



Hugo António Letra Peralta

CropSupervisor: Sistema para monitorização e comando de explorações agrícolas

Setembro 2012



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

CropSupervisor: Sistema para monitorização e comando de explorações agrícolas

Hugo António Letra Peralta

Coimbra, 2012

CropSupervisor: Sistema para monitorização e comando de explorações agrícolas

Orientador:

Prof. Dr. Lino José Fortes Marques

Júri:

Prof. Dr. António Paulo Mendes Breda Dias Coimbra

Prof. Dr. Manuel Marques Crisóstomo

Hugo António Letra Peralta

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e
de Computadores

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra

Setembro 2012

“We can't solve problems by using the same kind of thinking we used when we created them”

-Albert Einstein.

Dedicatória

Esta dissertação é dedicada aos meus pais e irmã.

Agradecimentos

Quero agradecer ao meu orientador Professor Doutor Lino Marques pela disponibilidade e orientação durante o decorrer desta dissertação.

Aos colegas, Gilberto Martins, Fábio Faria, Luís Garrote e Paulo França pela ajuda e apoio durante a dissertação.

Aos colegas do Laboratório de Sistemas Embebidos pelo companheirismo e entreaajuda.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram apesar de passar os dias a trabalhar na dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (DEEC) e ao Instituto de Sistemas e Robótica (ISR) que disponibilizaram as suas instalações e todo o equipamento necessário para a realização desta dissertação.

À Universidade de Coimbra (UC), por me ter permitido crescer enquanto pessoa.

A todos aqueles que não mencionei aqui mas que de uma forma ou de outra, me ajudaram nesta caminhada.

Resumo

Neste projecto de dissertação foi desenvolvido um sistema de monitorização e controlo da irrigação para estruturas agrícolas. A arquitectura utilizada permite a entrada e saída de novos nós na rede, sem alterações de software, sendo baseada numa rede sem fios WSN utilizando módulos Zigbee que permite reduzir a cablagem, e dá maior portabilidade ao sistema. Este projecto enquadra-se nas soluções de baixo custo de monitorização, pois escolhemos sensores de baixo custo e plataformas de desenvolvimento *Arduino* para produzir nós sensoriais de monitorização agrícola e ambiental, permitindo também a automatização do sistema de irrigação. Os dados recolhidos são enviados e armazenados num servidor, os dados armazenados podem ser acedidos remotamente, o que nos permite acesso em qualquer local que possua Internet. São criadas duas redes distintas, uma rede Ethernet responsável pelo envio de dados do nó coordenador para o servidor e uma rede ZigBee entre o nó coordenador e end-devices. Este tipo de projectos são de grande utilidade para aquisição de dados e controlo de estruturas agrícolas sendo uma solução de baixo custo e contribuem para a redução do impacte ambiental (racionalização do uso água), oferecendo também orientação para outros pesquisadores desenvolverem nós sensoriais de baixo custo e sistemas de monitorização contínua.

Palavras chave

Open-Source hardware, arduino, sensores de humidade, transmissão de dados por radiofrequência, ZigBee, irrigação, agricultura de precisão, WSN

Abstract

In this project it was developed a monitorization and control system of irrigation for agricultural structures. The used architecture allows the connection and disconnection of new nodes in network, without software alterations. Being based in a wireless network WSN and utilizing Zigbee modules, which enable the wiring reduction, and gives portability to the system. This work can be englobed in the low cost solutions, since the chosen sensors were low cost and the developer platform was *Arduino*, to create agricultural and ambienal monitorization sensorial nodes, allowing also the irrigation system automatization. The collected data are sent and stored in a servidor, they can be accessed remotely, which allows the access in any place with Internet. Two distinct networks are created, one Ethernet network is responsible for sending data of the coordinator node to the servidor and one Zigbee network between the node and the end-devices. This type of works are of great utility to data acquisition and agricultural crop farm control, being a low cost solution that contribute to environmental impact reduction (water use rationalization), offering also guidance for others researchers to develop low cost sensorial nodes and continuum monitorization systems.

Key Words:

Open Source hardware, arduino, humidity sensors, radiofrequency data transmission, ZigBee, irrigation, precision agriculture

Conteúdo

Lista de Acrónimos	xxiii
Lista de Figuras	xxv
Lista de Tabelas	xxvii
1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. Revisão da literatura	3
3. Monitorização de explorações agrícolas	9
3.1. Variáveis a monitorizar	9
3.1.1. Radiação solar	9
3.1.2. Temperatura do ar	10
3.1.3. Temperatura do solo	10
3.1.4. Humidade do ar	10
3.1.5. Humidade no solo	11
3.2. Sensores	11
3.2.1. Sensores de radiação solar	11
3.2.1.1. Fotoresistência	11
3.2.1.2. Fotodíodo	12
3.2.2. Sensor de temperatura	13
3.2.2.1. RTD	13
3.2.2.2. Termístor	15
3.2.2.3. Termopar	15
3.2.2.4. Junção p-n	16
3.2.3. Sensores de humidade do ar	17
3.2.3.1. Sensor resistivo e capacitivo	17
3.2.4. Sensor de humidade do solo	18
3.2.4.1. Sensor capacitivo	18
3.2.4.2. Tensímetro	19

3.2.5. Sensor de CO2	20
4. Redes de Comunicação	21
4.1. ZigBee	21
4.1.1. Hierarquia ZigBee	21
4.1.2. Topologia de rede	22
4.1.3. Modos de operação da rede	23
4.1.4. Formação de Rede	24
4.1.5. A arquitectura protocolar ZigBee / IEEE 802.15.4	24
4.1.6. Transferência de dados Formato de um pacote de dados	25
5. Design e implementação	27
5.1. Arquitectura Proposta	28
5.2. <i>Hardware</i>	29
5.2.1. Microcontrolador	29
5.2.2. Sensores	29
5.2.2.1. Sensor de temperatura e humidade do ar	30
5.2.2.2. Sensor de humidade do solo (superfície)	32
5.2.2.3. Sensor de humidade de profundidade ajustável	32
5.2.2.4. Sensor de luminosidade	34
5.2.2.5. Sensor de pressão atmosférica	35
5.2.2.6. Sensor de Temperatura do solo	36
5.2.2.7. Pluviómetro e anemómetro	37
5.2.3. Módulos de comunicação	38
5.2.3.1. Ethernet	39
5.2.3.2. ZigBee	39
5.2.4. Actuadores	40
5.2.4.1. Relés	40
5.2.5. Custos	40
5.2.5.1. Servidor	40
5.2.5.2. Nó coordenador	41
5.2.5.3. Nó <i>end-device</i>	41
5.3. Software	42
5.3.1. Servidor	42
5.3.2. Nó coordenador	43
5.3.3. Nó <i>end-device</i>	47
6. Resultados Experimentais e discussões	49
6.1. Teste 1	49
6.1.1. Procedimento experimental	49
6.1.2. Gráficos	50

6.1.3. Discussão de resultados	51
6.2. Teste 2	52
6.2.1. Procedimento experimental	52
6.2.2. Gráficos	54
6.2.3. Discussão de resultados	55
7. Conclusões finais e trabalho futuro	57
Bibliografia	59
A. Anexos	63
A.1. Fotografias do <i>CropSupervisor</i>	63
A.2. Fotografias da evolução do Teste 2	63
A.3. <i>CropSupervisor</i>	64

