Com a evolução

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

tecnológica, as redes sem fios passaram, não a ser somente aplicadas em soluções mais sofisticadas, como também em projectos mais pequenos que necessitam de menores volumes de dados e mais baixas taxas de transmissão (ex: sensores, actuadores electrónicos, etc.). Estas tecnologias têm o propósito de permitir o controlo remoto de equipamentos domésticos (televisões, luzes, frigorífico, etc.), eliminando os cabos e tornando mais prática a operação desses equipamentos.

Um padrão que gere este tipo de aplicações de controlo de dispositivos domésticos é conhecido como ZigBee, que corresponde ao IEEE 802.15.4, homologado em Maio de 2003 (Pinheiro, 2008).

O padrão ZigBee foi desenvolvido com intuito de alcançar baixo custo, baixa alimentação, pouco alcance e tamanho reduzido. Assim, a baixa transferência de informação (*low data rate*) resulta em baixo consumo o que por sua vez torna os seus dispositivos a serem de baixo custo e de longa vida útil, beneficiando o público-alvo (aplicações domésticas e em alguns casos industriais) (Ergen, 2004).

5.2. ZigBee

O grupo de trabalho da IEEE 802.15.4 começou por trabalhar neste protocolo, mas mais tarde decidiu juntar forças com uma organização (grupo de várias empresas), a *ZigBee Alliance*, e juntos criaram esta tecnologia com o nome comercial de ZigBee. A tecnologia ZigBee tem por natureza a baixa transferência de dados, baixo consumo na alimentação, baixo custo que visa assim atingir mercados na área da automação e controlo remoto de determinadas aplicações. Permite a conectividade de equipamentos que necessitem de funcionar a bateria durante meses ou até vários anos. Este protocolo de comunicações pode ainda ser implementado em redes com malhas com muitos elementos. A rede sem fios deve transmitir dados entre os elementos a distâncias de 10 a 75m, dependendo do ambiente envolvente (obstáculos físicos e interferência electromagnética, etc.) e do consumo de energia numa aplicação.

Como da Silva (2007), refere podem-se identificar dois tipos de dispositivo físicos numa rede ZigBee, sendo estes definidos pelo IEEE:

- **FFD** (*Full Function Device*) - pode funcionar em todas as topologias, desempenhando a função de coordenador da rede e conseqüentemente ter acesso a todos os outros dispositivos;
- **RFD** (*Reduced Function Device*) – é limitado a uma configuração com topologia em estrela, não podendo actuar como um coordenador da rede. Pode comunicar-se apenas com um coordenador de rede.

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

No entanto em relação a estes, o protocolo ZigBee efectua ainda uma distinção entre eles (da Silva, 2007), resultando assim em três tipos de dispositivos lógicos que criam a rede de comunicação:

- **Coordenador** (*Coordinator*) - este elemento é o que forma a rede e o primeiro elemento da rede, a sua principal função é a de iniciar e configurar a rede. É onde os dados vão ser recolhidos (Texas Instruments, 2008a).
- **Nó da Rede** (*Router*) - este tipo de elementos permite a outros elementos entrar a qualquer momento na rede, a estes são chamados “filhos”, estes podem ainda ser do tipo *Router* (nó de rede) ou *End Device* (nó final). Permitem ainda assistir na comunicação dos nós “filhos” ligados a ele, funcionando como intermediário (Texas Instruments, 2008a).
- **Nó Final** (*End Device*) - um dispositivo final não tem nenhuma responsabilidade em manter a infraestrutura da rede, estes apenas têm de medir uma grandeza (neste caso humidade do solo) e transmiti-la (Texas Instruments, 2008a).

Com esta descrição dos elementos de uma rede sem fios ZigBee pode-se conhecer sucintamente as topologias presentes neste tipo de redes (da Silva, 2007). De referir que cada uma das topologias podem coexistir dentro de uma mesma rede:

- **Estrela** (*Star*) - cabe ao ZigBee Coordenador todo o controlo da rede, assumindo um papel central e de comunicação directa com todos os outros dispositivos como *End Device* (figura 5.2).

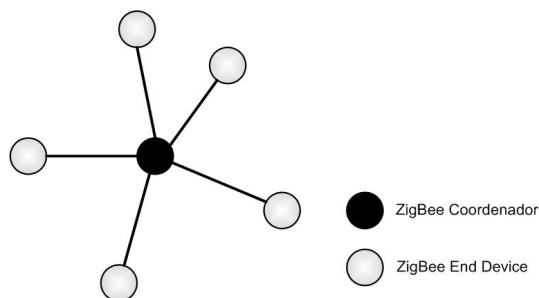


Figura 5.2.: Topologia ZigBee em estrela (da Silva, 2007).

- **Malha** (*Mesh*) - nesta topologia em malha os elementos do tipo FFD (Coordenadores-*Routers*) são livres de comunicar com qualquer outro dispositivo FFD, isto permite a

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

expansão física da rede; o Coordenador regista toda a entrada e saída de elementos na rede (figura 5.3).

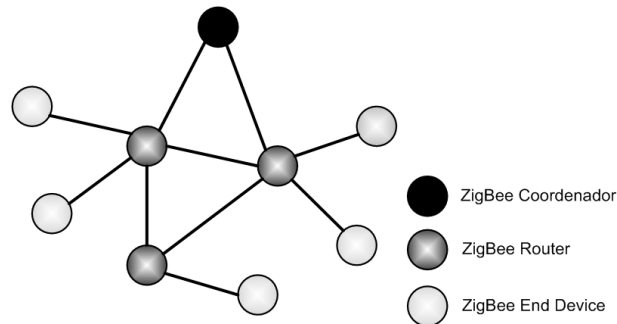


Figura 5.3.: Topologia ZigBee em malha (da Silva, 2007).

- **Árvore (Cluster Tree)** - com muitas semelhanças em relação à topologia em malha, no entanto nesta efectua-se a distribuição de dados e mensagens de controlo numa estrutura hierárquica, onde o Coordenador assume o papel de elemento nuclear (figura 5.4).

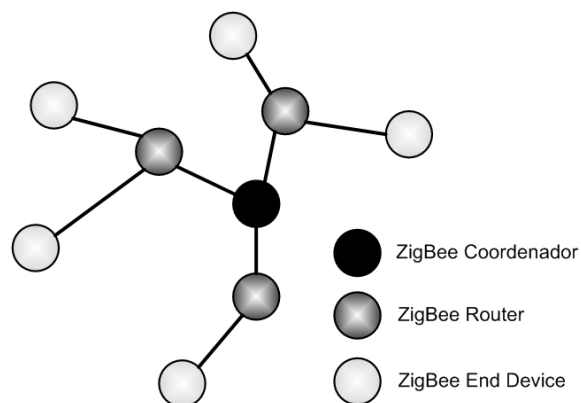


Figura 5.4.: Topologia ZigBee em Árvore (da Silva, 2007).

5.2.1. Arquitectura do Protocolo

A arquitectura do ZigBee é definida em termos de um número de blocos para se tornar mais simples. Estes blocos são chamados camadas (*Layers*). Cada camada é responsável por uma função e oferece serviço às camadas superiores, (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007). Estas definem o bom funcionamento das comunicações entre os elementos da rede. Na figura 5.5 pode-se observar a arquitectura ZigBee.

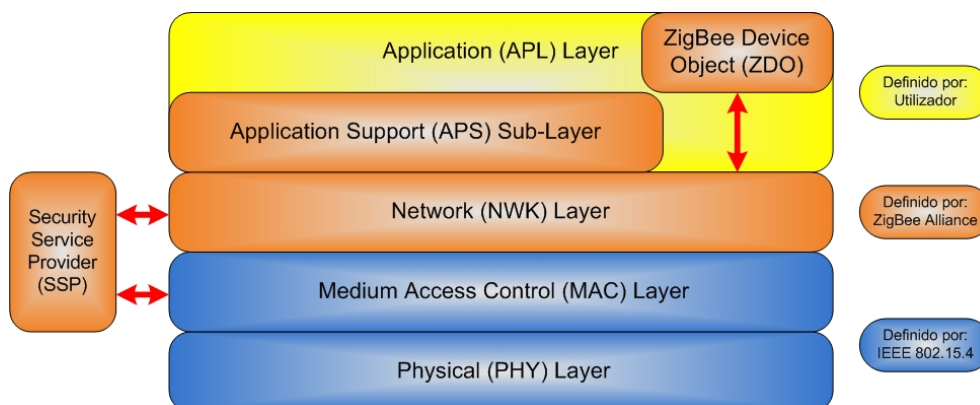


Figura 5.5.: Arquitectura do protocolo ZigBee.

O IEEE 802.15.4 vai definir as primeiras camadas (PHY e MAC). A primeira contém os mecanismos de controlo dos *tranceivers* (emissor-receptor) de rádio-frequência (RF) e a segunda (MAC) presta acesso a todo o tipo de transferências aos canais físicos, (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

As camadas superiores consistem na camada de rede (NWK), que configura a rede e realiza o *message routing*; de seguida tem-se a camada de aplicação onde se define a função da rede. Estas últimas camadas não são definidas pelo grupo de trabalho do IEEE, mas sim pela *ZigBee Alliance*, (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

- **Physical Layer (PHY)**

A camada PHY, definida pelo IEEE 802.15.4 inclui recursos como detecção de energia (*receiver energy detection* - ED) e detecção da qualidade da ligação (*link quality indication* - LQI) e ainda avaliação de canal (*clear channel assessment* - CCA). É ainda responsável por operar nas frequências mundiais sem licença (2,4GHz - Mundial; 915MHz - América; 868MHz - Europa). Estas três frequências de rádio são conhecidas como ISM, *Industrial Scientific*

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

and Medical (da Silva, 2007). Utiliza uma técnica de transmissão de Sequência Directa (*Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS*), na qual os dados são transmitidos em vários canais ao mesmo tempo, um canal na banda de 868MHz, dez canais na banda de 15MHz e 16 canais na banda de 2,4GHz.

- **Media Access Control Layer (MAC)**

Esta camada (MAC) oferece comunicações fiáveis entre um nó e o seu vizinho. Uma das suas principais tarefas consiste em perceber quando o canal de transmissão está livre antes da comunicação. Este processo é conhecido como *Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance* (CSMA-CA). Oferece ainda um *beacon* (sinal sinalizador) de sincronização para melhorar a eficiência das comunicações. Esta camada também empacota a informação em pequenos *frames*antes da transmissão e depois noutro dispositivo desempacota a informação e realiza uma verificação de erros.

- **Network Layer (NWK)**

A camada de rede (NWK) oferece as capacidades necessárias para encontrar os caminhos de comunicação (*routing* de mensagens) necessários à camada MAC e formar as diversas topologias da rede (estrela, árvore e malha). O coordenador estabelece os novos endereços dos novos nós da rede. Para dispositivos finais resulta apenas em juntar e deixar a rede. Para os nós intermédios (*Routers*), estes têm de conseguir enviar informação, descobrir nós vizinhos e fazer ligações a esses outros dispositivos.

- **Application Support Layer (APS)**

Quanto a esta camada, contém a sub-camada *Application Profile Support* (APS), o *ZigBee Device Object* (ZDO) e a *Application Framework* (AF). Esta camada pretende assegurar uma correcta gestão e suporte para as diversas aplicações. As responsabilidades da APS incluem a de manter a habilidade de dois nós estarem ligados (devido aos seus serviços e necessidades), ou seja trocar mensagens entre dispositivos ligados entre si; para além disto deve ainda determinar se qualquer outro dispositivo se encontra ao seu alcance. Quanto ao ZDO deve definir qual o papel que um dispositivo tem dentro da rede (se é coordenador, *router* ou dispositivo final). Quanto à estrutura da aplicação (AF) é definida pelo utilizador final.

5.2.2. Funcionamento Geral

Estrutura do *Superframe*

Este tipo de redes de baixa transmissão de dados permite o uso opcional da estrutura do *superframe*. O formato do *superframe* é definido pelo coordenador. O *superframe* é delimitado

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

por *beacons* e é dividido em dezasseis espaços iguais (posições). O *beacon* é transmitido no primeiro espaço do *superframe*. Os *beacons* servem para sincronizar os vários nós interligados e descrever a estrutura do *superframe*. Se um outro dispositivo tentar comunicar durante um *superframe* (*Contention Access Period* - CAP) terá de competir com o nó através do processo CSMA-CA. Todas as comunicações têm de estar terminadas quando vier o próximo *beacon*. O *superframe* pode ter uma zona activa e outra inactiva, durante a zona inactiva o coordenador deve interagir com a rede e pode entrar em modo de suspensão (*Low-Power Mode*). Neste tipo de redes o coordenador pode dedicar zonas da parte activa do *superframe* para aplicações que necessitem de larguras de banda específicas. Estas zonas são chamadas de *Guaranteed Time Slots* (GTS) e vêm sempre no fim da zona activa, podendo ocupar mais do que uma posição. Uma representação do *superframe* pode ser vista na figura, (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

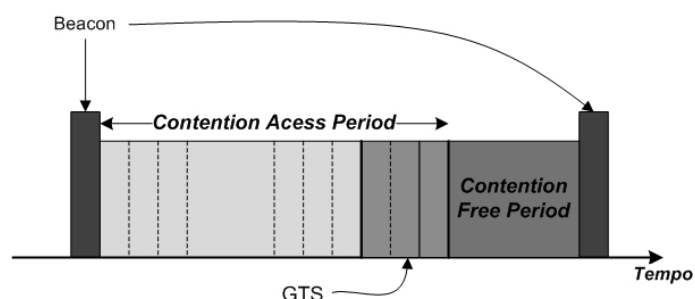


Figura 5.6.: Representação da estrutura do Superframe com GTSs e CFP. (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007)

Modelo de Transferência de Informação

Existem três tipos de transferência de informações, o primeiro consiste na transferência de informações para o coordenador por um outro elemento; o segundo é o sentido inverso que consiste no envio de informação do coordenador para outro elemento; e finalmente existe a troca de informação entre dois elementos da rede. O mecanismo de cada transferência de informação depende se a rede suporta a transmissão de *beacons*. A utilização de *beacons* é extremamente necessária quando a rede funciona com periféricos de computadores (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

Em relação à transferência de informação de um nó para o coordenador, o nó tenta “ouvir” o *beacon*, quando o encontra sincroniza-se com o *superframe* e no ponto apropriado o dispositivo envia a informação (no seu *data frame*) utilizando o processo CSMA-CA. De seguida

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

o coordenador reconhece o sucesso da recepção da informação e transmite um *frame* de reconhecimento de sucesso (opcional). A transição e informação está assim completa, e representada na figura 5.7. Quando um dispositivo deseja transmitir dados numa rede com o *beacon* inactivo, simplesmente transmite os dados utilizando CSMA-CA, e de seguida o coordenador transmite a mensagem de recepção e validação dos dados, (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

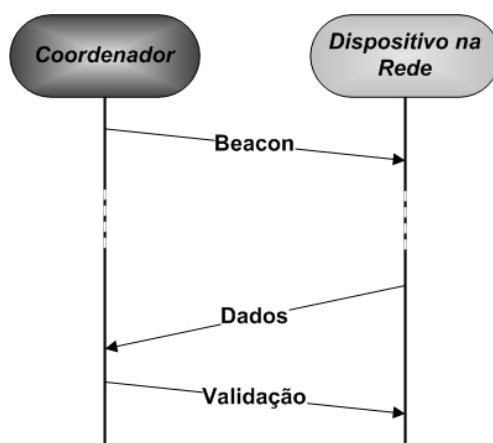


Figura 5.7.: Representação da comunicação para o Coordenador numa rede com *beacon* activo (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

No caso da transacção de dados ter de se realizar no sentido oposto ao anterior, ou seja, do coordenador para um qualquer dispositivo na rede, este (o coordenador) indica no *beacon* transmitido à rede que tem uma mensagem pendente. Como o dispositivo da rede “ouve” regularmente o *beacon*, logo que se aperceba que existe uma mensagem pendente, transmite um comando MAC pedindo essa mensagem utilizando CSMA-CA. De seguida o coordenador envia uma mensagem de recepção do pedido, e utilizando CSMA-CA envia a informação pendente. Logo que a transacção termine, o dispositivo envia ao coordenador uma outra mensagem de validação da recepção da informação. Deste modo, a transacção de informação fica concluída. Logo que o coordenador receba a mensagem de validação de entrega da informação, os dados são removidos das mensagens pendentes. Numa rede em que o *beacon* esteja inactivo o coordenador guarda a mensagem até que o dispositivo apropriado faça contacto pedindo a informação. Como a mensagem está pendente, o coordenador envia-la utilizando CSMA-CA. Se o dispositivo de rede pede informação ao coordenador e este não tem nenhuma informação pendente, este transmite um *data frame* sem informação (mensagem vazia), e todos os processos seguintes se realizam de igual modo a uma rede com

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

beacon activo (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

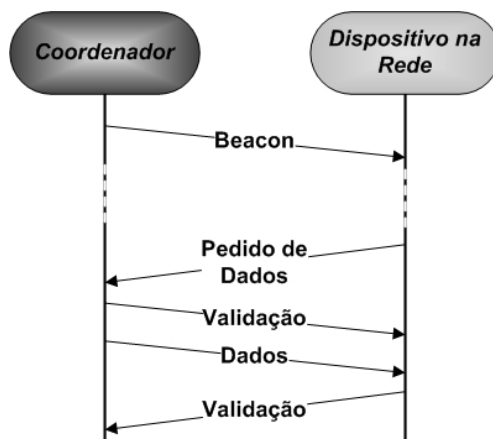


Figura 5.8.: Representação da comunicação do Coordenador para um dispositivo na rede numa rede com *beacon* activo (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

Um nó presente numa rede sem fios pode comunicar com outro dispositivo desde que este esteja ao seu alcance. Assim sempre que um dispositivo queira comunicar com outro deve realizar sincronização ou estar em constante recepção de informação (utilizando CSMA-CA).

5.2.3. Estrutura do Frame

A estrutura do *frame* foi definida para que seja muito simples mas ao mesmo tempo seja suficientemente robusta para transmissão de informação num canal que tenha muito ruído. Cada camada adiciona ao *frame*, *headers* (cabeçalho correspondendo a bytes de informação antes dos dados da mensagem) e *footers* (rodapé correspondendo a bytes de informação depois dos dados da mensagem).