Lista de Acrónimos

AC	Alternating Current
ADC	Analog-to-digital converter
AES	Advanced Encryption Standard
AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
AP	Agricultura de Precisão
API	Application Programming Interface
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance
DC	Direct current
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
E2PROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FFD	Full Function Device
GSM	Global System for Mobile Communications
I2C	Inter-Integrated Circuit
ID	Identification
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INE	Instituto Nacional de Estatística
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISR	Instituto de Sistemas e Robótica
LDR	light dependent resistor
LQI	Link Quality Indication
MAC	Media Access Control

NTC Negative Temperature Coefficient
PTC Positive temperature coefficient,
RED Receiver Energy Detection
RF Rádio Frequência
RFD Reduced Function Device
RH Relative Humidity
RTD's resistance temperature detectors
SAP Service Access Point
Sd Secure Digital
SPI System Packet Interface
TCP Transmission Control Protocol
TDR Time Domain Reflectometer
UC Universidade de Coimbra
UDP User Datagram Protocol
WSN Wireless Sensor Network
ZC Zigbee Coordenador
ZED ZigBee End Device
ZR ZigBee Router

Lista de Figuras

3.1. Espectro electromagnético	9
3.2. Esquema de uma fotoresistência	12
3.3. Características, corrente/irradiação e tensão irradiação	13
3.4. RTD, Resistência vs Temperatura	14
3.5. Termistor, Resistência vs Temperatura	15
3.6. Circuito de condicionamento de sinal para uma resistência PT100	16
3.7. Sensor de humidade do ar capacitivo da <i>Sensirion</i>	18
3.8. Sensor de humidade do solo capacitivo	18
3.9. Tensímetro electrónico da <i>Irrrometer</i>	19
3.10. Esquema de sensor químico	20
4.1. Hierarquia ZigBee	22
4.2. Representação gráfica da topologia da rede ZigBee	23
4.3. Camada protocolar ZigBee	24
4.4. Trama de um pacote ZigBee	25
5.1. Arquitectura proposta para o sistema	28
5.2. Microcontrolador <i>Arduino Mega</i>	29
5.3. Esquema de ligação do sensor DHT11	31
5.4. Esquema de ligação do sensor de humidade do solo	32
5.5. Exemplo do sensor Watermark	33
5.6. Esquema de Ligação do sensor <i>Watermark 200SS</i>	33
5.7. Esquema de ligação do sensor BH1750	34
5.8. Esquema ligação do sensor BMP085	35
5.9. Esquema ligação do sensor Lm35	36
5.10. Encapsulamento do sensor Lm35	37
5.11. Imagem do pluviómetro e anemómetro	37
5.12. Módulo XBee série 2	39
5.13. Formato do pacote de rede a receber pelo servidor	43
5.14. Fluxograma de funcionamento do nó coordenador	44
5.15. Formato do pacote inicial	45
5.16. Formato da mensagem a envia para nó end-device	45
5.17. Pacote para leitura do valor do sensor	46

5.18. Pacote enviado pelo nó end-device	46
5.19. Fluxograma de funcionamento do nó end-device	47
5.20. Acesso remoto ao interface gráfico	48
6.1. Fotos da implementação do trabalho experimental	49
6.2. <i>CropSupervisor</i> instalado em vaso com <i>Disa Uniflora</i>	50
6.3. Temperatura e tensão do solo no sistema tradicional	51
6.4. Temperatura e tensão do solo usando <i>CropSupervisor</i>	52
6.5. Floreiras com ambos os sistemas instalados	53
6.6. Tempo e débito de irrigação do sistema tradicional	54
6.7. Tempo e débito de irrigação do <i>CropSupervisor</i>	55
6.8. Gráfico do fluxo luminoso durante 4 dias em lux	56
A.1. Fotos do <i>CropSupervisor</i>	63
A.2. Fotos da evolução do teste 2 (esquerda dia 1 e direita dia 2)	63
A.3. Fotos da evolução do teste 2 (esquerda dia 4 e direita dia 6)	64
A.4. Fotos da evolução do teste 2 (dia 8)	64
A.5. Logótipo <i>CropSupervisor</i>	64

Lista de Tabelas

3.1.	Parâmetros de variação em função dos materiais	14
3.2.	Características das RTD	14
3.3.	Características do termistor	16
3.4.	Termopar, características	17
5.1.	Características do Sensor DTH11	30
5.2.	Consumo de energia do sensor DHT11	31
5.3.	Características do sensor de humidade do solo	32
5.4.	Características do sensor BH1750	35
5.5.	Características do sensor BMP085	36
5.6.	Tabela de custos dos componentes do nó coordenador	41
5.7.	Tabela de custos dos componentes dos nós <i>end-device</i>	42
6.1.	Tempo e débito de irrigação do sistema tradicional	51
6.2.	Tempo e débito de irrigação do <i>CropSupervisor</i>	52
6.3.	Tempo e débito de irrigação do sistema tradicional	54
6.4.	Tempo e débito de irrigação do <i>CropSupervisor</i>	56
A.1.	Características do <i>CropSupervisor</i>	65

1. Introdução

Neste capítulo é feito o enquadramento teórico desta dissertação. Para além disto, são apresentados os objectivos a atingir e motivações que levaram à elaboração desta dissertação. Sendo também efectuada a apresentação da estrutura.

1.1. Motivação

A população mundial tem vindo a aumentar significativamente sendo esperado um aumento de 30% da população actual, passando dos actuais 7 mil milhões para 9,1 mil milhões em 2050. Face a este aumento de população a produção de alimentos tem que aumentar em 70% para fazer face a procura. Este aumento exponencial da população, área urbana e as restrições ao aumento das superfícies aráveis leva cada vez mais os sistemas de gestão agrícola a procurar soluções mais eficientes com o objectivo de aumentar a produção e rentabilidade das colheitas, racionalizar os recursos naturais disponíveis e diminuir o impacte ambiental. [Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012]

O conceito de gestão da produção agrícola, também denominada por agricultura de precisão (AP), introduzido em meados dos anos 80, tem gerado grande revolução na gestão dos recursos. Este conceito tem como principal característica o uso intensivo da tecnologia para monitorização do desenvolvimento das plantas, solo e condições ambientais a que foram sujeitas durante a produção.

Actualmente temos ao nosso dispor tecnologia capaz de ajudar no aumento da produtividade, contribuindo assim para métodos de produção cada vez mais eficientes. A monitorização em tempo real das características do solo e condições climatéricas revelaram-se primordiais para a gestão agrícola, diminuindo os custos de produção e racionalização dos recursos naturais disponíveis. Este tipo de monitorização permite recolher dados de múltiplas fontes sensoriais, sendo que com base em dados científicos o sistema efectua a interpretação e análise dos dados para tomar possíveis decisões.

Estamos cada vez mais a assistir à introdução das novas tecnologias para aumentar a produção. As redes sensoriais sem fios (WSN) fazem parte dessas tecnologias introduzidas, o seu uso tem vindo a aumentar nas mais diversificadas áreas, sendo o principal factor a monitorização constante de parâmetros através dos sensores espalhados pelo meio a monitorizar, por exemplo de estruturas civis (pontes, edifícios), poluição ambiental, ambientes

controlados, entre outros aspectos. Estes sensores remotos são capazes de detectar e transmitir propriedades físicas (humidade, temperatura, radiação solar, vibração, concentração de gases) para um nó central actuando como *feedback* do sistema principal.