Normalmente, os *frames* começam com um preâmbulo de 4 bytes, que sincronizam o transmissor com o sinal de chegada. A seguir ao preâmbulo temos o limitador do *frame*, campo composto por uma sequência fixa de oito bits para indicar o fim da sincronização. O campo seguinte, indica o tamanho do *frame* da camada MAC, por exemplo, se indicar que tem cinco bytes estamos na presença de uma mensagem de validação (como se vai observar mais à frente).

Este tipo de redes de baixa transmissão de dados tem quatro estruturas de *frames* distintas (secção 5.2.2):

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

- O **beacon frame** (utilizado pelo coordenador para enviar *beacons*), conforme representado na figura 5.9:

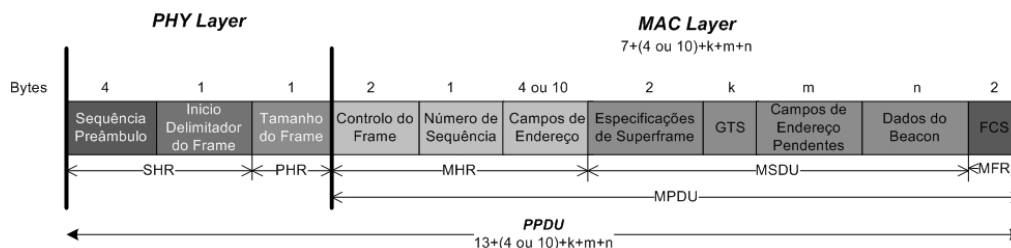


Figura 5.9.: Representação do *frame* do *beacon* quando este está activo (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

- O **frame de dados** (*data frame* - utilizado nas transferências de dados), representado na figura 5.10:

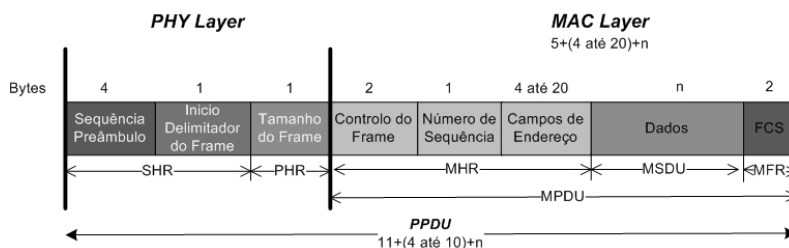


Figura 5.10.: Representação do *frame* de dados (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

- O **frame de validação** (utilizado para confirmar o sucesso na recepção do *frame* de dados), representado na figura 5.11:

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

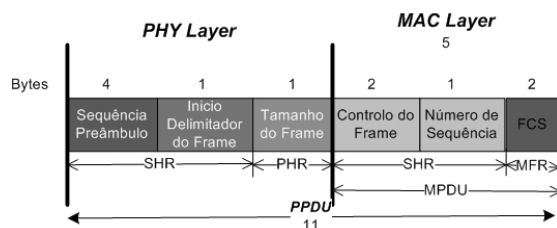


Figura 5.11.: Representação do *frame* de validação e recepção de dados (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

- O *frame* de comandos MAC (utilizado para lidar com o controlo de transferências), representados na figura 5.12:

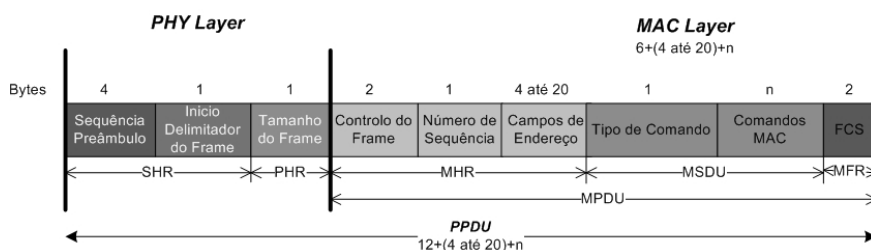


Figura 5.12.: Representação do *frame* de comandos MAC (IEEE 802.15.4, 2006 - 2007).

5.3. Selecção do Sistema a Utilizar

Este sistema de comunicação sem fios baseado no protocolo ZigBee foi escolhido devido às suas funcionalidades que se enquadram muito bem nas necessidades do problema. Ou seja, é necessário um sistema de rede de comunicação sem fios de montagem fácil e com uma vida útil bastante grande. Como já se viu anteriormente, devido à baixa taxa de transmissão de dados, os vários nós da rede têm a possibilidade de funcionarem durante muito tempo. Também uma baixa transmissão de dados é suficiente, pois apenas os dados lidos dos sensores no solo serão transmitidos. Os dispositivos têm de funcionar no modo “adormecido” (*low power mode*) durante a maior parte do tempo e a uma pré-determinada hora acordar, e aí realizarem a leitura dos dados no solo e transmiti-los ao dispositivo hierarquicamente superior.

Para fazer este tipo de redes neste protocolo, escolheu-se utilizar o *Z-Accel Demonstration Kit* eZ430-RF2480. Este *hardware* foi seleccionado por vários motivos. Um desses é a

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

proximidade e facilidade nas relações entre universidade e a empresa *Texas Instruments* (TI). No entanto, foi ainda avaliado o custo destas placas, para se atingir o objectivo final de um sistema acessível monetariamente. Em relação a este ponto, conclui-se que este *kit*, é uma boa aposta, visto que com ele é possível implementar uma pequena rede (três nós) a um custo aceitável.

Tudo isto adicionado à experiência existente na universidade na utilização de outros sistemas da TI, levaram a que se optasse por adquirir este *kit* e a desenvolver a solução no mesmo.

5.3.1. Sistema a Utilizar

Para a função de comunicar as leituras realizadas no campo pelos sensores é utilizado o *Z-Accel Demonstration Kit eZ430-RF2480* ou seja, o módulo de demonstração de comunicações sem fios da *Texas Instruments eZ430-RF2480*.

Este módulo de demonstração consiste no *hardware* necessário para demonstrar a funcionalidade ZigBee com o dispositivo CC2480. Assim, este pacote inclui três *Target Boards* CC2480, um *eZ430 USB Emulator Board* e duas *eZ430 Battery Boards* representados na figura 5.13.

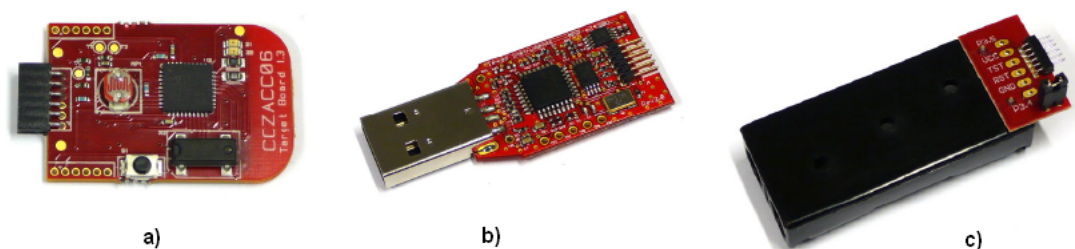


Figura 5.13.: a) *Target Board* b) *Emulator Board* c) *Battery Board* (Texas Instruments, 2008f).

As *Target Boards* (figura 5.13, a)) ligam o microcontrolador MSP430F2274 para o processador de rede CC2480 por ligação SPI (*Serial Peripheral Interface*). Esta placa foi desenhada pela TI para ser de tamanho reduzido, mas incluindo uma antena, dois LED's (pequenos díodos emissores de luz, um verde e outro vermelho), um pequeno botão de pressão e ainda cinco portos (GPIO) de entradas ou saídas do sistema.

A *USB Emulator Board* (figura 5.13, b)) permite conexão série USB e alimentação da *Target Board* (com os dispositivos CC2480 e MSP430F2274). Esta é a placa que controla a rede e onde será recebida a informação de todos os outros constituintes da rede sem fios.

A *Battery Board* (figura 5.13, c)) é o interface que fornece alimentação às *Target Boards* constituintes da rede sem fios. São alimentadas por duas pilhas AA.

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

Um módulo de demonstração eZ430-RF2480 pode formar uma rede com um coordenador (figura 5.14, a)) que liga num computador pela porta USB e tem dois outros dispositivos (figura 5.14, b)), que podem funcionar como *routers* ou *end devices*.

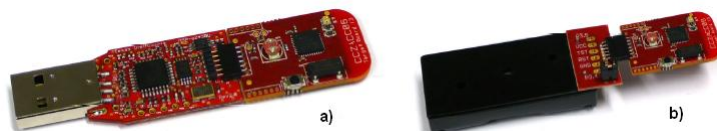


Figura 5.14.: Placas do módulo de demonstração eZ430-RF2480 (Texas Instruments, 2008f).

Baseado em testes práticos realizados pela TI, com um dispositivo ligado a um computador e outro ligado à bateria, as medições realizadas no interior de um edifício, com os dispositivos em linha de visão entre si revelaram um alcance de mais de trinta e cinco metros. Esta distância pode ser afectada significativamente pela orientação das placas e pelo ambiente envolvente. Nota ainda para que o *kit* eZ430-RF2480 não tem como objectivo primordial a maximização do alcance de rádio-frequência (Texas Instruments, 2008f).

5.3.2. Recursos do MSP430F2274

A família dos microcontroladores MSP430 da Texas Instruments contém diversos dispositivos com um conjunto de periféricos para diferentes aplicações. A arquitectura, combinada com os vários módulos de *low power* (“adormecimento”) tem o objectivo de obter uma extensa utilização da bateria em aplicações de medição portátil. Este dispositivo inclui um 16-bit RISC CPU, registos de 16 bits e geradores de constantes que contribuem para a eficiência do código. O oscilador controlado digitalmente (DCO - *Digitally Controlled Oscillator*) permite sair do modo de baixo consumo energético para o modo activo em menos de $1\mu s$ (Texas Instruments, 2006). De forma mais específica pode-se dizer que o MSP430F2274 possui os seguintes recursos (Texas Instruments, 2006):

- Baixa tensão de alimentação de $1,8V$ a $3,6V$;
- Baixo consumo de corrente; Modo activo: $270\mu A$ a $1MHz$, $2,2V$; Modo *Standby*: $0,7\mu A$; Modo *off* (retenção da RAM): $0,1\mu A$;
- Passagem do modo de *Standby* a Activo ultra-rápido, em menos de $1\mu s$;
- Arquitectura de 16-Bit RISC, tempo de ciclo de instruções de $62,5ns$;

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

- Configurações básicas do módulo de *Clock* (relógio): Frequências Internas até 16MHz com quatro frequências calibradas a $\pm 1\%$; Oscilador de baixa frequência e muito baixo consumo; Cristal de 32kHz; Cristal de alta frequência (até 16MHz); Oscilador de Ressonância (*Resonator*); Fonte digital externa de *Clock*; Resistência Externa;
- Temporizador de 16-Bit (Timer_A) com três registros de captura/comparação (*Capture/Compare*);
- Temporizador de 16-Bit (Timer_B) com três registros de captura/comparação (*Capture/Compare*);
- Interface Universal de Comunicações Série (USCI - *Universal Serial Communication Interface*): UART; IrDA *Encoder* e *Decoder*; SPI síncrono e I²C;
- Conversor Analógico-Digital de 10 Bit (200-ksps) com referência interna, *Sample-and-Hold*, *Autoscan*, e controlador de transferência de dados;
- Dois amplificadores operacionais;
- *Brownout Detector*;
- *Bootstrap Loader*;
- Módulo de emulação no mesmo chip;
- 32KB + 256B de memória *Flash* 1KB de RAM;
- 40 pinos QFN *Package* (RHA);
- 32 pinos de entrada/saída.

Este microcontrolador é disponibilizado em dois encapsulamentos diferentes. Cada um destes tem um intervalo de temperatura de funcionamento diferente. Como não há informação para definir qual é o encapsulamento utilizado, admite-se que se está a utilizar o pior caso (para maior segurança). Assim, parte-se do princípio que é utilizado o que funciona no menor intervalo de temperatura, $T_{min} = -40^{\circ}C$ a $T_{máx} = 85^{\circ}C$, (*package* MSP430F2274IRHA) (Texas Instruments, 2006).

As aplicações típicas incluem sistemas de captura de sinais analógicos de sensores, conversão dessas leituras para valores digitais e depois processamento dos dados para visualização ou transmissão a um sistema controlador (Texas Instruments, 2006).

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

Para mais informação sobre os recursos deste dispositivo, consultar o *DataSheet* do MSP (Texas Instruments, 2006), o *User's Guide* da família dos microcontrolador em estudo (Texas Instruments, 2008c) e ainda consultar o sítio *online* da Texas Instruments¹.

5.3.3. Aplicação Experimental do Kit

Este módulo de demonstração para comunicações sem fios segundo o protocolo ZigBee, inclui uma aplicação. Esta consiste em demonstrar que as placas funcionam devidamente, e demonstram ainda a criação da rede de comunicações e as comunicações em tempo real. Esta aplicação resulta na criação da rede por um coordenador que vai receber dados de dois *routers* de dois *end devices* ou um de cada, dependendo da topologia que o utilizador preferir utilizar. Os dados (neste caso, a temperatura e energia restante na bateria) são lidos nos dispositivos transmitidos ao coordenador e representados no computador onde o coordenador está ligado através de uma aplicação de suporte chamada *Sensor Monitor*, disponibilizada pela Texas Instruments, como se pode observar na figura 5.15.

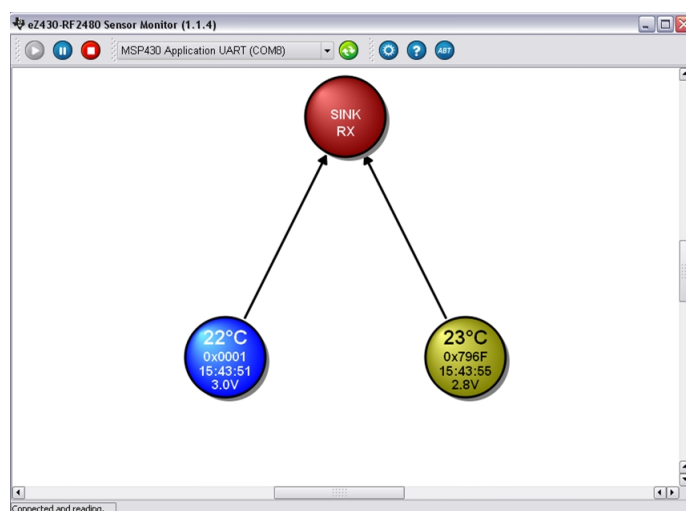


Figura 5.15.: *Screenshot* do Sensor Monitor (Texas Instruments, 2008f).

¹<http://www.ti.com/>

5.3.4. Funcionamento da Rede e os Pacotes de Informação (Exemplo de Aplicação)

Para se compreender o funcionamento da criação da rede sem fios e os pacotes de informação transmitidos entre os diferentes nós, foi realizada uma análise às comunicações da rede.

Assim e para se realizar este procedimento foi utilizado um sistema chamado *Packet Sniffer*, disponibilizado também pela TI. Este sistema, que já existia na universidade, é composto por duas placas, SmartRF04EB e CC2430EM e por um interface com o computador disponibilizado pela TI no seu site. Este sistema tem como objectivo captar, sem alterar, e mostrar todos os pacotes de dados enviados por qualquer dispositivo que transmita num determinado canal da frequência em utilização. Neste caso as comunicações registaram-se no canal 0x10 (hexadecimal) a 2430Hz.

Desta forma, pode-se observar os pacotes de dados quando se procura por dispositivos, quando estes se juntam à rede e lhes é atribuído um endereço e quando transmitem informação lida nos sensores.

Assim, em relação à aplicação em estudo, começa-se por ligar o coordenador ao computador e o interface *Sensor Monitor*. Estando já o *Packet Sniffer* ligado e configurado, observa-se as tentativas de o coordenador em formar a rede (figura 5.16), procurando por dispositivos disponíveis ao seu alcance. Visto que não há outro nó ligado, ele vai formar rede sozinho e esperar que outro dispositivo apareça.

Time (us) +0 =0	Length 10	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 0 0	Sequence number 0xF4	Dest. PAN 0xFFFF	Dest. Address 0xFFFF	Beacon request	LQI 80	FCS OK
Time (us) +624144 =624144	Length 10	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 0 0	Sequence number 0xF5	Dest. PAN 0xFFFF	Dest. Address 0xFFFF	Beacon request	LQI 72	FCS OK
Time (us) +639101 =1323245	Length 10	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 0 0	Sequence number 0xF6	Dest. PAN 0xFFFF	Dest. Address 0xFFFF	Beacon request	LQI 72	FCS OK
Time (us) +678702 =2001947	Length 10	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 0 0	Sequence number 0xF7	Dest. PAN 0xFFFF	Dest. Address 0xFFFF	Beacon request	LQI 80	FCS OK
Time (us) +683981 =2685928	Length 10	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 0 0	Sequence number 0xF8	Dest. PAN 0xFFFF	Dest. Address 0xFFFF	Beacon request	LQI 80	FCS OK
Time (us) +734596 =3420524	Length 10	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 0 0	Sequence number 0xF9	Dest. PAN 0xFFFF	Dest. Address 0xFFFF	Beacon request	LQI 64	FCS OK
Time (us) +617424 =4037948	Length 10	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 0 0	Sequence number 0xFA	Dest. PAN 0xFFFF	Dest. Address 0xFFFF	Beacon request	LQI 76	FCS OK

Figura 5.16.: Pacotes de dados registados pelo *Packet Sniffer* na tentativa do Coordenador em formar rede.

No passo seguinte liga-se um outro dispositivo, o qual é definido como *Router*, este começa por procurar uma qualquer rede já formada. Visto que já existe uma rede formada (apenas pelo coordenador), este vai tentar ligar-se a essa rede. O novo dispositivo vai enviar mensagem

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

de *Association Request* (pedido de associação à rede) onde é indicado a função do dispositivo e depois o coordenador vai transmitir uma mensagem de *Association Response* (resposta ao pedido de associação) onde se esta for bem sucedida, é definido pelo coordenador um *Short Address* para o novo dispositivo, como se pode ver na figura 5.17. No caso da associação não ser bem sucedida, o dispositivo volta a tentar até se conseguir ligar.