1.2. Objectivos

Os componentes electrónicos encontram-se cada vez mais baratos e versáteis, sendo possível desenvolver novos módulos capazes de ajudar na agricultura de precisão e outros sistemas que usem redes sensoriais. A grande diversidade de sensores, microcontroladores, módulos sem fios entre outros componentes existentes no mercado, motivou o desenvolvimento de nós sensoriais sem fios para efectuar medidas de parâmetros importantes para as culturas como, por exemplo nó de irrigação automático capaz de actuar as válvulas em função dos parâmetros adquiridos pelos nó.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** Análise do trabalho já desenvolvido nesta área, expondo os problemas encontrados e as melhores soluções existentes.
- **Capítulo 3:** Descrição das variáveis importantes para as culturas e sensores disponíveis para monitorizar esses parâmetros.
- **Capítulo 4:** Apresentação do funcionamento da rede Zigbee.
- **Capítulo 5:** Descrição da implementação prática do projecto.
- **Capítulo 6:** Análise aos dados obtidos e avaliação do sistema projectado.
- **Capítulo 7:** Conclusões finais e melhorias propostas para trabalho futuro.

2. Revisão da literatura

Hoje em dia existem sistemas capazes de adquirir e analisar diversos parâmetros do solo (temperatura, humidade, Ph entre outros) em simultâneo e transmitir essa informação para outros sistemas utilizando comunicação baseada em radio frequência. Este tipo de sistemas, na área da agricultura de precisão, tem evoluído de uma forma lenta quando comparada com a evolução apresentada em outras tecnologias orientadas à agricultura. A falta de um sistema preciso de decisão em tempo real tem sido um dos grandes obstáculos para este atraso [McBratney et al., 2005].

Em Portugal a agricultura de precisão encontra-se pouco divulgada, constatando-se, segundo dados do INE, o abandono do cultivo de uma em cada quatro explorações agrícolas num período de dez anos. Este abandono é notório em unidades produtivas com menos de um hectare e, por outro lado, para explorações com mais de 50 hectares de área agrícola utilizável este abandono é contrariado com um aumento de 4%. Segundo os mesmos dados, o perfil do produtor português é caracterizado como sendo o de um homem tipo, com uma idade média de 63 anos, com um nível de qualificação igual ao 1º ciclo do ensino básico e apresenta uma formação agrícola maioritariamente de índole prática. Este perfil tem vindo a sofrer algumas alterações nos últimos 10 anos. Os produtores agrícolas envelheceram 4 anos, tendo 48% uma idade superior a 65 anos, a nível de escolaridade a percentagem de produtores com níveis completos de ensino superiores ao 1º ciclo subiu de 15% para 25%. Apesar desta melhoria, mais de metade dos produtores agrícolas apenas completou o 1º ciclo do ensino básico (52%). Também na formação agrícola se assistiu a uma ligeira melhoria, ao aumento do número de produtores que frequentaram cursos de formação profissional relacionados com a actividade agrícola, mas a esmagadora maioria dos produtores possui formação agrícola exclusivamente prática (89%) [Agr, 2010]. Perante estes dados facilmente se compreende o porquê de em Portugal a agricultura de precisão se encontrar pouco divulgada. Outra das causas que levam a uma lenta adopção é o elevado custo associado a compra e instalação de novas tecnologias e também a sua complexidade, só fazendo sentido a sua utilização caso os benefícios económicos sejam superiores aos investimentos necessários. Desta forma, a fim de melhor aproveitar os investimentos é fulcral a existência de pessoas com os conhecimentos necessários para ajustar e ajudar a desenvolver estas tecnologias [de Portugal,].

Graças à agricultura de precisão, investigações agronómicas, hidrológicas e ecológicas entre outras, tem evoluído a monitorização das características do solo [Plant, 2001] [Zhang et al., 2002] [Korduan et al., 2004] e um grande número de produtos, sistemas e dispo-

sitivos tem sido lançados para o mercado com o objectivo de aumentar a rentabilidade da produção agrícola, melhorar a qualidade do produto [Ash et al., 2010] e diminuir o impacto ambiental [Chel and Kaushik, 2011].

A monitorização do solo gera grandes quantidades de dados causando dificuldades de interpretação, compreensão das variabilidades e capacidade de propor estratégias para gerir esses dados. Depois de analisados e interpretados os dados é possível obter informação útil para a tomada de decisões.

Principais problemas encontrados pelos diferentes autores [Adrian et al., 2005, Pedersen et al., 2004, Morvan et al., 2008, Murakami et al., 2007, Maohua, 2001, Robert, 2002, Wang et al., 2007]:

- Os sistemas desenvolvidos não atendem as necessidades específicas do agricultor (tomada de decisões e gestão de dados);
- Interfaces complexos e pouco personalizáveis para atender a todos os perfis de utilizador requerem grande esforço de aprendizagem para o utilizador;
- Não permitem controlo total dos parâmetros para utilizadores mais experientes;
- Software fechado, não integráveis com outros sistemas;
- Soluções com custos elevados;

As WSN têm vindo a ganhar destaque na agricultura de precisão, permitindo a aquisição de dados de forma contínua e a disponibilização desses mesmos dados com um grau de fiabilidade elevado, e assim permitindo a tomada de decisões por parte de um utilizador. O tipo de dados a serem recolhidos pelos sensores varia em função da aplicação final, todavia na infra-estrutura da rede, algumas características comuns são fundamentais. Os eles executam operações simples de envio de dados periodicamente, demorando o menor tempo possível, entrando no modo de baixo consumo de energia, estado este que corresponde a mais de 90% do tempo de operação. Existem arquitecturas diferentes para este tipo de redes, na grande maioria partilham quatro elementos básicos, microcontrolador, conjunto de sensores, módulos para transmissão e recepção de dados por RF e memória não volátil existem diversos factores para a escolha destes elementos.

Por ser uma área nova de pesquisa não existe uma taxonomia definida. Muitos projectos de monitorizações que têm sido feitos partilham algumas características em comum. O autor [Tilak et al., 2002] trata de organizar alguns pontos fundamentais, definindo uma taxonomia básica. Os sistemas são constituídos por 3 elementos: sensores, observador e evento. O sensor é o dispositivo que monitoriza, não sendo definido apenas pelo sensor, mas sim pelo nó sensorial (conjunto). O observador é o utilizador, o evento é o acontecimento que o observador tem interesse em monitorizar. O dispositivo através do qual o utilizador monitoriza a rede não é definido de forma específica na referência. Nos trabalhos publicados existe normalmente um dispositivo na rede que recolhe todos os dados da rede. A arquitectura da rede de sensores pode ser dividida em três níveis: infra-estrutura, protocolo da rede e aplicação. A infra-estrutura são os sensores em si e sua estratégia

de utilização. O protocolo de rede é responsável por construir os caminhos entre sensores e observador. A aplicação reflecte o interesse do observador, podendo ser traduzido em requisições de informação. As redes podem ainda ter diferentes estratégias de entrega dos dados para o observador. A entrega de dados é contínua quando os dados são enviados em intervalos contínuos, como resposta a um determinado evento (*event-driven*), pode também ser solicitada pelo observador. Existe ainda a possibilidade de uma solução híbrida.

Esta taxonomia básica proposta possui limitações, mas desde sua publicação em 2002 já foi citada em diversos trabalhos não existindo até agora uma proposta mais completa. Não é uma taxonomia completa como existente em assuntos correlatos [Doebelin, 2003], mas para o objectivo deste trabalho considera-se que esta taxonomia básica atende às necessidades.

Dependendo do tipo de aplicação e variáveis a monitorizar, o período de amostragem pode variar. É interessante que este tempo possa ser ajustado conforme a aplicação. Existem eventos agronómicos bastante lentos comparados com os intervalos de tempo disponíveis em electrónica. Intervalos mínimos na ordem de um minuto são taxas suficientemente elevadas. Para taxas de aquisição mais baixas implica grandezas na ordem de um dia. Os dados recolhidos pelos sensores devem estar disponíveis para análise num ponto central, apresentando-se o servidor como a melhor solução, sendo exequível aceder aos dados através de qualquer ligação á rede WEB [Wang et al., 2006]. Os dados recolhidos são usados em momentos específicos para tomar decisões. É importante que os nós sensoriais para recolha de dados não necessitem de manutenção extra para o agricultor (evitando incrementos aos custos de produção). A instalação da rede sensorial deve ser simples, visto que a grande maioria dos trabalhadores do meio rural não dispõem de conhecimentos da área de electrónica nem informática (quando possuem são básicas), devem ser evitadas configurações extra. Para as aplicações de agricultura de precisão, é importante que os dados recolhidos possuam uma correspondência espacial, devendo existir uma correlação entre os dados provenientes de um sensor e sua localização.

A monitorização e controlo de estruturas agrícolas não estão limitados por factores considerados críticos. Alguns autores apontam a falta de parâmetros de confiabilidade (qualidade de serviço) e segurança como pontos que limitam a divulgação e generalização deste tipo de tecnologia. A qualidade de serviço não é crítica na agricultura a ocorrência de um erro nos dados recebidos ou perda de sinal dos módulos não leva à destruição da cultura a monitorizar. Podem apenas ocorrer pequenos danos caso não seja detectado atempadamente esse erro. A informação disponibilizada na rede apenas tem interesse para o proprietário, caso seja acedida por terceiros, não causa prejuízos ao proprietário. A criação de redes seguras (utilização de módulos Zigbee) requer custos mais elevados para o agricultor [Henares, 2007].

O projecto desenvolvido em [Patil et al., 2011] para optimizar o uso de água representa uma solução de baixo custo. O autor faz uso de um microcontrolador (ATMEL AT 89s52)

para fazer o processamento de dados, recorrendo a dois eléctrodos para medir a humidade do solo (sensor resistivo), um relé para controlo da electroválvula, o envio de dados para o computador é efectuada por RS-232. Esta solução destaca-se pelo baixo custo, o sensor de humidade apresenta pouca fiabilidade não sendo compensada a humidade do solo em função da temperatura. Faz uso de um computador permanentemente ligado para receber e visualizar os dados, representa um consumo de energia elevado. Apresenta como proposta de trabalho futuro a introdução de redes sem fios para envio e recepção de dados.

A solução apresentada em [Fisher, 2012] representa também uma solução de baixo custo. Com destaque por utilizar hardware *Open-Source*. É uma solução robusta para monitorização do solo, com as seguintes características, um microcontrolador para processamento de dados (ATmega328) vendido como kit de desenvolvimento *Arduino*, três sensores *watermark* para medir a humidade do solo, um sensor de temperatura. O sensor de temperatura monitoriza a temperatura do solo, parâmetro usado para compensar o erro do sensor de humidade do solo. O shield Sd funciona como *datalogger* para guardar os dados localmente. A solução apresentada carece por não dispor de interface para o utilizador poder visualizar os parâmetros do solo em tempo real, servindo apenas como *datalogger*, o sistema é alimentado por bateria. O autor apresentou uma solução para medir o nível de água em reservatórios, sendo útil para sistema de micro-rega ou gota a gota, registando os consumos de água pelo nível de água restante.

Na FCTUC foi desenvolvido um projecto para automação de estufas agrícolas estando um pouco desactualizado com a tecnologia hoje existente, constituído por um sistema SCADA, efectuava a monitorização constantemente da temperatura do ar dentro da estufa. Os dados eram enviados para o computador pela comunicação de dados RS-232, o valor pretendido para a temperatura era ajustado em função da cultura seleccionada no interface gráfico disponível no computador.

Na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro [Simões, 2007] também foi desenvolvido um projecto para monitorização de estufas, parte desse projecto (hardware/software) desenvolvido pelo Grupo de Processamento Sinal e Biotelemetria no âmbito de um projecto denominado *Wireless-Farm* aprovado e financiado pelo Plano Inovação 2006 pela PT Inovação, não sendo revelado a implementação usada para monitorização.

O projecto MPWiNodeZ [Morais et al., 2008] apresenta uma solução para a viticultura de precisão na região do Douro [Morais et al., 2008]. Neste projecto foi desenvolvida uma arquitectura (software e hardware) para satisfazer as condições a monitorizar. A plataforma inclui um sistema de gestão de energia capaz de alimentar as baterias, a transmissão de dados é assegurada pela rede sem fios (ZigBee). Os testes apresentados demonstram o bom funcionamento do sistema, a nível da gestão de energia como do funcionamento geral do sistema.

Existem mais trabalhos desenvolvidos como descritos. Cada autor apresenta uma proposta de arquitectura [López et al., 2010] [Wang et al., 2006] [Xiao and Guo, 2010] [Jiber et al.,

2011] [Anurag, 2008], as propostas mais recentes têm em conta a segurança da rede (adopção de ZigBee). Sensores mais recentes permitem diminuir o consumo de energia. Para o projecto a implementar vamos adoptar uma arquitectura semelhante.

A escolha dos sensores para medir a humidade do solo varia em função dos objectivos que cada autor propõe para o projecto, várias empresas como a *Delta-T Devices* (Reino Unido), a *Netafim* (Israel), *Decagon* (EUA) e *Besta* (EUA) começaram a disponibilizar para o mercado sistemas e componentes (incluindo sensores sem fio) para sistemas de irrigação. Como descrito anteriormente este tipo de equipamento é caro, o preço para sensores sem fio varia entre 100€ a 350€ por nó, o preço por sensor de humidade varia entre 50€ a 800€. Alguns sensores apresentam um consumo de energia demasiado elevado, o uso de energia solar como auxílio ao sistema de baterias nem sempre é possível devido ao sol ser bloqueado pelas folhagens das culturas.

Diferentes tipos de sensores para medir a humidade do solo têm aparecido ao longo do tempo, na grande maioria dos projectos nesta área os sensores utilizados são de condutividade eléctrica do solo (soluções de menor consumo energético e custo), os solos com baixo teor de humidade apresentam resistência eléctrica elevada, na bibliografia [He et al., 2011, Fisher, 2012, Thompson et al., 2005] o sensor *Watermak 200ss* da *Irrrometer* representa a melhor alternativa para medir a condutividade, tendo sido propostas várias formulas de calibração para este sensor [Allen, 2000, Shock et al., 1998].

Outros métodos são apresentados para medir a humidade do solo, método gravimétrico, reflectometria no domínio do tempo (TDR), técnica da sonda de neutrões e pulso de calor.