Time (us) +2618 =60982551	Length 24	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN BCN 0 0 0 0	Sequence number 0x90	Source PAN 0x1123	Source Address 0x0000	Superframe specification B0 S0 F.CAP BLE Coord Assoc 15 15 15 0 1 1	GTS fields Len Permit 0 0	Beacon payload 00 21 84 23 51 0B 00 00 4B 12 00	LQI 96	FCS OK
Time (us) +510370 =61492921	Length 21	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 1 0	Sequence number 0xE7	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0x0000	Source PAN 0xFFFF	Source Address 0x00124B00000B5124	Association request Alt. coord FFD Power Idle RX Sec Alloc addr 0 1 1 1 0 1	LQI 76	FCS OK
Time (us) +1056 =61492977	Length 5	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN ACK 0 0 0 0	Sequence number 0xE7	LQI 96	FCS OK					
Time (us) +495292 =6198269	Length 18	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 1 1	Sequence number 0xE8	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0x0000	Source Address 0x00124B00000B5124	Data request	LQI 84	FCS OK	
Time (us) +961 =61990230	Length 5	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN ACK 0 1 0 0	Sequence number 0xE8	LQI 96	FCS OK					
Time (us) +2939 =61993169	Length 27	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 1 1	Sequence number 0xE9	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0x00124B00000B5124	Source Address 0x00124B00000B5123	Association response Short addr Assoc. status 0x0001 Successful	LQI 96	FCS OK	
Time (us) +1248 =61994417	Length 5	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN ACK 0 0 0 0	Sequence number 0xE9	LQI 80	FCS OK					

Figura 5.17.: Pacotes de dados registados pelo *Packet Sniffer* na tentativa de um *Router* em ligar-se à rede.

Depois do *Router* se ter ligado com sucesso à rede, vai começar a trabalhar na sua função principal. Esta consiste em ler a energia da bateria, a temperatura do microcontrolador e transmitir estes dados num pacote de dados ao coordenador. Assim, e nesta aplicação, o *Router* vai transmitir um pacote de dados referentes às leituras, de 10 em 10 segundos. Exemplo do início dessa troca de informação encontra-se representado na figura 5.18.

De seguida, liga-se outro novo dispositivo à rede. Desta vez é criado um *End Device*, cuja função reside apenas em fazer as leituras e transmitir os dados para o *Router* mais próximo ou para o Coordenador. Assim, o dispositivo avisa a rede que se quer ligar através de um *Beacon Request*, que de seguida é enviado pelo coordenador. Logo que se adquira uma boa ligação tende-se a realizar os mesmos procedimentos que se viu na ligação do *Router*, ou seja, o dispositivo faz um *Association Request* (pedido de associação à rede) ao coordenador onde se indica que tipo de nó será. O coordenador por sua vez envia um *Association Response* onde é definido o *Short Address* do dispositivo e o sucesso da associação à rede. Estes pacotes podem ser observados na figura 5.19.

Visto que no *kit* da aplicação experimental não existem mais dispositivos a ligar (apesar de

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

Time (us) +30395 =62024812	Length 36	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 1	Sequence number 0xE9	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0xFFFF	Source Address 0x0001	MAC payload 08 00 FF FF 01 00 0A 01 08 00 06 00 00 00 00 02 01 FF FF 10 0F 01 01 00 00	LQI 84	FCS OK
Time (us) +8139 =62032951	Length 36	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 1	Sequence number 0xEA	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0xFFFF	Source Address 0x0000	MAC payload 08 00 FF FF 01 00 09 01 08 00 06 00 00 00 00 02 01 FF FF 10 0F 01 01 00 00	LQI 104	FCS OK
Time (us) +8800 =62041751	Length 33	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 1	Sequence number 0xEB	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0x0001	Source Address 0x0000	MAC payload 48 00 01 00 00 0A 01 40 00 06 80 00 00 00 02 01 00 00 00 01 02	LQI 104	FCS OK
Time (us) +1441 =62043192	Length 5	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN ACK 0 0 0 0	Sequence number 0xEB	LQI 84	FCS OK				
Time (us) +48779 =62051971	Length 27	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 1	Sequence number 0xEA	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0x0000	Source Address 0x0001	MAC payload 48 00 00 00 01 00 0A 02 02 00 06 80 00 00 00 02	LQI 84	FCS OK
Time (us) +1249 =62053220	Length 5	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN ACK 0 0 0 0	Sequence number 0xEA	LQI 96	FCS OK				
Time (us) +9974 =62063194	Length 32	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN DATA 0 0 0 1	Sequence number 0xEB	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0x0000	Source Address 0x0001	MAC payload 48 00 00 00 01 00 0A 03 00 00 01 00 00 00 00 03 02 00 00 00 00	LQI 84	FCS OK

Figura 5.18.: Pacotes de dados no início da transmissão das leituras realizadas pelo Router.

Time (us) +721861 =314825190	Length 10	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 0 0	Sequence number 0x2B	Dest. PAN 0xFFFF	Beacon request	LQI 96	FCS OK			
Time (us) +2288 =314827478	Length 24	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN BCN 0 0 0 0	Sequence number 0xE2	Source PAN 0x1123	Source Address 0x0001	Supergame specification B0 30 F.CAP BLE Coord Assoc 15 15 15 0 0 1	GTS fields len Permit 0 0	Beacon payload 00 21 8C 23 51 0B 00 00 4B 12 00	LQI 96	FCS OK
Time (us) +510907 =315338385	Length 21	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 1 0	Sequence number 0x2C	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0x0000	Source PAN 0xFFFF	Source Address 0x00124B00000B5124	Association request Alt.coord FFD Power Idle RX Sec Alloc addr 0 0 0 0 0 0 1	LQI 112	FCS OK
Time (us) +1057 =315339442	Length 5	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN ACK 0 0 0 0	Sequence number 0x2C	LQI 60	FCS OK					
Time (us) +493899 =315833341	Length 18	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 1 1	Sequence number 0x2D	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0x0000	Source Address 0x00124B00000B5124	Data request	LQI 100	FCS OK	
Time (us) +961 =315834302	Length 5	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN ACK 0 1 0 0	Sequence number 0x2D	LQI 52	FCS OK					
Time (us) +1954 =315836256	Length 27	Frame control field Type Sec Pnd Ack req Intra PAN CMD 0 0 1 1	Sequence number 0x14	Dest. PAN 0x1123	Dest. Address 0x00124B00000B5124	Source Address 0x00124B00000B5123	Association response Short addr Assoc. status 0x796F Successful	LQI 52	FCS OK	

Figura 5.19.: Pacotes de dados da tentativa de associação à rede de um End Device.

haver essa possibilidade), a partir deste ponto o sistema entra numa rotina contínua, onde um dispositivo de cada vez, vai transmitir pela ligação definida, as suas leituras, ao coordenador.

5.3.5. Comunicação por cabo do Kit

Como já foi referido anteriormente as *target boards* ligam dois dispositivos distintos, o microcontrolador MSP430F2274 e o dispositivo de rede CC2480, no caso do coordenador existe ainda a ligação à unidade central de dados. Entre estes dispositivos diferentes têm de haver comunicações internas, de modo a que funcionem em conjunto. As comunicações são realizadas por um sistema chamado USCI (*Universal Serial Communication Interface*) que suporta vários modos de comunicação série de um módulo de *hardware* (microcontrolador) com periféricos (como dispositivo de rede e o receptor de dados) (Texas Instruments, 2008c).

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

Mais pormenorizadamente o dispositivo de comunicação em rede está ligado ao microcontrolador, ou seja a aplicação corre no MSP430F2274 e interage com o CC2480 por SPI. Este é um dos vários modos de comunicação série disponíveis no USCI (Texas Instruments, 2008f).

Quanto ao microcontrolador do Coordenador que gere a aplicação, tem a particularidade de conter mais um tipo de comunicação, além da comunicação por SPI com o CC2480. Comunica com o exterior através de uma porta USB de onde ainda retira alimentação tanto para o microcontrolador como para o dispositivo de rede. O modo de comunicação do Coordenador com o exterior através da porta USB, é um método de comunicação série chamado UART (*Universal Asynchronous Receiver/transmitter*)(Texas Instruments, 2008f).

Uma representação das comunicações físicas, tal como a comunicação sem fios, é apresentada na figura 5.20.

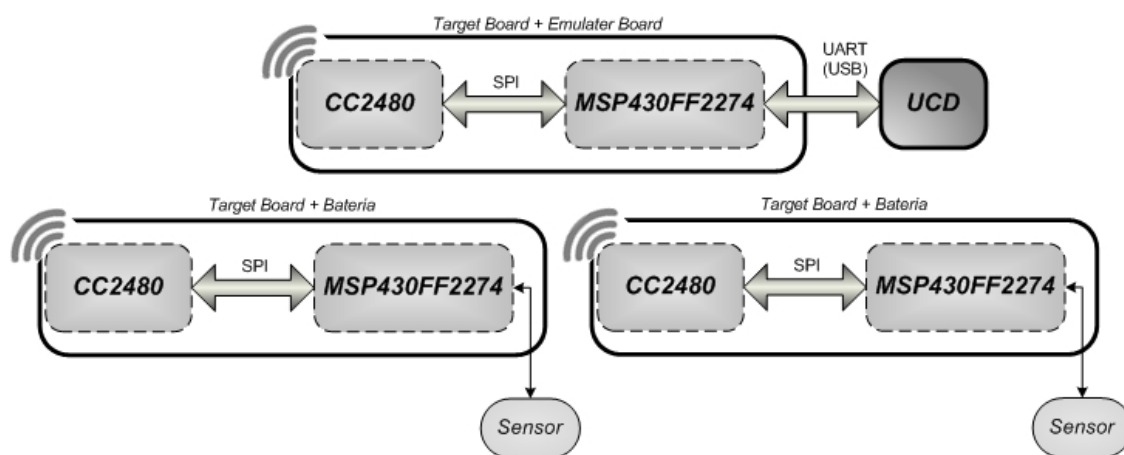


Figura 5.20.: Representação das comunicações dos dispositivos em cada placa (Texas Instruments, 2008f).

SPI (*Serial Peripheral Interface*)

O microcontrolador está ligado ao seu periférico, dispositivo de rede (CC2480), por três ou quatro pinos (UCxSIMO, UCxSOMI, UCxCLK e UCxSTE), dependendo da definição. Pode ainda conter uma mensagem de sete ou oito *bits*, e existe a possibilidade de escolher o sentido da palavra, escolhendo o bit menos significativo (*least significant bit* - LSB) ou o bit mais significativo (*most significant bit* - MSB) para primeiro bit. Inclui registos e *buffers* independentes de recepção e transmissão de dados, bem como outros recursos (Texas Instruments, 2008c).

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

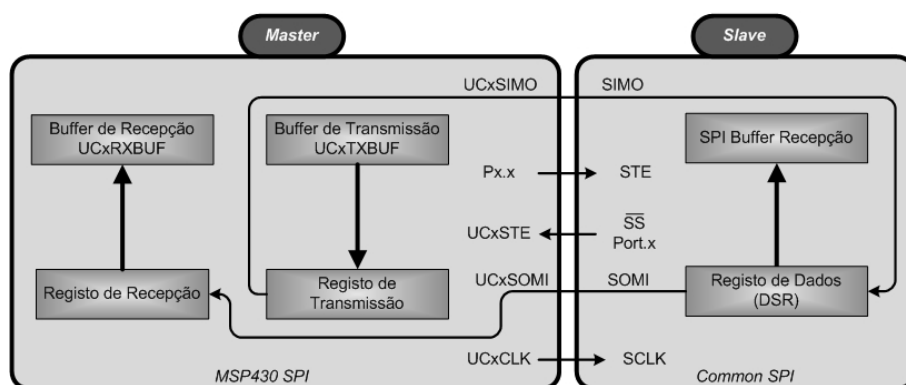


Figura 5.21.: Representação do método de comunicação por SPI em modo *Master*. (Texas Instruments, 2008c)

Como mostra a figura 5.21, seja em modo de três ou quatro pinos, a transferência de dados começa quando estes chegam ao *buffer* de transmissão de dados (UCxTXBUF), e este move a informação para o registo de transmissão, aí é iniciada a transferência através do pino UCxSIMO. A informação é então recebida no registo de recepção e transferida para o *buffer* de recepção, este através do UCxSOMI transmite ao *Master* que a transferência de informação ocorreu, chegando a mensagem ao registo de recepção de dados (UCxRXBUF), (Texas Instruments, 2008c).

Nesta aplicação vão existir apenas três tipos de transferência de dados, como indica Texas Instruments (2008b):

- *AREQ Command*, que consiste no *Master* (microcontrolador) enviar uma mensagem de dados ao *Slave* (CC2480);
- *POLL Command*, consiste no *Master* informar o *Slave* que está livre para receber dados, e o *Slave* se os tiver envia-os;
- *SREQ Command*, consiste no *Master* enviar um comando ao *Slave*, este executa-o e envia informações ao *Master*.

UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*)

O microcontrolador do coordenador troca informações com o exterior através de uma porta USB, e a informação é transferida através de UART. Este módulo liga o MSP430 a um sistema externo através de dois pinos, UCAxRXD e UCAxTXD. Funciona com mensagens de

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

oito bits, com possibilidade de verificação de paridade (que neste caso não é utilizada), inclui ainda *buffers* de registo independentes para transmissão e recepção de informação, possibilita LSB ou MSB para o primeiro bit, inclui *flags* de estado para verificar se ocorreram erros, e outros recursos. No modo UART, a transmissão e recepção da informação é realizada de forma assíncrona ao dispositivo externo a que está conectado. No entanto, a função de transmissão e de recepção utilizam a mesma frequência de comunicação (Texas Instruments, 2008c). O esquema simplificado de funcionamento do modo UART está representado na figura 5.22.

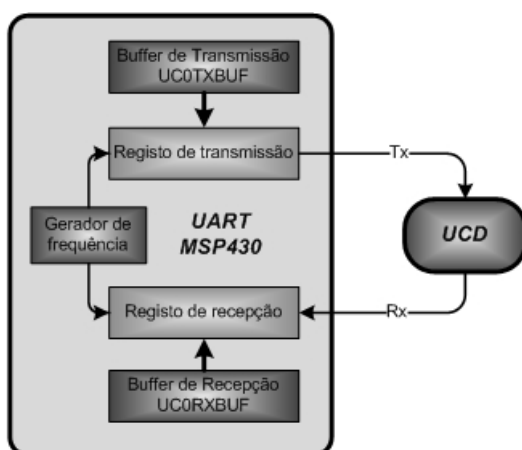


Figura 5.22.: Representação do modo de funcionamento do UART (Texas Instruments, 2008c).

A informação transmitida é constituída por oito bits (2 bytes) e inclui ainda um bit inicial (*start bit*), seguido da palavra de oito bits, que antecede alguns bits de controlo, como o bit de endereço, o de paridade e dois bits finais (*stop bits*), conforme representado na figura 5.23.

5.4. Código do Exemplo de Aplicação

5.4.1. Abordagem ao Código

A aplicação disponibilizada, *ZigBee Accelerator Sample Application (ZASA)*, é fornecida como um projecto exemplo, como uma referência para os potenciais utilizadores (Texas Instruments, 2008f). Como aplicação exemplo, é de fácil inicialização e funcionamento. No entanto, o intuito deste trabalho era adoptar a aplicação já existente e adicionar-lhe alguns recursos,

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

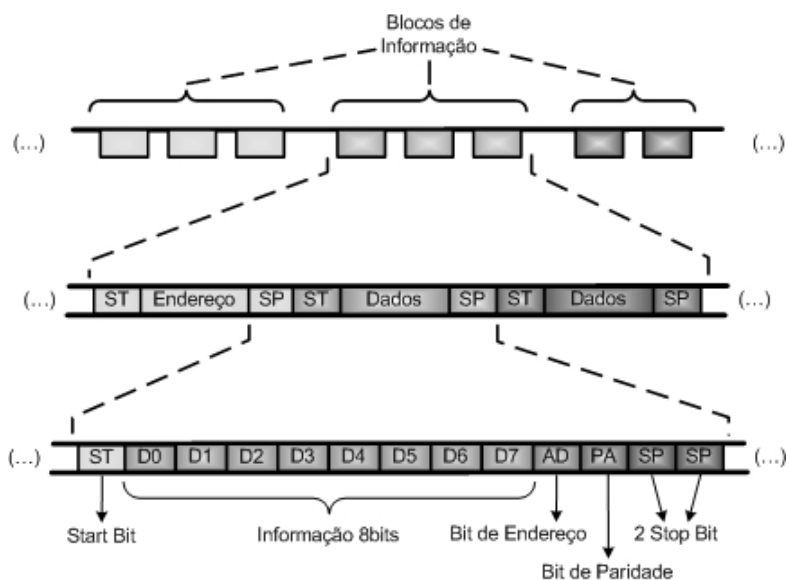


Figura 5.23.: Representação do formato das comunicações por UART (Texas Instruments, 2008c).

medição de duas grandezas eléctricas e alterar o intervalo temporal das medições. Desta forma, tem de se realizar umas breves alterações ao código já existente, alterações que ocorrem a um “nível alto”, ou seja alterações apenas ao nível da camada de aplicação. Isto não exclui no entanto a necessidade de uma análise a todo o código, para se analisar o modo correcto de alterar a aplicação e determinar de que forma corre a aplicação. Nos pontos seguintes é efectuada uma breve explicação sobre o código.

5.4.2. Análise do Código

O módulo de demonstração com a aplicação, *ZigBee Accelerator Sample Application* (ZASA), tem os ficheiros de código que configuram a aplicação, gerem e utilizam os vários componentes das placas do módulo. O ZASA tem como função mostrar a funcionalidade e facilidade de uso do CC2480. A ZASA corre no MSP430F2274 e interage com o CC2480 através de comunicações SPI, como já foi referido no ponto anterior (Texas Instruments, 2008f).

O código da aplicação está organizado em cinco blocos diferentes:

- **APP** - *Application*: este é o código específico que implementa as funcionalidades da aplicação em estudo.
- **HAL** - *Hardware Abstraction Layer*: este é o código específico do coordenador que

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

implementa os *drivers* do dispositivo necessários para as comunicações UART e SPI; o temporizador do *hardware* e os *drivers* dos temporizadores do *software*; o método de receber informação do utilizador e de entrar em modo de suspensão (“dormir” - *low power mode*).

- **MT** - *Monitor-Test*: este código realiza a comunicação com a interface no computador.
- **SAPI** - *Simple API*: este código é idêntico ao API para APP se este fosse escrito para ser compilado directamente com o código do ZigBee *Stack*.
- **ZACCEL** - esta parte do código implementa os protocolos RPC (*Remote Procedure Call*) e SPI necessários pelo CC2480, que actua como *slave* (“escravo”) no barramento de dados SPI

Nesta aplicação, os dispositivos que se configurarem como sensores de leitura, serão referidos como *Source* (“fonte”), o dispositivo definido como o colectador comum da informação será referido como o *Sink* (“sorvedouro”). Estes papéis são definidos pelo código APP, enquanto os de FFD e RFD são definidos pelo CC2480 de modo a cumprir os comportamentos necessários (*routing* e *low-power*) (Texas Instruments, 2008f).

O utilizador configura os dispositivos através de um botão de pressão, em que o estado de funcionamento do dispositivo é comunicado ao utilizador pelos dois LED’s (vermelho e verde) presentes nos mesmos (Texas Instruments, 2008f).

O código transita por uma série de estados dependendo da informação introduzida pelo utilizador (pelo botão de pressão) e pelo estado do dispositivo de rede CC2480. O estado do código é conhecido através de uma variável de estado (`static AppState appState;`). E os estados de funcionamento, segundo Texas Instruments (2008f), podem ser:

- `appIniting,`
- `appWaiting,`
- `appJoining,`
- `appJoinWaiting,`
- `appBinding,`
- `appBindWaiting,`
- `appRunning.`

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

De uma forma sucinta pode-se dizer que o código começa com a inicialização indispensável de algumas funções. Depois da inicialização, o programa entra num *loop* indefinidamente (ciclo infinito) onde executará os eventos definidos pelo *hardware* (*HAL events*) e os eventos de *feedback* do dispositivo de rede, CC2480. Executa ainda (pela função `appExecHost()`) as acções mais visíveis da aplicação (Texas Instruments, 2008f). Estas são as funções do tipo realizar as medições, a retransmissão de mensagens, entre outras. Um esquema exemplificativo do funcionamento do código é apresentado na figura 5.24.

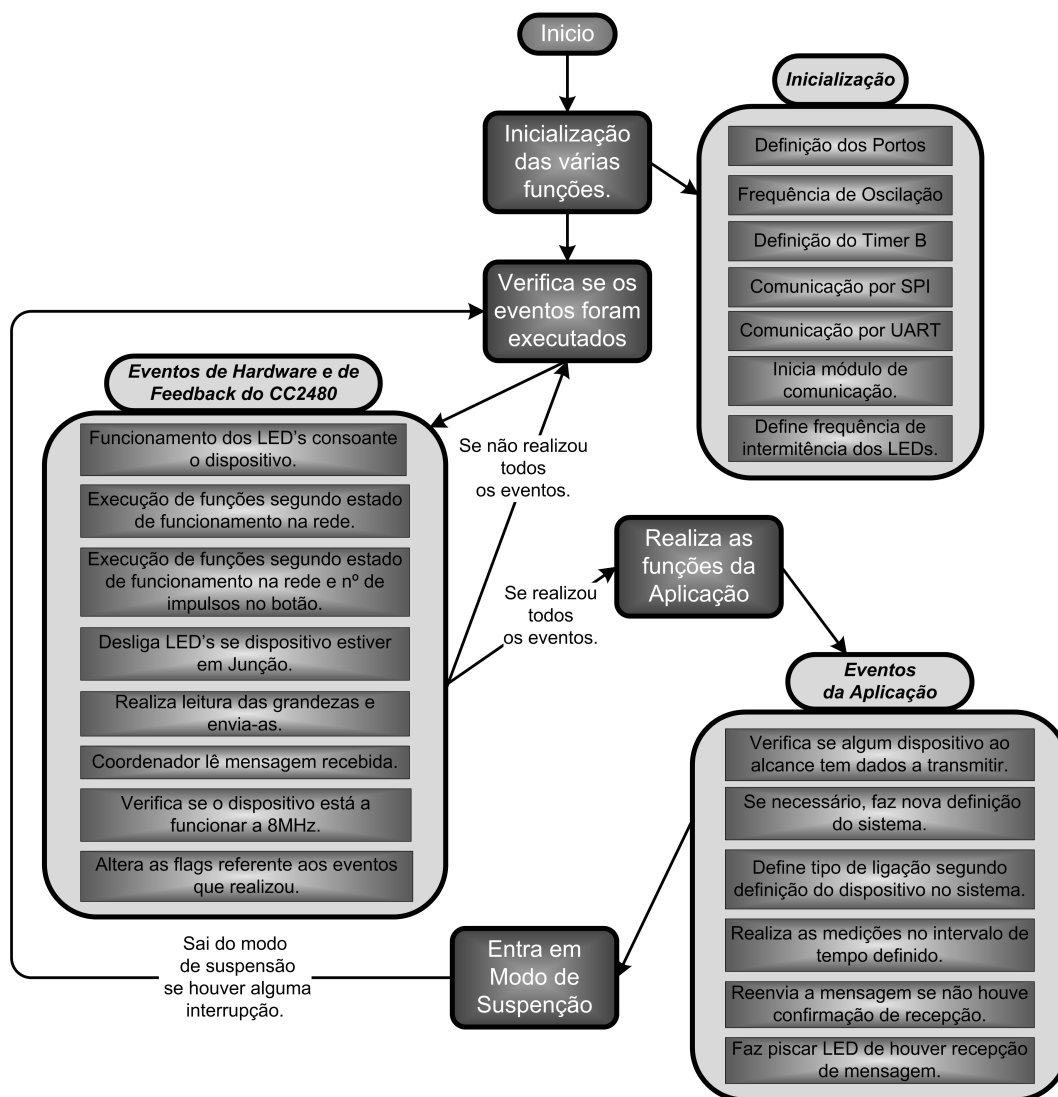


Figura 5.24.: Fluxograma simplificado das funções realizadas pela aplicação ZASA.

5.4.3. Alteração do Código

Como já exposto, são efectuadas alterações ao código para criar uma nova aplicação. As alterações ao código são pontuais por vários motivos: o código está já definido com esse objectivo, de simples alteração, para o caso de não se pretender alterar o método de comunicação e gestão de rede e apenas alterar a aplicação; ainda e visto que se vão utilizar as medições que a aplicação já efectua e apenas se pretende efectuar medições de outra grandeza, tem apenas de se replicar de forma similar o método já aplicado: quanto à alteração do intervalo temporal das medições, também já está definido de forma que seja simples ser alterado.

Alteração da Periodicidade das Leituras

As leituras são efectuadas na aplicação original de 10 em 10 segundos. No entanto, para demonstrar a facilidade na sua alteração, este valor foi alterado para 30 segundos. No ficheiro `sample_app.c` foi definida a variável indicada desta forma:

- `#define APP_REPORT_INTERVAL 30`

Alteração do Número de Leituras

No código original da aplicação (ZASA) são realizadas duas leituras, a leitura da temperatura da placa *Target Board* e a leitura da tensão das baterias da placa *Battery Board*. Desta forma, no ficheiro `sample_app.c` é definido um `array srceReport[SRCE_REPORT_SZ]`, onde `SRCE_REPORT_SZ` é definido com o tamanho do `array`. Na versão original, o tamanho do `array` é igual a dois (duas medições). Este valor é alterado para dez, para realizar quatro medições, as duas originais mais quatro representativas das leituras de tensão no sensor de humidade do solo (estas ocupam duas posições cada).

- `SRCE_REPORT_SZ = 10` (2 originais + 2 amostragens V_i (2 Bytes) + 2 amostragens V_o (2 Bytes));
- `srceReport[1]=Temperatura da placa`
- `srceReport[2]=Tensão da bateria`
- `srceReport[3]=Tensão de entrada do sensor (2º byte)`
- `srceReport[4]=Tensão de entrada do sensor (1º byte)`
- (...)
- `srceReport[7]=Tensão de saída do sensor (2º byte)`

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

- `srceReport[8]`=Tensão de saída do sensor (1º byte)

(...)

Definição do ADC10

Face a estas considerações, o conversor analógico-digital de 10 *bits* (≈ 2 bytes), ADC10, tem que ser configurado para realizar estas duas novas leituras. A elaboração do código de definição do ADC10 é feita com base no código já existente na aplicação, excepto registos pontuais. Assim são definidas duas novas funções no ficheiro `hal_board.h`.

Definem-se os registos (`hal_board.c`) do ADC10 para a conversão da medição analógica da tensão de entrada do sensor, da seguinte forma:

```
void halReadSensorVi(void)
{
ADC10AE1 = 0x10;
ADC10CTL1 = INCH_4 + ADC10DIV_0 + CONSEQ_2;
ADC10CTL0 = SREF_1 + ADC10SHT_3 + REF2_5V + REFON + ADC10ON + MSC;
halDelay(ADC_WAIT_MSECS, TRUE);
ADC10CTL0 |= ENC | ADC10SC;
do
{
halDelay(3, TRUE);
data[apontador]=ADC10MEM;
apontador++;
} while (apontador < 1);
halEventFlags |= HAL_EVT_ADC;
apontador=0;
}
```

De forma similar definem-se os registos do ADC10 para a conversão da leitura da tensão de saída do sensor, da seguinte forma:

```
void halReadSensorVo(void)
{
ADC10AE1 = 0x20;
ADC10CTL1 = INCH_13 + ADC10DIV_0 + CONSEQ_2;
ADC10CTL0 = SREF_1 + ADC10SHT_3 + REF2_5V + REFON + ADC10ON + MSC;
halDelay(ADC_WAIT_MSECS, TRUE);
```

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

```
ADC10CTL0 |= ENC | ADC10SC;
do
{
halDelay(3, TRUE);
data[apontador]=ADC10MEM;
apontador++;
} while (apontador < 1);
halEventFlags |= HAL_EVT_ADC;
apontador=0;
}
```

De forma mais pormenorizadas, define-se:

- ADC10AE1 = 0x10 ou 0x20; - este registo habilita a entrada correspondente para a leitura do ADC, neste caso a entrada A4 e A13 respectivamente;
- INCH_4 ou INCH_13 - entrada A4 ou A13 do ADC, porto P2.4 ou P4.4 respectivamente; pois estes portos estão disponíveis a ligações a dispositivos exteriores e não estavam a ser utilizados em qualquer outra função;
- ADC10DIV_0 - vai definir a frequência de funcionamento do ADC; $ADC10OSC \approx 5\text{MHz}$;
- CONSEQ_2 - vai definir o modo de conversão utilizado pelo ADC, neste caso amostragens contínuas num único canal (*Repeat-single-channel*);
- SREF_1 - definição das tensões de referência ($V_{R+} = V_{REF+}$ e $V_{R-} = V_{SS}$);
- ADC10SHT_3 - este registo define o tempo de amostragem. Neste caso foi escolhido o maior tempo possível ($64 \times ADC10CLKs$);
- REF2_5V - define a tensão de referência de conversão a 2,5V;
- REFON - habilita a utilização de referência interna;
- ADC10ON - activa o ADC10;
- MSC - define que um único *trigger* inicia as amostragens automaticamente (*Multiple Sample and Conversion*);
- halDelay(ADC_WAIT_MSECS, TRUE) - instrução para estabilizar a referência, impondo um compasso de espera de 20ms;
- ENC - inicia o ADC10 (*Enable ADC*);

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

- ADC10SC- inicia a conversão analógico-digital (*Start Conversion*).

De seguida inclui-se um ciclo para que cada conversão seja guardada na memória (`data[]`), com as seguintes instruções:

- `do { (...) } while (apontador < 1);` - ciclo que fará o ADC realizar duas amostragens da grandeza que está a medir;
- `halDelay(3, TRUE);` - força um tempo de espera de *3ms* para que o ADC faça a conversão, e não realize outra função enquanto está ocupado;
- `data[apontador]=ADC10MEM;` - guarda o valor adquirido numa determinada posição de memória (2bytes);
- `apontador++;` - incrementa o valor do apontador do *array* de dados.
- `halEventFlags |= HAL_EVT_ADC;` - altera a flag em indicação que houve conversão;
- `apontador=0;` - reinicia o apontador para uma nova leitura do ADC.

Realização das Leituras

Para a leitura dos dados há que ter em conta a leitura de dois bytes de cada amostragem, por isso é necessário utilizar dois pacotes para cada amostragem. As amostragens vão ser enviadas no seu valor inicial e os cálculos aritméticos vão ser realizados na UCD (Unidade Central de Dados) de forma a poupar energia, serão realizados e não pela CPU do microcontrolador. Assim, no ficheiro `sample_app.c` são definidos o seguinte ciclo:

```
halReadSensorVi()
char *ptr;
ptr = (char *)data;
pointer = 2;
do
{
srceReport[pointer] = *ptr;
ptr++;
pointer++;
} while (pointer<10);
```

Esta parcela de código apresentada, foi elaborada para se poder visualizar os dois bytes da cada amostragem. Desta forma é criado um apontador (`ptr`) que indica a posição de

5. Módulo de Comunicação Sem Fios

memória onde estão guardados os valores medidos pelo ADC. Depois, o conteúdo de cada posição de memória é gravado no *array* de comunicação. Chega assim ao coordenador uma mensagem em que dois bytes compõem uma medição.

Com estes dados, é necessário realizar um pequeno cálculo (na UCD) para obter o valor da tensão medido, este é apresentado na equação 5.1:

$$V(ADC) = \frac{x \times 2,5}{1023} \quad (5.1)$$

Onde x é o valor da conversão do ADC, 2,5 é a tensão de referência e 1024 é a resolução do ADC, onde se obterá a tensão medida $V(ADC)$ [V]. Importante ainda que para a leitura do canal A13 é necessário multiplicar o valor da conversão por dois ($x \times 2$).

Definição dos Portos

Para a entrada e saída de sinais no microcontrolador, os portos têm que ser configurados, dois de entrada para a leitura do sensor (P2.4 e P4.4) e um de saída digital (P2.2; 3V) para a alimentação do circuito de condicionamento de sinal do sensor. Para definir os portos tem de se ter em conta que os registos: PxSEL selecciona se a ligação é a um periférico interno do microcontrolador (1), ou a um pino de entrada/saída no qual está conectado um dispositivo externo (0); PxOUT que define se o porto tem saída a nível alto (1 - *output high*), ou a nível baixo (0 - *output low*); PxDIR que configura os portos como entradas (0), ou saídas (1). Assim, os portos são configurados da seguinte forma:

- P2SEL=0x01;
- P2OUT=0xDD;
- P2DIR=0xBE=1011 1110b → (P2.4) → 1010 1110b=P2DIR=0xAE;
- P4SEL=0x00;
- P4OUT=0xFF;
- P4DIR=0xFF=1111 1111b → (P4.4) → 1110 1111=P4DIR=0xEF;

Apenas é necessário alterar o PxDIR, visto que nos outros registos já se encontrava a configuração desejada.

Tendo em conta estas alterações dos portos é necessário agora encontrar os locais de ligação na *Target Board*. Assim, com base em Texas Instruments (2008e) e Texas Instruments (2008d), observa-se que os portos seleccionados se encontram na zona de ligações P3, como representado na figura 5.25.

6. Módulo de Análise dos Dados

Este é o módulo para onde vai fluir toda a informação, e por isso mesmo será denominado de Unidade Central de Dados (UCD). Depois dos dados serem recebidos, são analisados e a informação de actuação e manutenção sai deste módulo, como se pode ver na figura 6.1. A informação que segue para o bloco de actuação contém os dados da humidade do solo dos variados locais, realizando-se assim a correspondente irrigação. Quanto à componente de manutenção, é constituída principalmente pela informação do valor da bateria em cada dispositivo e é visível ao utilizador como um aviso para trocar a mesma em caso de necessidade.

A estrutura está representada na figura 6.1.

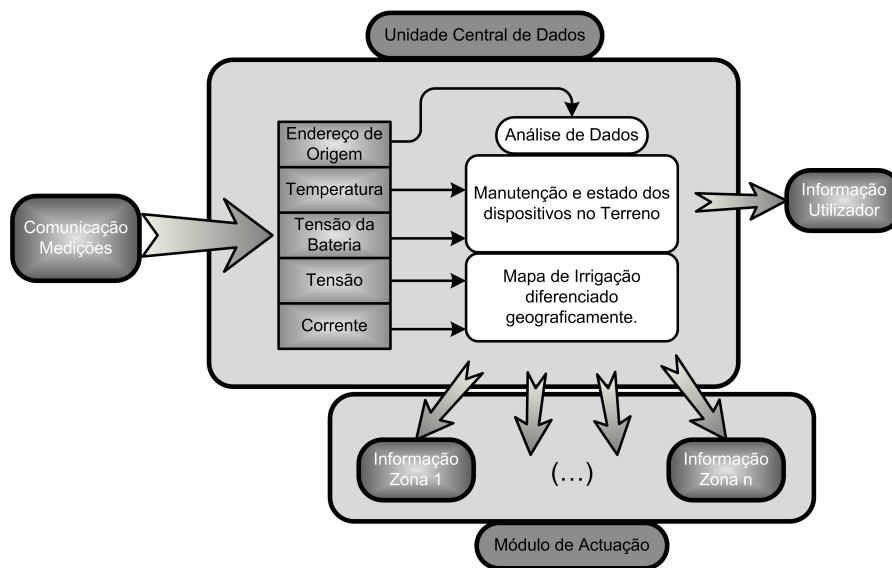


Figura 6.1.: Representação da Unidade Central de Dados.