A simplicidade e precisão do método gravimétrico são as suas principais vantagens sendo por isso uma boa opção para medir o teor de água do solo junto as raízes das plantas. Infelizmente o método é demorado e destrutivo não podendo ser automatizado. A técnica do TDR faz medições precisas do teor de água no solo, uma vantagem em relação ao método gravimétrico e que permite medições automatizadas e não destrutivas, a desvantagem é que requer calibração para solos enriquecidos com matéria orgânica. O uso desta técnica é complexo e requer instrumentos de custo elevado. A técnica da sonda de neutrões é um método credível e simples de usar contudo só pode ser usada a uma profundidade mínima da superfície os neutrões escapam para a atmosfera. As sondas baseadas no método do pulso de calor estão a advir como sensores para medir simultaneamente o teor de água no solo, propriedades térmicas e condutividade eléctrica do solo. Apesar de terem sido testadas tanto em laboratório como no campo, apresentam limitações que as descartam de serem dispositivos de âmbito comercial. Limitações como o recurso ao *data logger* para a aquisição de dados, alimentação do sistema e uso de cablagem restringe estes dispositivos ao uso pontual e não de uma forma massiva. Na agricultura de precisão é exigido cada vez mais evolução da tecnologia, aplicação de dispositivos de baixo custo, dimensões reduzidas e versáteis.

3. Monitorização de explorações agrícolas

3.1. Variáveis a monitorizar

Algumas variáveis existentes no nosso planeta fazem sentido serem monitorizadas para aumentar a produção agrícola. Vamos proceder a descrição das variáveis mais importantes e posteriormente apresentar os sensores capazes de as monitorizar.

3.1.1. Radiação solar

A fotossíntese é um dos processos mais importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas, toda a energia necessária para a realização da fotossíntese é proveniente da radiação solar. Este processo consiste na conversão de matéria mineral em matéria orgânica, sendo similarmente imprescindível nos diferentes ecossistemas pela libertação de oxigénio e fixação de carbono atmosférico. A radiação solar é absorvida pelos diferentes tipos de pigmentos fotossintéticos, pigmentos estes que são constituídos por estruturas diversas permitindo assim captar diferentes radiações em diferentes comprimentos de onda. Os comprimentos de onda mais eficientes para a fotossíntese são absorvidos pelos pigmentos na faixa vermelho a laranja e azul a violeta do espectro electromagnético.

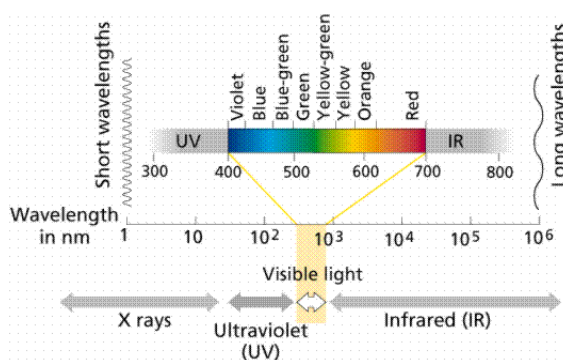


Figura 3.1.: Espectro electromagnético

3.1.2. Temperatura do ar

A temperatura a que se encontra o ar tem influência na actividade fotossintética e no processo de evapotranspiração das plantas, os factores que ajudam a elevar a temperatura são a radiação solar absorvida pela atmosfera e o calor emitido pelas superfícies cultivadas. O processo fotossintético envolve reacções químicas, sendo as enzimas os principais catalisadores dessas reacções que dependem da temperatura para atingir a actividade máxima.

3.1.3. Temperatura do solo

A temperatura do solo influencia todos os processos físicos e biológicos do solo, o armazenamento e transferência de calor depende das características térmicas do solo, sendo também influenciado pelas condições meteorológicas. A capacidade de um solo armazenar calor junto à superfície influencia a evapotranspiração. As transferências de calor podem ocorrer por condução ou convecção. A convecção ocorre através de fluidos em movimento sendo um processo importante na transferência de calor em solos húmidos.

3.1.4. Humidade do ar

A humidade do ar é a quantidade de vapor de água existente na atmosfera. Este parâmetro apresenta valores variáveis mas de grande importância para a formação de fenómenos meteorológicos (formação de nuvens, nevoeiro, neblina, precipitação, orvalho, entre outros). Dependendo do valor da temperatura, existe um valor limite para a quantidade de vapor de água na atmosfera quando atingimos esse valor o ar fica saturado. Para exprimir a humidade do ar são usados os seguintes parâmetros, humidade relativa e temperatura do ponto de orvalho.

A temperatura do ponto de orvalho é a temperatura para a qual uma porção de ar deve ser arrefecida (a pressão constante) até ficar saturada. Quanto mais próxima a temperatura do ar estiver da temperatura do ponto de orvalho, mais próximo está o ar de atingir o ponto de saturação.

A humidade relativa mede a quantidade de vapor de água que existe no ar em relação ao máximo que o ar poderia conter à mesma temperatura. Depende não só da quantidade de vapor de água contida no ar, mas também da temperatura deste.

Para as plantas a humidade do ar é um parâmetro importante. Dependendo do tipo de plantas todas elas necessitam de um valor mínimo de humidade. O excesso de humidade nas plantas provoca o aparecimento de fungos e doenças, este factor não é possível de controlar em ambientes ao ar livre mas poderá efectuar-se a sua parametrização para controlar doenças e fungos.

3.1.5. Humidade no solo

A humidade no solo consiste na quantidade de água que é mantida dentro dos poros do solo. Quando os poros estão completamente tapados temos o solo saturado, na situação oposta temos o solo não saturado. Os solos não saturados conseguem armazenar alguma quantidade de água sendo parte dessa água usada pelas plantas. O teor de água no solo passa por vários processos importantes, infiltração, redistribuição e evaporação.

A infiltração é o processo de penetração de água no solo, a velocidade de penetração depende das condições do solo. Este parâmetro é importante no estudo da irrigação e conservação de água no solo.

A evaporação de água no solo constitui um importante parâmetro no ciclo hidrológico. A evaporação à superfície é indesejada na agricultura devendo adoptar-se medidas para evitar essas perdas.

Nos sistemas de irrigação o teor de água no solo é o principal parâmetro de medida, o correcto controlo da irrigação previne doenças e custos associados aos tratamentos das mesmas.

3.2. Sensores

Um sensor é um dispositivo que recebe um estímulo (quantidade, propriedade ou condição), que é convertido em sinal eléctrico. O sinal de saída pode ser canalizado, amplificado e modificado por dispositivos electrónicos adequados. Pode apresentar-se na forma de diferença de potencial, corrente ou carga eléctrica, o sinal pode ser descrito em termos de amplitude, frequência e fase sendo estas designadas por formato de sinal saída. Vamos proceder a descrição dos sensores existentes para monitorizar as variáveis apresentadas anteriormente.

3.2.1. Sensores de radiação solar

A monitorização dos valores de radiação solar a que as plantas estão sujeitas é fundamental dado que esta variável influencia o seu desenvolvimento. O excesso de radiação leva a queimaduras nas plantas e níveis baixo de radiação a baixos níveis de desenvolvimento das plantas. No mercado existem diferentes tipos de sensores de radiação.