6.1. Composição e Funcionamento

Este módulo é composto por um processador (com necessidade de uma entrada USB para ligar o Coordenador), que poderá ser um computador pessoal ou algum dispositivo similar que esteja em funcionamento contínuo. Este está atento a qualquer recepção de informação proveniente da rede pelo Coordenador. Este processador tem de gerar avisos para o utilizador, que podem ser feitos de várias formas: se o processador for um computador, os avisos aparecerão no seu monitor; se o processador for, por exemplo, um microcontrolador os avisos aparecerão num *display*. A UCD tem ainda um bloco de *interface* com o sistema de actuação, que pode ser constituído por um conjunto de relés. Cada um deles vai ligar cada zona de irrigação, e são accionados segundo a análise das leituras do solo e consequente matriz de actuação, ou seja, o número de relés tem que ser igual ao número de diferentes zonas de irrigação. Este é apenas um exemplo de uma *interface* com o sistema de actuação, pois este pode ser diferente consoante o tipo de sistema de actuação a implementar. O diagrama de blocos da figura 6.2 exemplifica estas funcionalidades.

Apesar de tudo, existe um problema de difícil resolução sem acrescentar mais módulos ao sistema, que é o mapeamento dos dispositivos. Ou seja, como é que o sistema saberá que um determinado dispositivo com um certo endereço está num determinado sítio específico? Neste momento, a solução passa por definir manualmente os endereços dos elementos durante a montagem do sistema e a colocação dos elementos de leitura no campo ligando-os à rede.

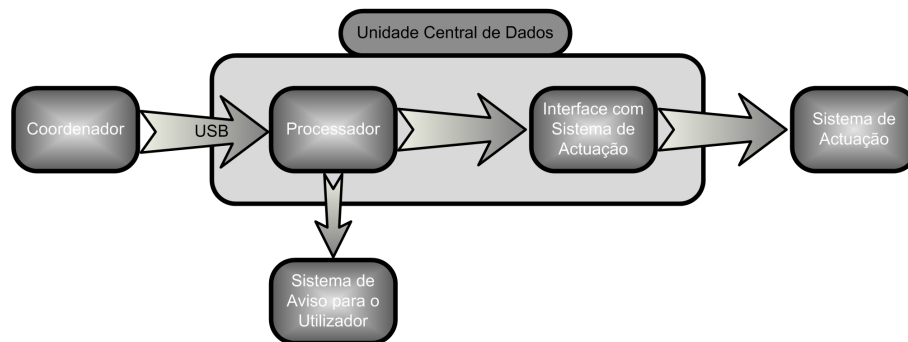


Figura 6.2.: Representação dos componentes da UCD.

6.2. Análise de Dados

A correcta análise dos dados vai permitir um bom funcionamento de todo o sistema, por isso mesmo este módulo é especialmente importante.

As mensagens são recebidas de toda a rede pelo coordenador e transmitidas ao processador via USB. Pode-se observar o conteúdo das mensagens com a ajuda da *interface* com o utilizador da aplicação ZASA, *Sensor Monitor* (já analisado no ponto 5.3.3). Estas mensagens codificadas em numeração hexadecimal, têm vários campos diferentes, entre os quais: endereço do dispositivo de origem; tamanho do pacote de dados; e as quatro medições realizadas. Um exemplo destas mensagens é apresentado na figura 6.3, esta imagem é uma representação exemplo das mensagens recebidas, visto que uma medição da tensão tem vários resultados cada com dois pacotes de dados, ou seja numa mensagem real teria-se dez pacotes de dados como explicado no ponto 5.4.3.

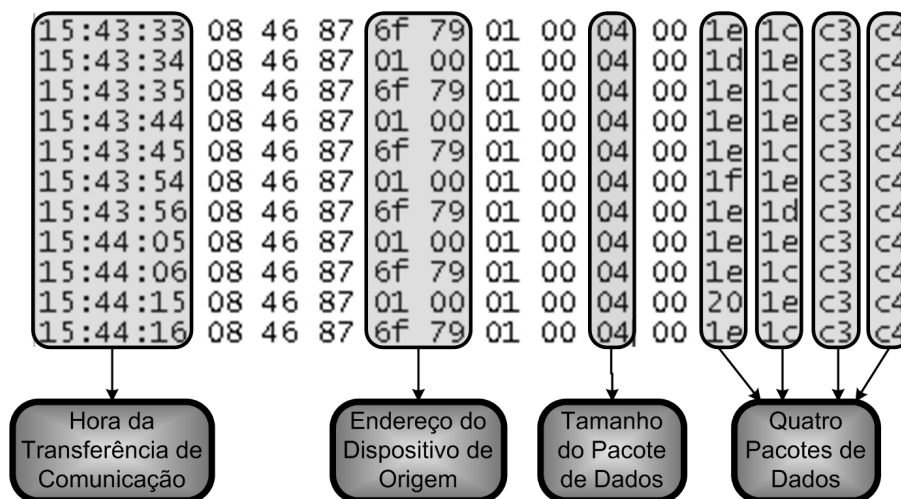


Figura 6.3.: Mensagens de dados recebidas pelo Coordenador.

Estas informações depois de convertidas em numeração decimal serão distribuídas por duas matrizes, uma de manutenção e outra de actuação, em que cada membro da matriz corresponderá a um dispositivo no terreno, como se pode observar na figura 6.4.

A análise dos dados é realizada de forma diferenciada para cada matriz. No caso da matriz de actuação, há um limite máximo para a temperatura ($60^{\circ}C$ como segurança e tendo em conta a informação no ponto 5.3.2) e um limite mínimo para a tensão da bateria ($3V$ - referido

6. Módulo de Análise dos Dados

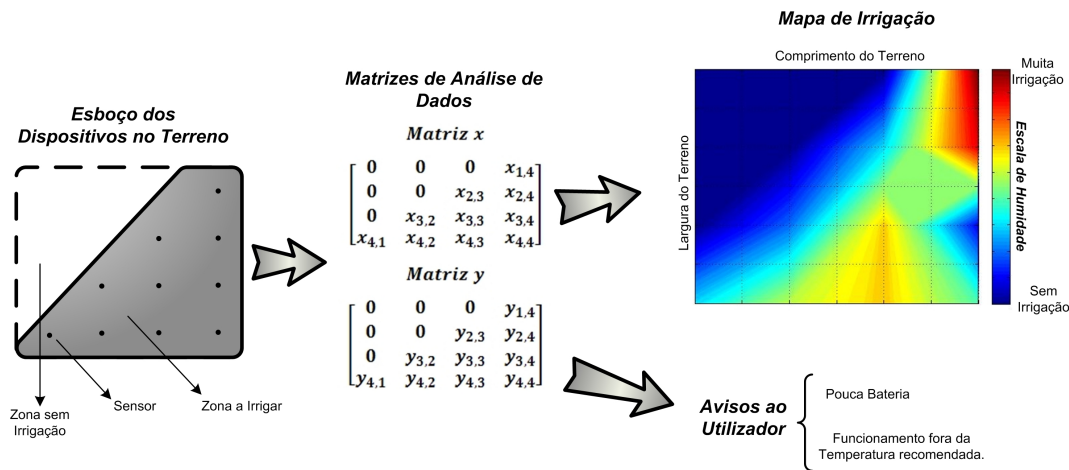


Figura 6.4.: Representação da análise de dados.

no código do sistema de comunicação como valor base para funcionar à frequência desejada referido no ficheiro `hal_board.c`). No caso das medições ultrapassarem estes limites, um aviso surge no respectivo campo da matriz.

No caso da matriz de actuação, os valores medidos da tensão de entrada e de saída do sensor e também os valores de temperatura a quando da medição (segundo a equação 4.9 referida no ponto 4.3), corresponderão a um valor de humidade no solo na zona de medição mediante o cálculo da equação, deduzida no ponto 4.3.1. Outra possibilidade consiste na elaboração de uma tabela, em que se fará corresponder os valores de tensão medidos no sensor a um valor de humidade. Desta forma não era necessário qualquer cálculo, exceptuando uma simples interpolação no caso de se obter uma medição entre dois valores tabelados. Ao não efectuar cálculos aritméticos, como raiz quadrada e o quadrado de um dado valor no microcontrolador, não se sobrecarrega o seu processamento, tornando-o assim mais rápido e consequentemente com menor consumo de energia.

Assim, é elaborado um mapa de humidade com diferentes valores para diferentes necessidades de água. A estes valores corresponde o funcionamento do sistema de actuação durante um certo tempo, realizando mais ou menos tempo irrigação segundo o local do mapa que o necessitar. De forma mais específica foi elaborado e organizado uma ordem de processos a realizar neste módulo de forma a que a recepção, análise e consequente actuação seja realizada de maneira cíclica e regular, como se pode observar no fluxograma da figura 6.5. É necessário ter em conta que o módulo de actuação é activado apenas em certos intervalos de tempo definidos pelo utilizador. Este tempo varia consoante a cultura (e a sua necessidade de água), o terreno, e a estação do ano, no entanto deverá ser um valor (t) em horas.

6. Módulo de Análise dos Dados

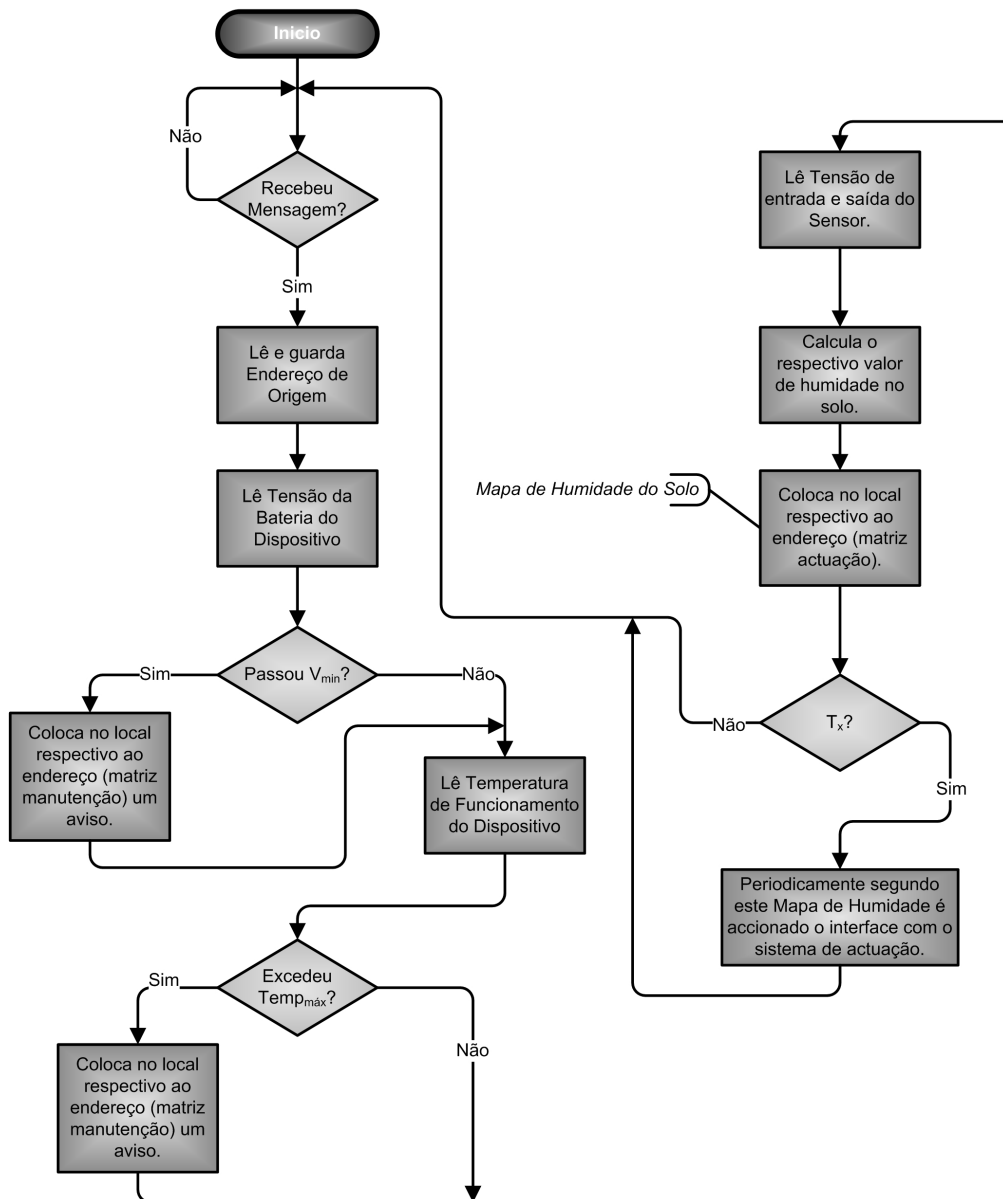


Figura 6.5.: Fluxograma de funcionamento da UCD .

7. Módulo de Actuação/Irrigação

Este módulo é aquele por onde a água circula e efectua a irrigação no local necessário. Este sistema retira a água do seu reservatório por meio de bombas de água, ou da rede de distribuição de água por válvulas, que é depois distribuída através de tubagens, etc., até aos locais onde se deseja irrigar.

O bloco de actuação consiste apenas em receber a informação da interface de actuação no módulo UCD e desse modo vai controlar qualquer sistema de irrigação já implementado ou a implementar. Sistemas esses já existentes, conhecidos e referidos no ponto 3.7.1. Desta forma, neste capítulo não se vai definir um novo sistema, mas descrever brevemente o funcionamento deste módulo, os factores a considerar na sua elaboração e apresentar alguns dos componentes que poderá conter.

Este é um módulo exterior ao sistema de monitorização da humidade do solo, ou seja, num qualquer local onde se deseje aplicar este sistema de monitorização pode já haver um sistema de irrigação e evoluí-lo ou implementar um de raiz. Em ambos os casos, o sistema de actuação depende do local a irrigar e da cultura agrícola a tratar, e por isso mesmo se definiu este sistema de monitorização sem fios de forma simples e aplicável a qualquer situação. Por conseguinte, apenas quando se conhecer as dificuldades do terreno é que pequenos pormenores, como o tipo de *interface* com o módulo de actuação podem ser completamente definidos.

A novidade neste sistema é a implementação da divisão da área a irrigar em zonas diferentes, para consoante a análise dos dados do solo, se actuar de forma diferente em cada zona. E esta medida leva à necessidade de serem realizadas alterações caso se quiser adoptar este sistema a um sistema de actuação (irrigação) já existente. O objectivo com a divisão da zona a irrigar em pequenas zonas independentes é ganhar resolução na irrigação, não sendo necessário regar toda a área agrícola da mesma forma, levando assim a uma esperada poupança energética.

7.1. Considerações de *Design*

Numa primeira fase da definição de um sistema de irrigação é necessário levar em consideração vários factores:

- A duração do ciclo de irrigação (DTI, 2004), que no caso deste sistema pode variar,

7. Módulo de Actuação/Irrigação

visto o tempo de irrigação ser função do valor da humidade do solo. O tempo de irrigação pode ser maior ou menor numa determinada zona da área agrícola consoante a humidade do solo seja menor ou maior, respectivamente (sabendo que o caudal é sempre constante). No entanto, a duração das irrigações tende a diminuir até chegar a um ponto de equilíbrio, visto que o objectivo do sistema é manter o solo com uma humidade mínima que não crie *stress* às plantas que nele crescem.

- O intervalo entre os ciclos de irrigação (DTI, 2004), que são definidos pelo utilizador em função do relevo do terreno, da textura do solo e da cultura que está plantada.
- Determinação e divisão das zonas de irrigação, que devem ser definidas com cuidado: primeiro por tipo de cultura; método de irrigação; relevo do terreno; etc.. Essencialmente, a área agrícola deve ser dividida em zonas que aparentem ter a mesma necessidade de água em cada estação.
- A localização e volume da reserva de água a utilizar na irrigação (DTI, 2004), ou o preço a pagar por utilização de água da rede geral de distribuição.
- A localização específica de cada componente do sistema de actuação (bomba, válvulas, tubagem, etc.) (DTI, 2004).

Todos estes factores pressupõem informação que é necessário adquirir sobre o clima, o solo, as plantas a irrigar e o local, com especial ênfase à topografia (DTI, 2004).

7.2. Componentes

O sistema de actuação/irrigação permite várias possibilidades de elaboração e a utilização de vários componentes. De seguida é apresentada uma breve descrição sobre alguns destes componentes.

Bombas Automáticas

As bombas automáticas devem ser do tipo centrífugas e controladas automaticamente de forma eléctrica. Em algumas áreas agrícolas, bombas a diesel também são muito utilizadas. As bombas têm a função de criar pressão que vai normalmente dos 276 a 1034 *kPa* e assim, proporcionar o movimento da água na ordem dos 4 a 60 *litros/s*. Estas devem estar colocadas num espaço seco, bem ventilado. O ambiente envolvente é um factor importante na selecção do motor eléctrico (DTI, 2004).

7. Módulo de Actuação/Irrigação

Filtros

Filtros de pressão utilizam geralmente como meio filtrante areia muito fina. Estes são particularmente adequados a água destinada à irrigação, que normalmente contém bastante matéria orgânica, especialmente em reservas de água como lagoas e poços (DTI, 2004).

Mais usualmente existem outro tipo de filtros, constituídos por uma rede presente na passagem da água que separa maioritariamente a matéria inorgânica. Esta rede tem uma malha de 30 a 200 microns e pode facilmente ser substituída (DTI, 2004).

Válvulas

Válvulas de baixa tensão são as mais utilizadas para controlar a irrigação, no entanto válvulas hidráulicas e pneumáticas também são por vezes utilizadas (DTI, 2004). As válvulas funcionam como um interruptor que fecha ou abre o circuito, neste caso a distribuição de água. A alteração do estado de fechado para aberto ou o inverso é efectuada normalmente por um sinal eléctrico accionado por outro dispositivo. Nos casos mais vulgares, as válvulas electrónicas estão acopladas a um temporizador, que em determinadas horas (definidas pelo utilizador) accionam a válvula, e esta abre o circuito de irrigação. Desta forma pode-se, por exemplo, ligar o sistema de irrigação à rede de distribuição de água. Existem muitos tipos diferentes de válvulas com especificidades próprias e funções particulares, tais como: válvulas de pressão, válvulas isolantes, etc..

A operação de válvulas controladas electricamente têm, como não podia deixar de ser, a necessidade de cuidados especiais tais como, a estanquicidade dos cabos eléctricos (resistente a ácidos, água, etc.) e identificação por cores. As ligações devem ser feitas numa caixa estanque e acessível, em alguns casos, de preferência à superfície (DTI, 2004).

Dispositivo Anti-retorno

Este componente foi concebido para prevenir o retorno da água em sentido contrário àquele que se espera, ou seja, por vezes em locais de alta pressão causada por elevações do terreno, vácuo e outros fenómenos, pode ocorrer que a água possa tentar circular no sentido contrário ao desejado. Assim, estes dispositivos funcionam como válvulas fechando o circuito da água mas apenas num sentido (por isso também de forma muito comum se chamam de válvulas anti-retorno).

Tubagens

As tubagens são os meios por onde a água escoia desde a reserva, passando pela bomba, filtros, válvulas até à zona de aplicação. Estas encontram-se normalmente enterradas. É necessário ter em conta o material das tubagens no caso de altas pressões nestas, e também

7. Módulo de Actuação/Irrigação

para que não se deteriorem. Os materiais mais comuns são o PVC, o Polietileno, o ferro e o alumínio devidamente protegidos. Ainda assim, é necessário algum cuidado e sua utilização deve ser sempre em concordância com as recomendações dos fabricantes (DTI, 2004).

Dispositivos de Aspersão

Os aparelhos de dispersão de água podem ser de vários tipos consoante o método de irrigação que se queira implementar. Estes são aqueles que libertam a água na atmosfera ou no solo consoante o método. Diferenciam-se de variadas formas, na maneira como libertam a água, no caudal, no tempo de funcionamento, entre outros. A forma como a água é libertada para o ambiente é um factor muito importante na escolha dos dispositivos de aspersão, pois esta pode ser em spray, em jacto de água, gota-a-gota, etc.. Os dispositivos mais comuns são os aspersores, que são utilizados de muitas formas distintas e por isso mesmo têm uma grande aplicabilidade.

7.3. Gestão e Manutenção do Sistema de Actuação/Irrigação

Por muito bem que o sistema de irrigação tenha sido definido e instalado, este tem de ser operado de forma correcta para que os resultados da sua utilização sejam satisfatórios.

Não se pode esperar dos equipamentos um funcionamento consistente se este funcionar fora dos limites para que foi concebido. Os sistemas têm uma capacidade máxima e assim é importante que na fase de concepção seja conhecido o pico de utilização que o sistema irá sofrer.

A gestão do sistema de irrigação assenta em dois grandes pontos, que este tenha uma manutenção a todos os seus componentes e que a cultura agrícola receba a correcta quantidade de água na irrigação.

Quanto à quantidade de água a fornecer às plantas, o sistema de monitorização do solo faz a gestão e actuação ao longo do ano, e dessa forma tem a capacidade de passar as várias estações do ano com as diferentes necessidades de água, ou seja, está preparado para essa gestão de forma muito eficiente.

Quanto à manutenção do sistema de actuação, é aconselhável ter algumas peças sobressalentes de alguns componentes bem como basear essa manutenção na informação e recomendações dos fabricantes dos componentes. Inspeções regulares devem ser realizadas a todos os dispositivos de aspersão de água, para verificar o seu funcionamento (DTI, 2004).

8. Análise de Resultados

Neste capítulo vão ser descritos e analisados os resultados dos testes experimentais, e também o previsto custo do sistema. Isto com a finalidade de apresentar esclarecimento do procedimento experimental e nas escolhas tomadas na elaboração do trabalho, que visa a elaboração de um sistema de monitorização da humidade do solo.

São apresentadas as fases experimentais dos testes aos sensores. Primeiro, o teste à alimentação e leitura do valor da resistência do sensor, e de seguida o teste de comparação de medições e calibração do intervalo de medição dos mesmos sensores. Para isso são descritos os materiais utilizados, o método, os resultados e a análise a estes.

É também apresentada uma breve descrição do teste de funcionamento do sistema de comunicações sem fios face às alterações de código realizadas e descritas na subsecção 5.4.3. Numa primeira etapa, é descrita a alteração do número de pacotes de dados e intervalo de tempo das medições e de seguida a conversão analógica-digital das medições do sensor.

É ainda apresentado o estudo económico como resultado, pois foi definido como um objectivo a alcançar, isto é, como solução ao problema dos custos, definido na motivação a este trabalho.

8.1. Teste Experimental aos Sensores

Os sensores adquiridos foram as sondas Watermark da Irrrometer e a GB-1 da Delmhorst. Estes possuem um funcionamento muito semelhante, pois têm o mesmo princípio de funcionamento, baseado na variação da resistência, com a humidade. As diferenças encontram-se principalmente ao nível da protecção do exterior, em que o Watermark tem uma protecção adicional composta por uma membrana sintética e ainda uma outra camada em aço inoxidável com perfurações para que o meio poroso esteja em contacto com o solo. Logo neste ponto observa-se, pelo simples manuseamento dos sensores que o Watermark é muito mais resistente que o GB-1, o que o levará certamente a ter uma maior vida útil, sofrendo menos com deterioração expectável no solo.

Numa fase inicial e para observar o funcionamento dos sensores foi estudado qual a melhor possibilidade de os alimentar, de forma a obter uma saída que seja mensurável. Inicialmente

8. Análise de Resultados

foi pensada uma alimentação em corrente contínua, visto os sensores serem resistivos. Esta solução rapidamente foi descartada com base em IHRWM (2002) e WMO (2008), pois os eléctrodos seriam polarizados, o que resultaria na danificação dos sensores.

Numa fase seguinte, e com base na mesma literatura, elaborou-se um circuito oscilador que cria uma onda quadrada de 0V a 3V, pois o circuito é alimentado por uma saída do microcontrolador. Este funciona com uma frequência próxima dos 120Hz, escolhida com base em Irrometer Company (n.d.), manual específico do sensor fornecido pelo seu fabricante. Dessa forma foi elaborado o circuito da figura 8.1.

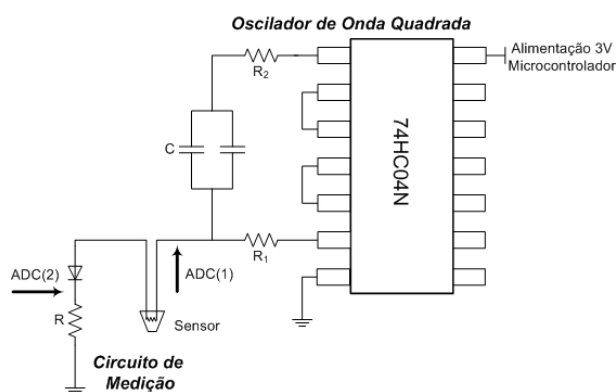


Figura 8.1.: Circuito de condicionamento do sinal do sensor.

Para atestar o funcionamento dos sensores foi necessário colocá-los num vaso a uma profundidade baixa em concordância com a profundidade das raízes da planta. Com um osciloscópio era observada a forma de onda e medidos os valores da tensão de entrada e tensão de saída do sensor de forma a poder ter um valor próximo da resistência instantânea do sensor, calculada segundo as equações 4.6 e 4.7. Realizando medições de trinta em trinta minutos, com o sensor GB-1 (funcionamento semelhante ao Watermark) obtiveram-se os seguintes resultados representados no gráfico da figura 8.2. A tabela com os dados do gráfico é apresentada no Anexo C.

Deste gráfico pode-se observar que o sensor com este método de medições, sendo constantemente alimentado, mede de forma correcta a perda sucessiva de humidade ao longo do tempo, ou seja, o aumento de resistência, até ao último dia onde se efectua uma rega ao vaso e rapidamente, em questão de minutos, a resistência diminui indicando o aumento de humidade.

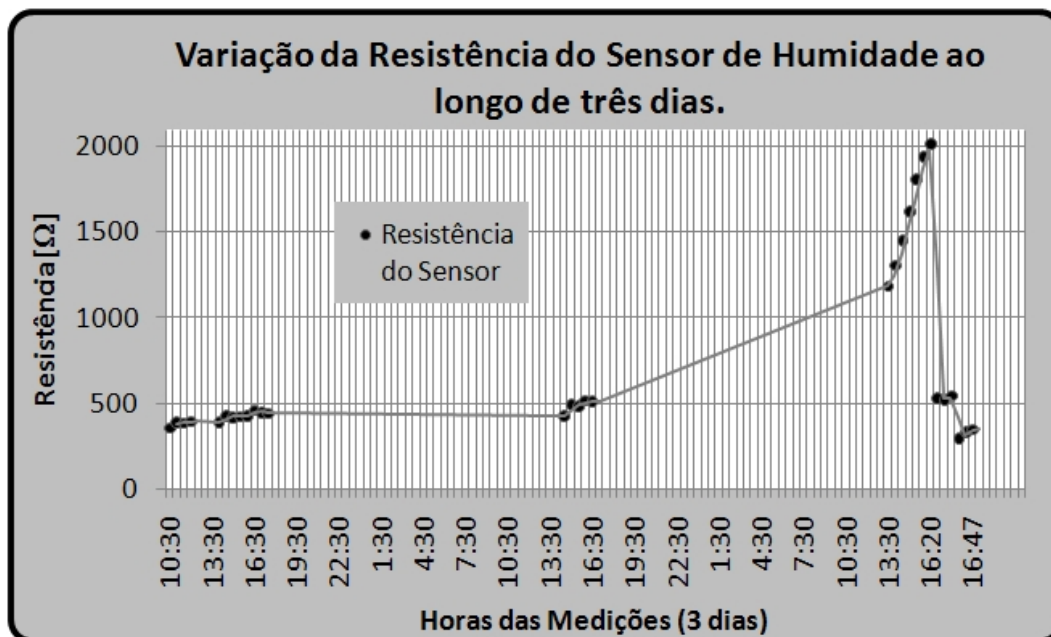


Figura 8.2.: Gráfico da variação da resistência do sensor de humidade durante três dias.

Outro resultado observado na utilização destes sensores, consiste no tempo de estabilização do valor medido durante a realização de medições esporádicas.

No entanto e apesar das medições e conversão para tensão através da tabela 4.10, não havia forma de confirmar se estas indicavam o valor real de humidade sem ter um ponto de comparação. Dessa forma foi decidido que para haver confirmação de resultados outra montagem experimental tinha de ser efectuada. Esta residiu na comparação das medições com outros dispositivos e outro método de leitura. Assim, para além de um ponto de comparação poderia, no caso de o sensor ter um *offset* de medição (deslocamento de medição), definir-se correctamente o intervalo de medição e obter leituras correspondentes aos valores reais de humidade do solo.

Para isso outros dispositivos de medição de humidade do solo foram colocados no vaso. Estes são um outro sensor de gesso e dois tensiómetros, para além de um dispositivo de leitura para os sensores de bloco de gesso, como mostra a figura 8.3. O teste foi realizado da seguinte forma: no dia de colocação de todos os sensores regou-se a planta até, visualmente, o solo estar saturado, para que nos dias seguintes se observasse no sensor a constante perda de humidade do solo.

Os tensiómetros, após calibração, foram colocados no solo e as medições (*char*) foram

8. Análise de Resultados



Figura 8.3.: Fotografia do vaso experimental.

obtidas nos seus dispositivos analógicos. Quanto aos sensores electrónicos, foram efectuadas as leituras através do dispositivo de leitura que tinha um sinal de entrada nos sensores de uma onda quadrada simétrica de 60Hz com $V_{pp} = 1,15V$, fornecendo resultados em [% VWC]. Os resultados estão representados no gráfico da figura 8.4, e a tabela com os dados é apresentada no Anexo C.

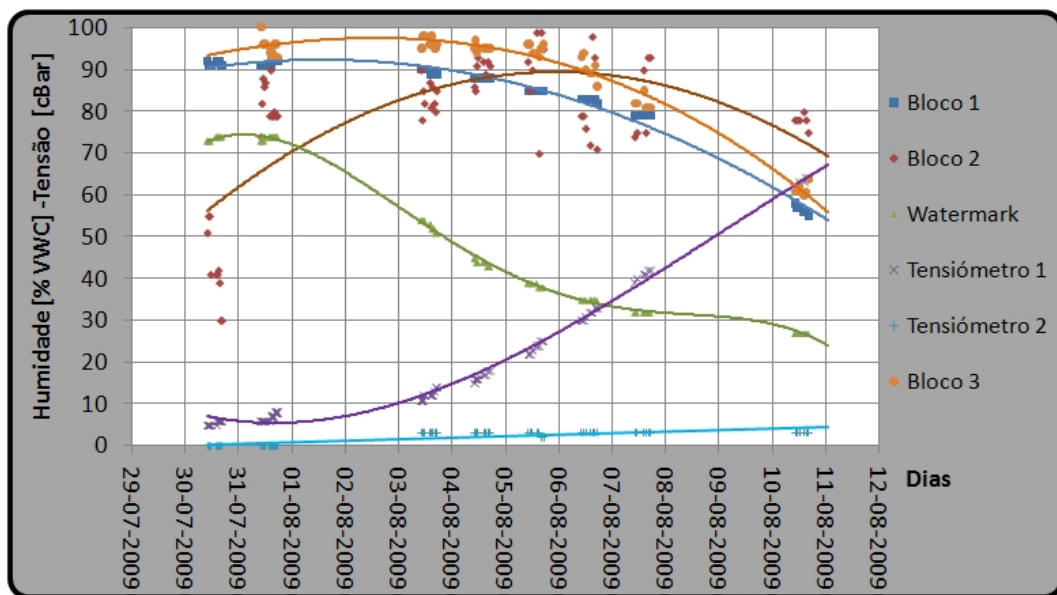


Figura 8.4.: Resultados da experiência de comparação de medições.

Analisando os resultados observa-se que ambos os sensores de gesso GB-1 não realizaram

8. Análise de Resultados

medições de forma correcta. Para além de se obterem valores pouco constantes, era necessário fornecer o sinal de excitação ao sensor durante algum tempo, para que este estabilizasse, o que numa situação normal no campo é um grande inconveniente, pois o ADC tem um tempo de amostragem inferior a este tempo de estabilização. Este fenómeno já tinha ocorrido no teste anterior. Quanto ao outro sensor de gesso, apesar de nos primeiros dias indicar pouca variação na humidade, pode-se observar que nos últimos dias já dava conta da variação da mesma, apesar das suas leituras apresentarem valores elevados quando comparados com os obtidos com a sonda Watermak e com o Tensiómetro 1, conforme será analisado. Quanto ao Tensiómetro 2, desde o primeiro momento nunca forneceu leituras fidedignas, possivelmente devido a algum erro de calibração.

Finalmente, analisando os dois últimos dispositivos, Tensiómetro 1 e o sensor Watermak, observa-se que estes tiveram comportamentos dentro do esperado, pois com o passar dos dias, a humidade diminuiu e a tensão do solo aumentou. Estes dois sensores apresentam uma evolução das suas medições muito similar, apesar de efectuadas com métodos diferentes. Pode-se observar no gráfico e pela análise das tabelas 4.9 e 4.10, que por exemplo deve-se iniciar a irrigação (na generalidade dos solos) aos 30cbar que corresponde a 43% de VWC. Quando o Tensiómetro 2 mede 30cbar, o sensor Watermark mede 35% de VWC que corresponde sensivelmente ao mesmo nível no estado do solo, o de iniciar a irrigação. Assim confirma-se que apenas estes dois dispositivos funcionaram de forma correcta e coerente ao longo dos dias de teste.

Concluindo, em relação aos sensores de gesso 2 e 6, uma possível causa para o seu mau funcionamento foi a constante utilização e experimentação com uma onda quadrada positiva, em que o valor eficaz da corrente é positivo e pode ter sucessivamente polarizado pouco a pouco os sensores. Desta forma é recomendado em trabalho futuro que o condicionamento de sinal seja realizado com uma onda quadrada simétrica e que seja testado de forma a verificar se o funcionamento destes sensores é o correcto. No entanto, este procedimento é mais difícil de gerar e por isso foi seleccionada a onda quadrada positiva. Este problema é relativo ao método mais correcto de excitar este tipo de sensores, visto que pouca literatura é encontrada sobre esse assunto com intuito de forçar os potenciais compradores à aquisição dos dispositivos de leitura.

Para resolver este problema, a melhor solução é adquirir sensores em que o resultado da sua excitação seja linear com o valor da humidade do solo. Estes, como têm um sinal de saída linear e em corrente contínua, não necessitam de electrónica de geração de sinal de entrada e condicionamento de sinal. Adicionalmente, têm uma leitura e conversão analógico-digital muito mais simples. Para esse efeito é sugerido um sensor na secção 4.2.2.

8.2. Testes Experimentais ao Sistema de Comunicação

A primeira fase de teste do sistema de comunicação realizou-se após a sua aquisição. Baseou-se na instalação do software de *interface* com o utilizador (*Sensor Monitor*) e na ligação das placas em rede. Este teste é o teste indicado pelo fornecedor para verificar se *okit* vem nas condições devidas. Como seria de esperar, depois de breves momentos de inicialização, toda a rede ficou definida e as trocas de informação entre os elementos iniciou-se de forma a transferirem as leituras da temperatura e energia da bateria ao Coordenador da rede.

Outro teste realizado ao sistema de comunicações, assentou na necessidade de estudar os pacotes de comunicação que este sistema trocava no seu funcionamento. Desta forma, e com a utilização da ferramenta *Packet Sniffer*, foi possível observar e analisar os fluxos de comunicação do sistema, como descrito no ponto 5.3.4.

Tendo em conta as alterações necessárias, realizou-se um teste em que se alterou o intervalo de tempo entre as medições e aumentou o pacote de dados das medições, de dois para quatro. Também neste caso o teste foi bem sucedido, pois o sistema de comunicação funcionou como esperado.

Face à medição de uma grandeza exterior ao *kit* e conseqüente comunicação, foram realizadas as alterações ao código já descritas neste trabalho. O objectivo foi realizar várias amostras de um mesmo valor num só canal. Essas medições são enviadas ao Coordenador e este por sua vez envia-as à UCD, onde os cálculos da humidade serão efectuados. Desta forma, e testando o sistema a ler um determinado sinal de entrada (simulando a queda de tensão nos sensores), esse sinal foi adquirido e convertido digitalmente e posteriormente comunicado pela rede até ao Coordenador. Para a verificação dos resultados, foi utilizado mais uma vez a ferramenta de apoio *Sensor Monitor*, que permite observar os pacotes de dados de cada elemento da rede que chegam ao coordenador com o resultado das medições. Tendo em atenção esses valores conclui-se que após um cálculo (equação 5.1) o valor da tensão do sinal de entrada, foi obtido com sucesso no Coordenador leituras das amostras (2 bytes) correspondentes a esse mesmo valor. Este processo foi testado para diferentes valores.