3.2.1.1. Fotoresistência

A fotoresistência ou célula fotocondutora, também conhecidas por LDR ('Light Dependent Resistor') são dispositivos resistivos caracterizados pela variação da sua resistência quando sujeitos a um fluxo incidente. O mecanismo de funcionamento apoia-se na fotocondução,

resultante de um efeito fotoelétrico interno: libertação de cargas eléctricas no material fotocondutor sobe a influência da radiação incidente com o correspondente aumento da sua condutividade. Os materiais utilizados para a construção de LDR's são variados, dependendo da resposta espectral desejada para o dispositivo. O material mais comum é o sulfeto de cádmio que exibe uma forte resposta fotocondutora perto da sensibilidade do olho humano. A relação entre a resistência e a iluminação é dada por:

$$R_{LDR} = \alpha \times E^{-1} \quad (3.1)$$

Onde R_{LDR} é a resistência do dispositivo, E é a irradiação solar, e α é uma constante que depende do material usado.

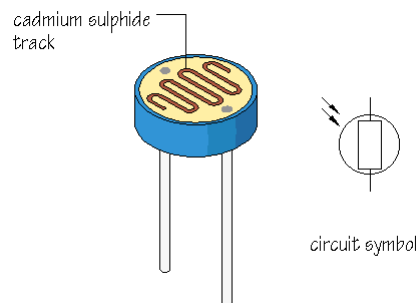


Figura 3.2.: Esquema de uma fotoresistência

A fotoresistência apresenta uma relação exponencial entre a resistência e radiação incidente, têm uma resposta elevada, são bastante sensíveis a temperatura, as suas características são alteradas ao longo do tempo e apresentam uma grande variação da sua resistência.

3.2.1.2. Fotodíodo

O fotodíodo podem ser classificado como fotocondutor mas apresenta um desempenho e funcionamento diferente. O fotodíodo pode operar em dois modos: modo condutivo ou modo fotovoltaico. Quando a junção p-n de um fotodíodo é inversamente polarizada, o fotodíodo opera no modo fotocondutor comportando-se como uma fonte de corrente controlada pelo fluxo incidente na junção, apresentando uma relação quase linear entre o fluxo incidente e a foto-corrente gerada. Em situações de ausência de luminosidade existe uma corrente de fugas que é independente da tensão inversa aplicada. O seu aparecimento é devido à geração térmica dos portadores de carga.

Quando não existe qualquer polarização externa, o fotodíodo opera no modo fotovoltaico apresentando nos seus terminais uma tensão proporcional ao fluxo incidente na sua junção.

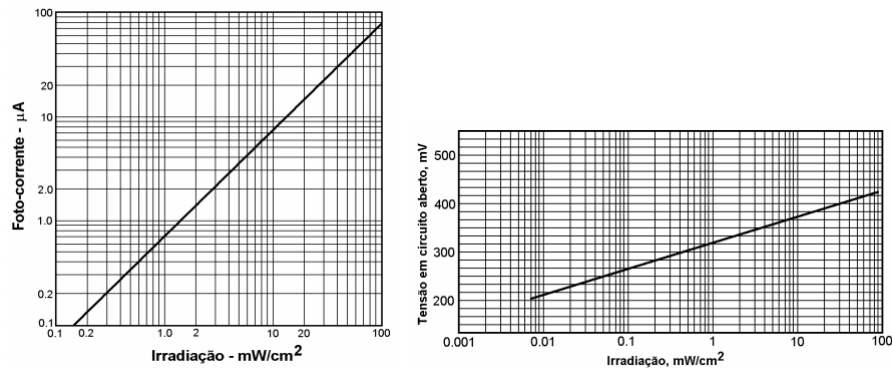


Figura 3.3.: Características, corrente/irradiação e tensão irradiação

Os fotodíodos são robustos, de pequenas dimensões e apresentam uma resposta linear face ao fluxo incidente sendo o seu custo barato. A sensibilidade espectral de um fotodíodo depende do material semiconductor utilizado no seu fabrico.

3.2.2. Sensor de temperatura

No mercado actual temos ao nosso dispor diferentes tipos de sensores de temperatura, os mais comuns são os RTD's, termopares, termístor e circuitos integrados. A escolha do tipo de sensor depende de alguns parâmetros: faixa de temperatura, precisão, linearidade, custos e circuito de suporte tendo em conta a aplicação que vamos dar ao sensor.

3.2.2.1. RTD

A RTD é um sensor que relaciona o valor do seu elemento resistivo com a temperatura. Existem metais com coeficientes resistivos bem definidos sendo o valor positivo.

A resistência dos materiais condutores pode ser expressa em função da temperatura pela seguinte relação:

$$R_t = R_{ref} (1 + \alpha \Delta t) \quad (3.2)$$

Pela análise da expressão anterior R_{ref} corresponde à resistência à temperatura ambiente (normalmente a 0°C), R_t ao valor da resistência a temperatura t , α ao coeficiente de temperatura e Δt corresponde à diferença entre o valor da temperatura obtido e a temperatura de referência.

Material	Gama de temperatura (°C)	Coefficiente de temperatura (@ 25°C)
Platina	-200 ... +850	0.39 %/°C
Níquel	-80 ... +320	0.67 %/°C
Cobre	-200 ... +260	0.38 %/°C
Níquel/Ferro	-200 ... +260	0.46 %/°C

Tabela 3.1.: Parâmetros de variação em função dos materiais

O elemento resistivo é feito a partir de materiais nobres que apresentam uma resistência única repetível, sendo o seu valor previsível em função da temperatura. Os elementos mais comuns são o cobre, platina e níquel.

Através da análise da tabela 3.1 podemos verificar que a platina é o componente que mais se destaca, é também conhecida como o *standard* para sensores de temperatura sendo usada para calibrar os restantes sensores. A platina apresenta a melhor característica de repetibilidade e precisão, a sua não linearidade pode ser corrigida com recurso a um circuito de linearização ou utilizando uma tabela.

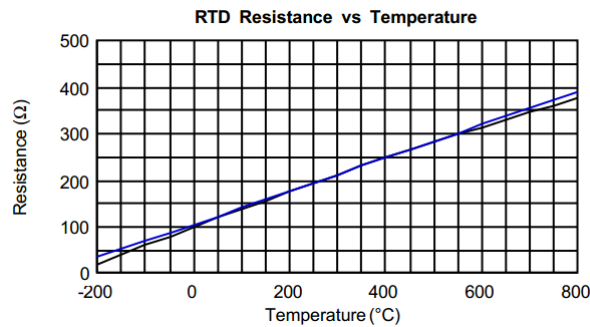


Figura 3.4.: RTD, Resistência vs Temperatura

Vantagens	Desvantagens ou limitações
<ul style="list-style-type: none"> - Precisão ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) - Repetibilidade ($\pm 0.05^{\circ}\text{C}$) - Estabilidade a longo prazo (0.1%/5anos) - Elevada reprodutibilidade - Tamanho reduzido - Elevada estabilidade - Compensação não necessária 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo - Robustez limitada - Baixa variação da resistência com a temperatura - Fonte de corrente necessária - Erros de auto-aquecimento - Compensação dos fios de ligação

Tabela 3.2.: Características das RTD

3.2.2.2. Termístor

O termístor é um sensor constituído por uma resistência cuja resistividade varia com a temperatura, esta variação é não linear. A maioria dos termístores tem elevada resistividade e elevado coeficiente de temperatura negativo (NTC), quando a variação da temperatura é positiva o valor da resistência do termístor diminui.