8.3. Estudo Económico

Como foi definido na secção 1.2, um dos principais objectivos consiste em que este sistema tenha um custo o mais baixo possível de modo a ter uma grande aplicabilidade no mercado.

8. Análise de Resultados

Dessa forma e tendo em conta o custo associado aos componentes do sistema tem de se inferir se este é ou não viável do ponto de vista económico, ou seja, se os lucros no final prevalecem em relação aos custos de implementação.

8.3.1. Custo Previsto do Sistema

Nas secções anteriores, e com a descrição dos vários módulos, observou-se que cada componente dos módulos tem um custo associado. Assim, o custo final consiste num somatório dos vários custos intermédios, que se encontram apresentados na tabela 8.1.

Tabela 8.1.: Tabela de preços dos componentes num sistema de dois medidores e receptor.

Módulo	Componente	Preço 1	Preço 2
<i>Sensorização</i>	Sensor Watermark	32,75€	65,50€
	Oscilador	0,54€	1,08€
<i>Comunicação</i>	EZ430-RF2480	(21,22€)	62,50€
<i>Análise de Dados</i>	Porta USB (Socket) Lumberg	n.d.	0,60€
	Processador (MSP430F5514)	n.d.	2,32€
	3 Displays (LCD-S2X1C50TR)	n.d.	6,84€
	Relé (V23105A5308A201)	2,17€	4,34
Total		56,68€	143,18€

Tendo por base a tabela apresentada define-se que Preço 1 é o preço de apenas um dispositivo de campo, ou seja, um dispositivo que efectua as medições; e o Preço 2 é o preço de um sistema completo com três elementos (neste caso), constituído por dois elementos de campo e o coordenador da rede. É importante ter em conta que o Preço 1 total é um valor representativo pois é impossível fazer uma rede deste tipo apenas com um elemento (é necessário no mínimo dois elementos). Para exemplo explicativo é apresentado o Preço 2 total como o custo total dos componentes para criar uma rede de três elementos (dois dispositivos de leitura de campo e o coordenador de rede). Assim, a implementação de uma rede com cinco elementos, requer a adição de duas vezes o Preço 1 com o Preço 2. Alguns destes preços estão definidos pelos fabricantes em dólares norte-americanos e convertidos para euros à taxa de câmbio actual.

No entanto, é necessário referir que a estes valores é necessário adicionar o custo associado ao empacotamento dos componentes. Este empacotamento tem de obedecer a algumas características tais como: estanque, não metálico (para possibilitar comunicações sem fios)

8. Análise de Resultados

e resistente. A este custo existe ainda a possibilidade de ser adicionado o custo de uma qualquer placa de circuito impresso necessária. É preciso ainda referir que esses valores não estão relacionados com o normal desconto no preço no caso de se fazerem encomendas em quantidade (valor muito significativo), e também não é tido em conta o normal custo dos portes de envio das mesmas encomendas.

Assim é obtido um valor final, para um sistema de duas unidades de medida e um receptor de dados (gestor de rede) é de 143,18€. Isto significa que é um investimento controlado para a implementação de um sistema que efectua uma gestão eficiente da irrigação e desse modo oferece um retorno económico que certamente rentabilizará os custos necessários.

8.3.2. Aplicabilidade no Mercado

Mesmo sem ter em conta o valor de custo final obtido, pode-se dizer que a aplicabilidade é quase certa e a procura também existe. Primeiro, a maioria da população está cada vez mais sensibilizada em adoptar métodos que sejam amigos do ambiente e diminuam o gasto energético, e se a este factor se somar a execução de uma tarefa automaticamente sem qualquer trabalho humano sistemático, ainda mais apetecível se torna este mercado. Adicionalmente, caso se possa garantir que a um médio-curto prazo é obtido lucro financeiro, quer através da poupança energética, quer na poupança de recursos, associados a uma potencial melhoria da qualidade do produto cultivado, então estão reunidos factores interessantes que tornam este sistema, com uma elevada relevância e certamente aplicabilidade no mercado. Reforçando que este tipo de sistemas é aplicável no nosso mercado, pode-se observar numa pesquisa na internet (analisado no capítulo 2) que já existem no mercado empresas que disponibilizam sistemas semelhantes, ou seja, sistemas que tentam alcançar o mesmo resultado, efectuar uma irrigação eficaz segundo medições da humidade do solo ou de outras grandezas. Estes sistemas podem requerer um investimento mais ou menos elevado, podem suportar apoio e análise por software, podem ser com ou sem fios, individuais ou colectivos, isto é, podem ser de variados tipos, porém é efectivamente demonstrada a existência de procura destes sistemas. O que demonstra a cada vez maior aplicabilidade de sistemas deste tipo.

9. Conclusão

Esta dissertação é o resultado de uma análise de um sistema que combina vários módulos diferentes, com componentes distintos. Assenta no objectivo geral de monitorizar a humidade do solo e segundo um esquema de comunicações sem fios elaborar um plano eficiente de controlo da irrigação.

Para o funcionamento destes módulos foi necessário proceder ao estudo de cada um deles, bem como realizar testes experimentais face ao desempenho dos mesmos, com o intuito de melhorar o seu funcionamento, e simultaneamente possuírem um baixo consumo energético.

Neste capítulo são apresentadas as contribuições desta dissertação sobre o tema da monitorização da humidade do solo e ainda da gestão eficiente de recursos naturais. São ainda apresentadas sugestões para um trabalho futuro neste sistema, de modo a que tenha uma evolução qualitativa.

9.1. Contribuições do Trabalho

Como definido nos objectivos desta dissertação, a necessidade de conhecer as características e processos de uma produção agrícola, para dessa forma se dimensionar o sistema de gestão da irrigação, foi alcançada. Deste tema algumas conclusões podem ser retiradas. Devido ao elevado número de factores presentes numa área agrícola (tipo de cultura, relevo, reserva de água, etc.), existe um número de variáveis (dispositivos de actuação, número de elementos de campo, topologia da rede sem fios, periodicidade das leituras, etc.) que só devem ser totalmente definidas após o conhecimento desses mesmos factores. É ainda aconselhável que as irrigações sejam efectuadas, pelo cair da noite ou madrugada, para a menor perda por evapotranspiração possível, assim a definição do momento a irrigar (função da humidade do solo) tal como a quantidade a irrigar e tamanho das zonas a irrigar, são também factores que apenas podem ficar totalmente definidos depois de um estudo de onde se vai aplicar o sistema. Este estudo deve ter em conta todas as informações possíveis, mesmo que sejam de agricultores pouco instruídos, pois estes têm um conhecimento importante. A adaptabilidade deste sistema pode ainda ser observada visto não depender de nenhum sistema de irrigação em particular, e assim poder ser implementado em qualquer sistema já existente ou a

9. Conclusão

construir. Para isso é apenas necessário ter em conta qual o componente mais indicado no interface da UCD com o módulo de irrigação (relés, válvulas, etc). Conclui-se, desta forma, que o sistema tem grande aplicabilidade, ou seja, nenhum dos seus componentes apresenta nenhuma restrição a algum destes factores acima mencionados, o que demonstra uma versatilidade satisfatória.

Com este trabalho adquiriu-se conhecimentos face às necessidades e possibilidades tecnológicas que existem no mundo agrícola. Esta área é por norma muito artesanal, exceptuando grandes terrenos agrícolas, onde a necessidade de lucro leva ao estudo destas necessidades tecnológicas e a consequentes elaborações de sistemas que as solucionem. Conclui-se, que um dos maiores problemas a solucionar é a obtenção de uma irrigação eficiente. E para resolver este problema é necessária a conjugação de vários processos diferentes, que em simultâneo compõem um sistema tecnológico. Cada um desses processos (módulos) tem uma função específica, e que em conjunto apresentam um funcionamento simples que soluciona o problema. Para o utilizador, no dia-a-dia, pouco trabalho há a fazer, para além da manutenção (quando necessária, avisos da UCD). Assim a facilidade de utilização é evidente. Apenas na fase inicial, na instalação do sistema é necessário algum trabalho, mas este terá forçosamente de ser realizado por um indivíduo com formação especializada. Visto que as especificidades do ambiente agrícola têm de ser levadas em conta na definição de alguns pontos do funcionamento do sistema, como referido anteriormente.

Este sistema acarreta grandes vantagens em relação aos sistemas referidos no final do capítulo 2. É assim um sistema com uma implementação fácil e adaptável a qualquer situação presente no terreno, não tem a necessidade de os seus elementos estarem ligados a uma torre e dessa forma condicionados por fios, dificultando o livre acesso na área agrícola. É um sistema aplicável em qualquer terreno e em qualquer cultura face à sua portabilidade. É ainda um sistema pouco intrusivo visualmente, pois o seu tamanho é reduzido. Uma das suas grandes vantagens, em relação aos demais referidos neste trabalho, é a possibilidade de se poder adicionar a qualquer instante um novo dispositivo de medição no campo. Este automaticamente entra na rede já criada e em funcionamento, começando assim a realizar as suas funções, medição da humidade do solo e comunicação à UCD. Este factor é de extrema importância visto ser possível alterar a área monitorizada sem qualquer impedimento. Da mesma forma é possível retirar um elemento da rede a qualquer instante. Isto permite efectuar, sempre que necessário, manutenção (como por exemplo a substituição de baterias) sem necessidade de desligar o sistema. Conclui-se assim que este sistema funciona com elementos *plug-and-play*.

9. Conclusão

Tendo em conta o factor económico, este sistema de monitorização da humidade do solo, foi definido com baixo custo (como analisado na secção 8.3) que facilitará a obtenção de ganhos se um certo investimento for realizado. Esta análise foi efectuada tendo por base os custos de cada componente, ao preço de venda ao público de apenas uma unidade (se possível). Para a elaboração da tabela de preços (tabela 8.1), foi escolhido um componente que soluciona um dado problema, tendo sempre em consideração que o seu custo teria de ser diminuto. Desta forma obtém-se um custo para uma rede de dois elementos de medição com um coordenador e UCD de 143,18€, que é um custo bastante acessível para o mundo agrícola. Cumpre-se assim um dos principais objectivos propostos para este trabalho, que consistia na definição de um sistema deste tipo, sem grande investimento, que permitisse uma gestão eficiente da água e simultaneamente tivesse menor consumo energético. A aplicabilidade no mercado é assegurada com a necessidade de concorrer com outros sistemas idênticos a um custo menor. E ainda pela potencialidade que estes sistemas têm em gerar lucros, face à diminuição de custos (água e energia) e aumento de receitas (qualidade do produto final).

É também um sistema de baixo consumo de energia, como foi inicialmente proposto. O *kit* de comunicação tem um funcionamento totalmente baseado na poupança energética, já que entre momentos de medição, entra em estado de baixo consumo. O próprio protocolo de comunicação é focado na baixa transmissão de dados, para diminuir o seu consumo. E é definido que qualquer cálculo necessário é realizado na UCD e não nos elementos de campo por forma a não sobrecarregar o seu processamento e para diminuir o seu consumo de energia. No entanto e para melhorar ainda mais este aspecto do consumo da energia, é apresentada uma possibilidade a desenvolver em trabalhos que se venham a realizar. Todos os componentes de condicionamento de sinal são passivos, não requerendo assim qualquer alimentação.

De forma mais particular, algumas considerações devem ser feitas em relação aos componentes utilizados e seu funcionamento. Quanto aos sensores de humidade do solo, é importante referir que de todos os sensores utilizados, a sonda Watermark é a mais robusta e indicada para estas funções (como indica o teste analisado no ponto 8.1). Para além de uma melhor protecção face ao ambiente exterior, no solo, foi aquele que melhor comportamento teve nos testes experimentais, revelando medições consistentes com a humidade no solo indicada pelo Tensiómetro 1, e como observado no solo. É assim dos dois tipos de sensores testados, o indicado para utilizações neste sistema. No entanto, face ao tipo de excitação destes sensores (blocos resistivos), torna-se algo difícil a sua utilização. Estes não podem ser alimentados a corrente contínua, o que força à elaboração de um circuito de alimentação, e da mesma forma um circuito de condicionamento de sinal para ler o sinal de saída, o que

9. Conclusão

força a elaboração de outro circuito. Para além disso é bastante mais difícil adquirir este tipo de sinal e digitalizá-lo face a um sinal contínuo, utilizando desta forma mais recursos no ADC do microcontrolador. Resumindo, conclui-se então que sensores dieléctricos têm uma mais fácil aplicabilidade neste sistema, apesar de normalmente terem um custo maior. No entanto, existem já no mercado sensores deste tipo mais acessíveis, como o caso do sensor VG400 da Vegetronix, que não foi testado devido à tardia resposta de empresa ao pedido de informação efectuado. Este pelas suas características é indicado para este sistema.

9.2. Trabalhos Futuros

O sistema definido ao longo deste trabalho é uma versão inicial de um sistema deste tipo. Pode assim evoluir com base nas conclusões retiradas.

Numa primeira fase observou-se que os sensores seleccionados têm algum trabalho associado à excitação e leitura do sinal. Desta forma é aconselhável num trabalho futuro a adopção de sensores de funcionamento mais simples, ou seja, uma alimentação e conseqüente sinal de saída lineares, como o sensor da Vegetronix referido na sub-secção 4.2.2. Isto permite a utilização de menos electrónica, requer menor tempo de amostragem na leitura do sinal do sensor e dessa forma a utilização de menos recursos do ADC do microcontrolador.

Como referido na secção 6.1, a capacidade de localização de cada elemento da rede é uma característica a incluir num trabalho futuro. Facilitará assim a elaboração do mapa de humidade. Este problema pode ser resolvido com a inclusão de um sistema GPS (*Global Positioning System*) em cada elemento no campo, que comunica à UCD a sua posição e as suas medições.

Uma evolução também a ter em conta é a possível inclusão, em cada elemento de campo, de um método de microgeração de energia por forma a recarregar as baterias. Este método poderá ser já utilizado em sistemas similares, como a energia solar, ou um método de geração de energia proveniente do movimento da água da irrigação. Isto leva a uma diminuição considerável da manutenção dos dispositivos, visto que as baterias terão um maior tempo de vida, melhorando assim o já diminuto consumo energético.

Poder-se-á definir ainda um sistema de monitorização do solo apoiado em menos recursos. Isto é, se ao se acoplar o sistema de sensorização com o de análise e actuação num só local, retirando o sistema de comunicação sem fios, resultará um sistema de menor porte e de funcionamento simplificado. Pois, desta forma, haveria um sensor a medir a humidade, analisar-se-ia a medição e se necessário efectuar-se-ia nesse local a irrigação. Isto fará com que cada elemento funcione individualmente, não havendo comunicação com outros elementos, ou seja, não existindo uma rede de comunicação. Este sistema será mais indicado para zonas

9. Conclusão

de menor área a irrigar em que menor conhecimento e poucas alterações serão necessárias.

Outro ponto a trabalhar será na elaboração de uma UCD mais atractiva ao utilizador, onde este possa aceder aos dados lidos e alterar definições de funcionamento do sistema. Para isso será necessária a inclusão da interface visual que permita estas funcionalidades.

Para finalizar a realização de estudo no campo, será uma boa ferramenta para provar e testar este sistema em todas as suas vertentes dimensionadas neste trabalho. Face à implementação do sistema numa área agrícola, resultados das características como a capacidade de alcançar baixo consumo energético, a diminuição na utilização da água, a obtenção de lucros e até melhoria na qualidade da cultura agrícola são factores que quando comparados com um sistema que funcione segundo um método de gestão de irrigação simples, tomariam um outro peso neste trabalho. Mas factores como analisar o funcionamento do sistema face a muitos dispositivos de medição no terreno ligados na mesma rede, a distância média a que estes deverão estar colocados para conseguirem transmitir dados sem constrangimentos de sinal até à unidade central e capacidade de resistirem às normais diferenças térmicas entre o dia e a noite, são detalhes importantes para uma optimização do funcionamento deste sistema.

Bibliografia

- AMBAST, S. K., KESHARI, ASHOK K., & GOSAIN, A. K. 2002. Satellite remote sensing to support management of irrigation systems: concepts and approaches. *Irrigation and Drainage*, **51**.
- DA SILVA, ANDRÉ TEIXEIRA. 2007. *Módulos de Comunicação Wireless para Sensores*. Ph.D. thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- DECAGON DEVICES, INC. 2008. *Soil Moisture Sensors Users Manual*.
- DELMHORST. 2003. *Model KS-D1 Operating Instructions*.
- DELTA-T DEVICES. 2007. *Soil Moisture Measurement*.
- DTI. 2004. Public Health Engineering - Irrigation. Department of Trade and Industry - CIBSE.
- ERGEN, SINEM COLERI. 2004. *ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary*.
- ERTSEN, MAURITS W. 2009. Irrigation scheduling and irrigation systems: optimising irrigation efficiency for container ornamental shrubs. *Irrigation and Drainage*.
- FOTH, HENRY D. 1990. *Fundamentals of Soil Science*. John Wiley & Sons.
- FSC. 1998. *CMOS Oscillators*. Fairchild Semiconductor Corporation.
- GRANT, OLGA M., DAVIES, MICHAEL J., LONGBOTTOM, HELEN, & ATKINSON, CHRISTOPHER J. 2008. Irrigation scheduling and irrigation systems: optimising irrigation efficiency for container ornamental shrubs. *Irrigation Science*, **Volume 27**, 139–153.
- IAEA. 2008. *Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide To Methods, Instrumentation and Sensor Technology*. Vol. Training Course Series N°30. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- ICT. *Watermark smart interface*. ICT International Pty, Ltd.