Existem também termístores com o coeficiente de temperatura positivo (PTC), designada por termístor de comutação devido à sua característica temperatura vs resistência única. Verificamos que para as PTC mantém o valor da resistência constante até atingir a temperatura de comutação, após atingir esse valor a resistência sofre aumentos consideráveis. Na figura 3.5 podemos verificar as diferenças entre as PTC, NTC e PT100.

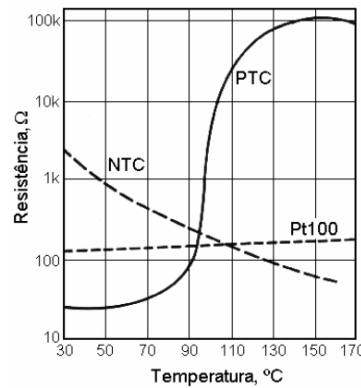


Figura 3.5.: Termístor, Resistência vs Temperatura

A relação entre a resistência vs temperatura é expressa por:

$$R_t = R_{ref} \times \epsilon \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (3.3)$$

Da expressão anterior T_{ref} corresponde à temperatura de referência, R_{ref} à resistência de referência, R_t à resistência à temperatura T, β à constante especificada pelo fabricante e varia pouco com a temperatura.

3.2.2.3. Termopar

O sensor de temperatura termopar consiste na junção de dois fios metálicos diferentes, quando submetemos essa junção a um aumento de temperatura gera-se uma pequena tensão termodinâmica nos terminais, o valor da tensão é directamente proporcional ao

Vantagens	Desvantagens ou Limitações
Elevada sensibilidade	Altamente não-linear
Rápido - baixa constante de tempo	Gama de temperatura limitada (-30°C a +160°C)
Ligações por dois fios	Alguma fragilidade
Grande variedade de modelos	Fonte de corrente necessária
	Erros de auto-aquecimento
	Requer calibração

Tabela 3.3.: Características do termistor

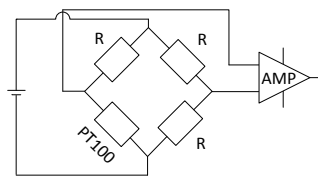


Figura 3.6.: Circuito de condicionamento de sinal para uma resistência PT100

aumento de temperatura denominando-se este efeito de *seedbeck*. A relação temperatura-tensão é não linear para compensar este problema existem circuitos dedicados que fazem essa compensação.

Um dos grandes inconvenientes do termopar deve-se ao facto de exigir que a temperatura da junção de referência seja perfeitamente conhecida. A existência de incerteza na temperatura de referência causa um erro da mesma ordem sobre a temperatura adquirida. Por outro lado, o termopar funciona como um gerador de força electromotriz, logo não necessita de ser percorrido por uma corrente de alimentação, evitando a ocorrência de erros por auto-aquecimento.

3.2.2.4. Junção p-n

Nos materiais semicondutores os electrões precisam de muito menos energia para passar da banda de valência para a banda de condução. Isto torna este material muito sensível à temperatura; é partindo desta característica que se concebem sensores de temperatura construídos em circuitos integrados (CI). São sensores pequenos e de fácil instalação, não necessitam de qualquer manutenção e a margem de erro é de 1º C. A gama de medição ronda a temperatura ambiente, o que é o ideal para o fim desejado.

Vantagens	Desvantagens ou limitações
Baixo custo	Precisão, geralmente $\pm 4^{\circ}\text{C}$
Robustez	baixa estabilidade (cerca de 0.6°C por ano)
vasta gama de temperaturas	Não linear
Construção simples	Saída na ordem do mV
Não requer excitação	Circuito de condicionamento complexo
Grande variedade de modelos	Requer referencia externa
Resposta rápida	

Tabela 3.4.: Termopar, características

3.2.3. Sensores de humidade do ar

A humidade relativa do ar é um dos factores climatológicos relevantes a ser monitorizado e controlado dado que afecta a taxa de transpiração das plantas e os seus mecanismos de controlo térmico. A humidade relativa elevada promove o aparecimento de doenças por fungos ou mesmo apodrecimento e humidades relativas baixas provocam desidratação das plantas. A humidade relativa expressa o conteúdo de vapor de água do ar sendo a razão entre a pressão atmosférica ambiente (ρ_a) e a pressão do ar saturado existente sobre uma superfície plana de água a mesma temperatura (ρ_s) multiplicado por 100.

$$RH = \frac{\rho_a}{\rho_s} \times 100 \quad (3.4)$$

3.2.3.1. Sensor resistivo e capacitivo

O sensor resistivo utiliza um filme de óxido de alumínio, esta estrutura apresenta poros, que quando preenchida por gotículas de água altera o valor da sua resistência. A variação do valor da resistência eléctrica do material pode ser medida recorrendo a um circuito em ponte. Estes sensores possuem limitações em ambiente onde ocorre formação de condensação, trabalhando apenas para níveis de humidade relativa superior a 20%, não possuem a mesma estabilidade que os sensores do tipo capacitivo. . O método capacitivo baseia-se nas alterações das características do dieléctrico. O dieléctrico utilizado como polímero absorve ou liberta água de forma proporcional à humidade relativa do ar alterando a sua capacitância este valor e medido por um circuito electrónico determinando assim a humidade relativa do ar.

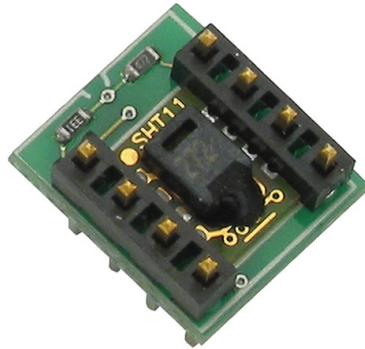


Figura 3.7.: Sensor de humidade do ar capacitivo da *Sensirion*

3.2.4. Sensor de humidade do solo

A humidade do solo é um parâmetro que fornece indicações sobre a quantidade de água disponível para que a planta seja capaz de regular a sua temperatura. Geralmente as plantações são sujeitas a planos de rega pré-estabelecidos não sendo realizada nenhuma monitorização. Os métodos de medida são influenciados por inúmeros factores: textura, porosidade, consistência, permeabilidade e condutividade iónica, sendo alterada na presença de fertilizantes, sendo necessário efectuar a calibração para cada solo a instalar.

3.2.4.1. Sensor capacitivo

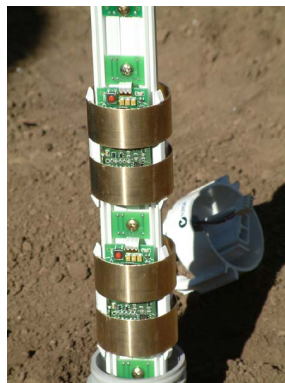


Figura 3.8.: Sensor de humidade do solo capacitivo

Utilizando um condensador de placas paralelas, a sua capacidade é limitada pelas suas dimensões, a área é limitada pela distância entre as duas placas, e pelas propriedades do meio dieléctrico entre as mesmas. Um condensador que possua água como meio dieléctrico entre as placas pode ter uma capacidade que chega a ser 100 vezes maior que a

capacidade de um condensador normal (o meio dieléctrico ser ar ou cerâmicos). Como princípio de funcionamento do sensor vamos utilizar o solo como o meio dieléctrico do condensador, assim as variações de água no solo farão aumentar ou diminuir a capacidade do condensador. Solos húmidos terão uma maior capacidade, solos secos têm uma capacidade mais baixa. A estrutura do condensador utiliza placas complanares assim não é necessário preencher o oco entre as placas do condensador com a mistura do solo. As linhas de campo eléctrico estendem-se para fora das placas até ao dieléctrico de ambos os lados. Os sensores do tipo capacitivo apresentam uma variação quase linear entre as gamas de 5% a 95% RH, mantendo-se operacional mesmo em condições de condensação.