BIBLIOGRAFIA

- IEEE 802.15.4. 2006 - 2007. *Part 15.4, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. Standard for Information technology, Telecommunications and information exchange between systems, Local and metropolitan area networks Specific requirements.
- IHRWM. 2002 (November). *An Electronic Interface for Watermark and Gypsumblock Sensors for Use with Standard Dataloggers*. Institute of Hydraulics and Rural Water-Management, University of Agricultural Sciences Vienna (IHRWM).
- IMKO. 2009. *Soil Moisture Sensors*. <http://www.imko.de/ENG/>.
- IRROMETER COMPANY, INC. *Watermark Soil Moisture Sensor*.
- IRROMETER COMPANY, INC. 2008 (11). *Soil Moisture Basics*.
- LABIOD, HOUDA, AFIFI, HOSSAM, & SANTIS, CONSTANTINO DE. 2007. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMax*. Springer.
- LARCHER, WALTER. 1995. *Physiological Plant Ecology*. Springer.
- MAFF. 2002 (Fevereiro). *Water Conservation Factsheet (Soil water storage capacity and available soil moisture)*. Ministry of Agriculture, Food and Fisheries (MAFF).
- MUKHAMEDJANOV, SH.SH., & NEROZIN, S.A. Management of Irrigation and Agricultural Practice Based on State-of-the-Art Technological and Engineering Methods for Achieving Efficient Use of Land and Water Resources and Sustainable Crop Yields at the Field Level. 1-18.
- PINHEIRO, JOSÉ MAURICIO SANTOS. 2008 (05). *As Redes com ZigBee*.
- RIANÇO, MARISA. 2005 (04). *Água, um recurso natural em risco de escassez*.
- ROQUE, MERCÊS, FERREIRA, M. ÂNGELA, & CASTRO, ADALMIRO. 2001. *Geologia 12^o Ano*.
- SHOCK, C.C., FLOCK, R., FEIBERT, E., SHOCK, C.A., PEREIRA, A., & JENSEN, L. 2005. *Irrigation Monitoring Using Soil Water Tension*. Sustainable Agriculture Techniques.
- SHOCK, CLINTON C., BARNUM, J. MICHAEL, & SEDDIGH, MAJID. 1998. Calibration of Watermark Soil Moisture Sensors for Irrigation Management.
- SPECTRUM TECHNOLOGIES, INC. *Watermark Soil Moisture Sensor Catalog 6450*.

BIBLIOGRAFIA

- SPECTRUM TECHNOLOGIES, INC. *WaterScout SM100 Soil Moisture Sensor Catalog 6460*.
- TEXAS INSTRUMENTS. 2006. *Data Sheet MSP430x22x4*.
- TEXAS INSTRUMENTS. 2008a. *CC2480 Developer's Guide*.
- TEXAS INSTRUMENTS. 2008b. *CC2480 Interface Specification*.
- TEXAS INSTRUMENTS. 2008c. *MSP430x2xx Family User's Guide*.
- TEXAS INSTRUMENTS. 2008d. *Target Board Layout*.
- TEXAS INSTRUMENTS. 2008e. *Target Board Schematics*.
- TEXAS INSTRUMENTS. 2008f. *User's Guide eZ430-RF2480 Demonstration Kit*.
- VEGETRONIX. 2009. *Vegetronix Soil Moisture Sensor Probes*.
<http://www.vegetronix.com/Products/VG400/>.
- VERNIER SOFTWARE & TECHNOLOGY. 2009. *Soil Moisture Sensor*.
- WMO. 2008. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. 7^a edn.
World Meteorological Organization.

Anexos

A. Anexo - *Pinout* e Esquema de Ligações do Kit eZ430-RF2480

Aqui apresenta-se o *pinout* do MSP430f2274, sendo representado na(figura A.1) todos os seus pinos e funções que cada um deles pode tomar.

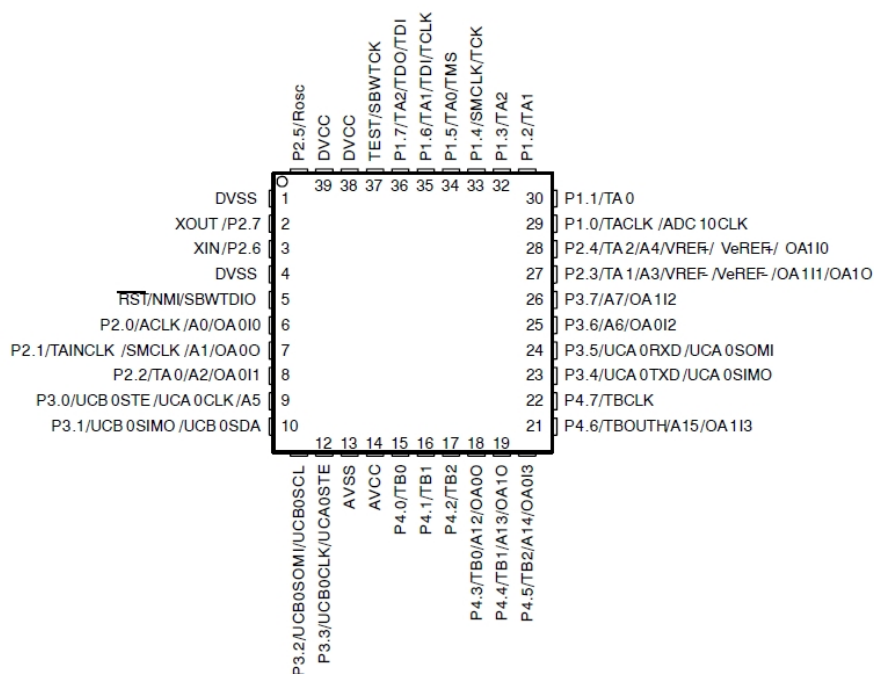


Figura A.1.: *Pinout* do MSP430f2274.

Apresenta-se ainda o esquema de ligações (figura A.2) na placa *Target Board*, que inclui as ligações entre o microcontrolador e o dispositivo de rede, com os sensores incorporados, o botão de pressão, os LEDs e os portos de ligação a dispositivos exteriores.

A. Anexo - Pinout e Esquema de Ligações do Kit eZ430-RF2480

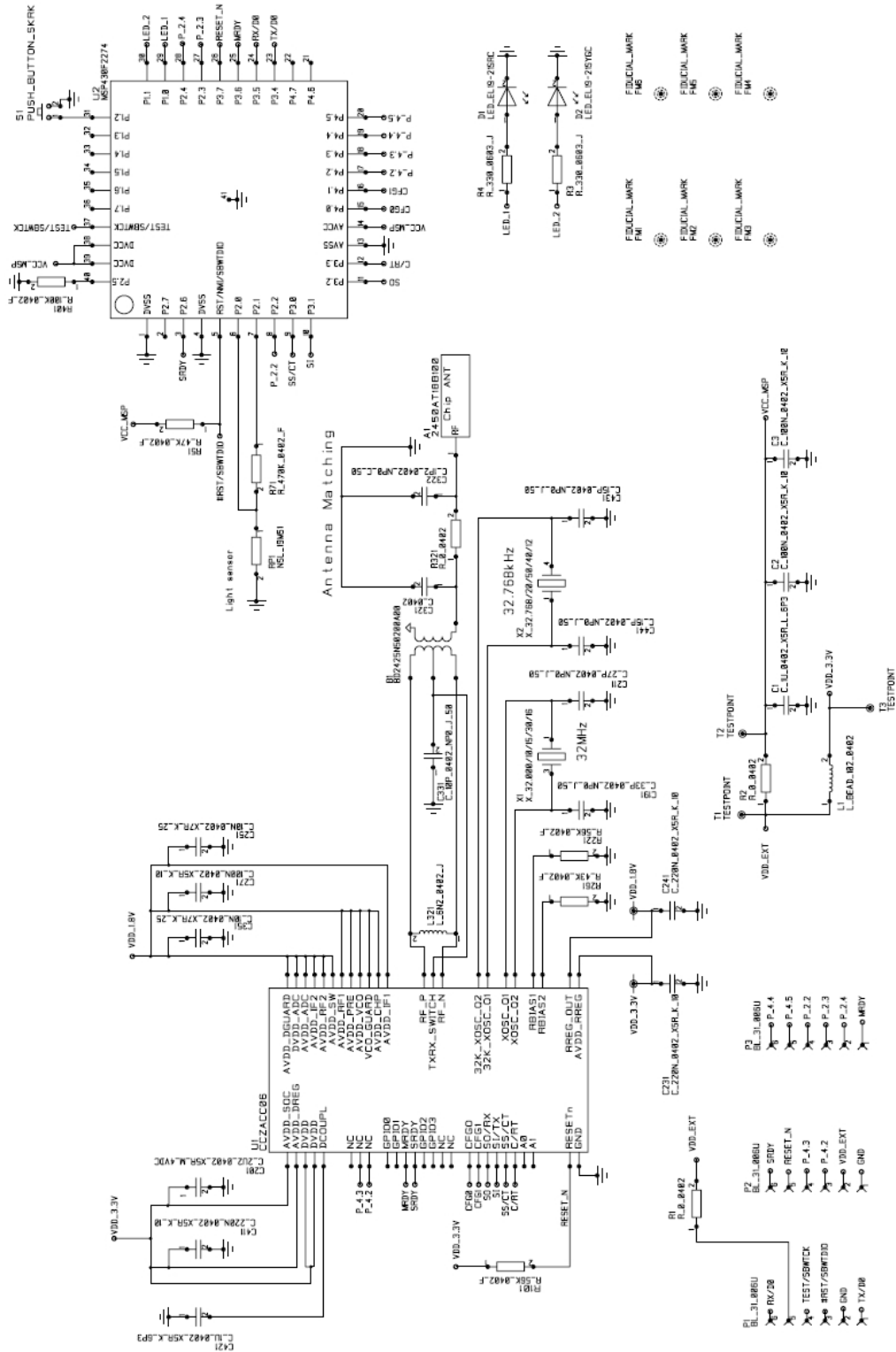


Figura A.2.: Esquema de Ligações da *Target Board* do kit eZ430-RF2480 (Texas Instruments, 2008e).

B. Anexo - Profundidades de Colocação dos Sensores

Tabela B.1.: Profundidade sugerida a que se deve colocar o sensor Watermark segundo o tipo de colheita.

Colheita	Superficial [cm]	Profundo [cm]
<i>Alfalfa</i>	45 - 60	90 - 120
<i>Amêndoa</i>	60	120
<i>Alcachofra</i>	45	90
<i>Espargo</i>	45 - 60	90 - 120
<i>Abacate</i>	30	60
<i>Algodão</i>	45	90
<i>Alface</i>	30	(n.d.)
<i>Abacaxi</i>	38	75
<i>Amendoim</i>	30	(n.d.)
<i>Acelga</i>	25	60
<i>Ameixa</i>	60	120
<i>Abóbora</i>	45	90
<i>Alho</i>	30	60
<i>Banana</i>	30	60
<i>Brócolos</i>	30	50
<i>Beterraba</i>	30 - 45	60 - 90
<i>Beringela</i>	30	60
<i>Batata</i>	20 - 25	45
<i>Batata Doce</i>	45	90
<i>Couve</i>	30	50
<i>Cevada</i>	35	90
<i>Cenoura</i>	30	60

B. Anexo - Profundidades de Colocação dos Sensores

Tabela B.2.: Continuação da tabela B.1.

Colheita	Superficial [cm]	Profundo [cm]
<i>Couve-flor</i>	30	60
<i>Cereja</i>	60	120
<i>Café</i>	30 - 60	90 - 120
<i>Cana de Açúcar</i>	45	90
<i>Chá</i>	30	60
<i>Cebola</i>	30	(n.d.)
<i>Ervilha</i>	45	90
<i>Espinafre</i>	30	60
<i>Framboesa</i>	30	45
<i>Figo</i>	45	90
<i>Feijão</i>	25	45
<i>Girassol</i>	60	120
<i>Laranja</i>	45	90
<i>Limão</i>	45	90
<i>Linho</i>	45	90
<i>Milho Doce</i>	30	75
<i>Milho</i>	45	90
<i>Maçã</i>	50	100
<i>Mirtilo</i>	30	60
<i>Melão</i>	45	90
<i>Melancia</i>	45	90
<i>Mostarda</i>	45	90
<i>Menta</i>	30	60
<i>Morango</i>	15	30
<i>Nectarina</i>	45	90
<i>Nabo</i>	45	90
<i>Pepino</i>	45	90
<i>Pêssego</i>	45	60
<i>Pêra</i>	45	90
<i>Pimenta</i>	38	75
<i>Papaia</i>	30	60
<i>Romã</i>	45	90
<i>Rabanete</i>	30	(n.d.)
<i>Soja</i>	45	90
<i>Tomate</i>	45	90
<i>Trigo</i>	145	90
<i>Uvas</i>	60	120

C. Anexo - Tabelas de Gráficos

Neste anexo é apresentada a tabela de valores referente ao gráfico da figura 8.2. Estes valores reflectem o valor da resistência medida no sensor de humidade, durante três dias.

Tabela C.1.: Tabela dos valores de Resistência do Sensor.

Hora	V_i [V]	V_o [V]	I [A]	R_s [Ω]
<i>Dia 1</i>				
10:30	3,36	0,0774	0,0076	354
11:00	3,38	0,0713	0,0070	387
11:30	3,36	0,0719	0,0071	381
12:00	3,35	0,0702	0,0069	389
14:00	3,37	0,0718	0,0070	383
14:30	3,38	0,0657	0,0064	421
15:00	3,38	0,0668	0,0066	414
15:30	3,38	0,0659	0,0065	420
16:00	3,38	0,0652	0,0064	425
16:30	3,37	0,0604	0,0060	458
17:00	3,38	0,0626	0,0061	443
17:30	3,40	0,0637	0,0063	438
<i>Dia 2</i>				
14:30	3,37	0,0656	0,0064	421
15:00	3,43	0,0579	0,0057	488
15:30	3,42	0,0586	0,0058	481
16:00	3,43	0,0551	0,0054	514
16:30	3,44	0,0559	0,0055	508

Hora	V_i [V]	V_o [V]	I [A]	R_s [Ω]
<i>Dia 3</i>				
13:30	3,54	0,0251	0,0025	1185
14:00	3,53	0,0227	0,0022	1306
14:30	3,53	0,0204	0,0020	1455
15:00	3,53	0,0183	0,0018	1623
15:30	3,53	0,0164	0,0016	1812
16:00	3,53	0,0153	0,0015	1943
16:20	3,53	0,0147	0,0014	2023
16:21	3,53	0,0555	0,0054	528
16:22	3,53	0,0566	0,0056	518
16:23	3,53	0,0542	0,0053	541
16:28	3,27	0,0909	0,0089	389
16:36	3,27	0,0808	0,0079	327
16:47	3,27	0,0770	0,0076	343

C. Anexo - Tabelas de Gráficos

Tabela C.2.: Tabela dos valores dos sensores.

Hora	Bloco 1	Bloco 2	Watermark	Tens. 1	Tens. 2	Bloco 3
Dia 1 (30-07-2009)						
10:30	91	55	73	5	0	(n.d.)
11:00	91	55	73	5	0	(n.d.)
11:30	91	41	73	5	0	(n.d.)
14:00	92	41	74	5	0	(n.d.)
14:30	92	41	74	6	0	(n.d.)
15:00	92	42	74	6	0	(n.d.)
15:30	92	39	74	6	0	(n.d.)
16:00	91	30	74	6	0	(n.d.)
16:30	91	30	74	6	0	(n.d.)
Dia 2 (31-07-2009)						
10:00	91	74	73	6	0	100
10:30	91	82	73	6	0	100
11:00	91	88	74	6	0	96
11:30	91	86	73	6	0	96
12:00	91	87	74	6	0	96
14:00	91	79	74	6	0	94
14:30	91	90	74	7	0	95
15:00	92	79	74	7	0	93
15:30	92	79	74	7	0	94
16:00	92	80	74	7	0	96
16:30	92	79	74	8	0	96
17:00	92	79	74	8	0	96
17:30	92	79	74	8	0	93

C. Anexo - Tabelas de Gráficos

Tabela C.3.: Tabela dos valores dos sensores.

Hora	Bloco 1	Bloco 2	Watermark	Tens. 1	Tens. 2	Bloco 3
Dia 5 (03-08-2009)						
10:00	90	90	54	11	3	95
10:30	90	78	54	11	3	95
11:00	90	85	54	11	3	98
11:30	90	82	54	12	3	98
14:00	89	87	53	12	3	96
14:30	89	81	53	12	3	98
15:00	89	86	52	12	3	98
16:00	89	82	52	13	3	95
16:30	89	80	51	14	3	95
17:00	89	85	51	14	3	96
Dia 6 (04-08-2009)						
10:00	88	86	45	15	3	95
10:30	88	85	45	16	3	97
11:00	88	91	44	16	3	94
11:30	88	93	44	16	3	95
14:00	88	92	44	17	3	95
15:00	88	89	44	17	3	95
16:00	88	92	43	18	3	95
17:00	88	91	43	18	3	95
Dia 7 (05-08-2009)						
10:00	85	92	39	22	3	96
11:00	85	85	39	22	3	96
12:00	85	90	39	23	3	94
14:00	85	99	39	24	3	94
15:00	85	70	38	24	3	93
16:00	85	99	38	25	2	95
17:00	85	95	38	25	2	96

C. Anexo - Tabelas de Gráficos

Tabela C.4.: Tabela dos valores dos sensores.

Hora	Bloco 1	Bloco 2	Watermark	Tens. 1	Tens. 2	Bloco 3
Dia 8 (06-08-2009)						
10:00	83	79	35	30	3	93
11:00	83	79	35	30	3	94
12:00	83	76	35	31	3	90
14:00	83	72	35	32	3	89
15:00	83	98	35	32	3	89
16:00	83	93	35	33	3	91
17:00	82	71	35	33	3	86
Dia 9 (07-08-2009)						
10:00	79	74	32	39	3	82
11:00	79	75	32	40	3	82
14:00	79	90	32	41	3	85
15:00	79	75	32	41	3	81
16:00	79	93	32	42	3	81
17:00	79	93	32	42	3	81
Dia 10 (10-08-2009)						
10:00	58	78	27	62	3	61
11:00	57	78	27	62	3	61
12:00	57	78	27	63	3	62
14:00	56	80	27	63	3	60
15:00	56	78	27	64	3	61
16:00	55	75	27	64	3	64