3.2.4.2. Tensímetro

O tensímetro é constituído por um tubo de vidro, um bolbo de cerâmica porosa e uma tampa na qual existe um sensor de pressão. O tubo é cheio de água até um determinado nível e colocado no solo de onde se pretende adquirir as medições.

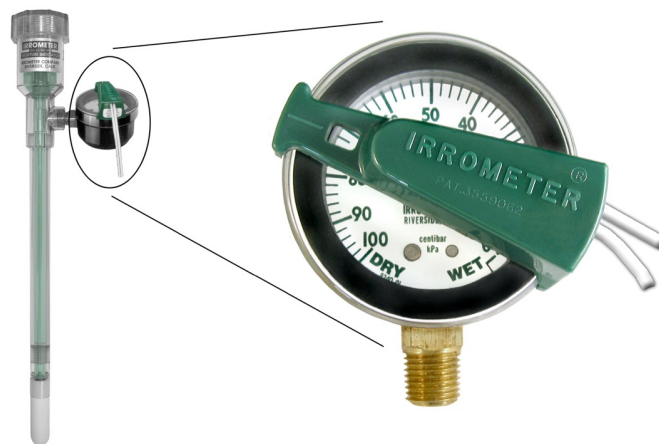


Figura 3.9.: Tensímetro electrónico da *Irrometer*

Este método baseia-se num estado de equilíbrio entre o conteúdo de água do solo e a pressão existente no interior do tubo. Quando a quantidade de água no solo é superior a água existente no bolbo o nível de água aumenta dentro do tubo aumentando também a pressão, quando a quantidade de água no solo é inferior o nível de água diminui e a pressão. As alterações de pressão são registadas pelo sensor de pressão existente na tampa, estas medidas só podem traduzir informações relativas ao conteúdo de água no solo se forem conhecidas as características do solo em questão.

3.2.5. Sensor de CO2

Um simples sensor líquido electroquímico utiliza dois eléctrodos numa solução electrolítica. A análise de gases tais como CO reagem ao funcionamento do eléctrodo e produzem CO2 e electrões livres. As cargas e descargas migram para outro eléctrodo onde é formada água se existir oxigénio. A reacção converte CO em CO2. Se os eléctrodos estão ligados em serie a uma resistência e a diferença de potencial através da resistência é medida, esta vai ser proporcional ao fluxo de corrente, tornando-se assim função da presença de gás.

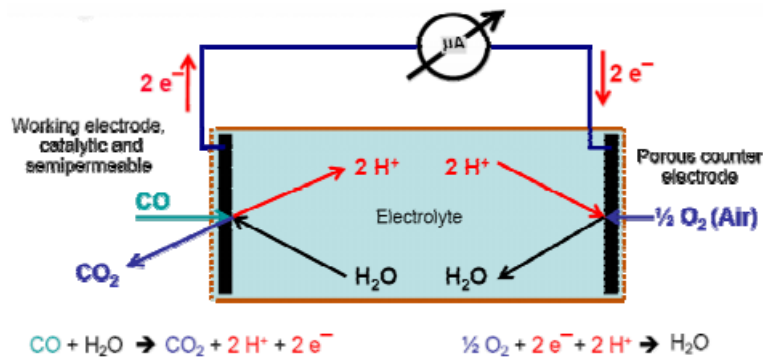


Figura 3.10.: Esquema de sensor químico

4. Redes de Comunicação

4.1. ZigBee

Zigbee corresponde a norma 802.15.4 do IEEE, esta norma foi criada pela ZigBee Alliance em parceria com o IEEE e define um conjunto de especificações para comunicação sem fios entre dispositivos electrónicos para aplicações de monitorização e controlo com baixas taxas de transmissão, baixo consumo de energia, segurança e confiabilidade.

A rede ZigBee opera na frequência ISM (Industrial, Scientific and Medical), em Portugal na frequência 2.4 GHz (16 canais), sendo esta frequência livre não requer licença de funcionamento. Uma rede ZigBee permite hospedar milhares de dispositivos (valor teórico 65.000), com uma taxa de transferência de dados de 20Kbps a 250Kbps.

Os módulos ZigBee permitem criar dispositivos remotos de baixo consumo, alimentados por baterias e módulos solares, os módulos quando não estão a transmitir/receber dados entram em modo *sleep* consumindo o mínimo de energia valores próximos dos μA .

4.1.1. Hierarquia ZigBee

A rede ZigBee é formada por dois tipos de dispositivos distintos que permitem construir uma hierarquia com diferentes formas topológicas.

Os dispositivos Full Function Device (FFD) funcionam em todos os tipos de rede, desempenhando a função de coordenador de rede tendo acesso a todos os outros dispositivos, ajustando os parâmetros da rede e transmitindo informações pela rede. Trata-se de dispositivos de construção mais complexa, operando tipicamente no estado "activo".

Os dispositivos Reduced Function Device (RFD) estão limitados à configuração topológica em estrela, não podendo actuar como coordenador da rede, pede dados apenas ao coordenador. As comunicações estão limitadas a dispositivos FFD, nunca podendo comunicar com RFD's. São dispositivos de construção mais simples e podem permanecer no estado *sleep* por vários períodos.

Com estes dois tipos de dispositivo podemos construir a hierarquia ZigBee.

Em cada rede ZigBee existe exactamente um ZigBee coordenador (ZC). O ZC só pode ser implementado como FFD e dispõem das funções principais na rede, sendo capaz de criar uma rede e tornando-se a raiz dessa mesma rede, é o único dispositivo na rede capaz

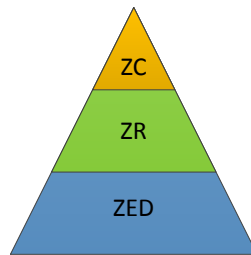


Figura 4.1.: Hierarquia ZigBee

de comutar dados entre outras redes. O ZC faz o reconhecimento de todos os nós e distribuição de endereços pelos restantes dispositivos

Os ZigBee Router (ZR) dispõem de algumas funcionalidades extra em relação a um simples nó (ZED), capaz de exercer a função de router intermédio entres os nós sem precisar do coordenador. O ZR é implementado apenas como FFD, sendo usado para expandir e aumentar o alcance da rede.

Os ZigBee End Device (ZED) dispõem de funções apenas para troca de informações com os elementos de hierarquia superior (router ou coordenador), não podendo reencaminhar dados entre ZED. Os ZED dispõem das duas implementações FFD ou RFD são dispositivos que alojam os sensores sendo mais baratos que os dispositivos de hierarquia superiores e consomem menos energia, estando no modo activo apenas para transmitir dados.

4.1.2. Topologia de rede

As tipologias de rede são constituídas pelos elementos anteriores (ZC, ZD e ZED), com estes dispositivos podemos criar três topologias diferentes estrela, árvore e *Mesh*, em alguns casos podendo uma delas coexistir dentro de uma mesma rede. A figura representa graficamente os três tipos de topologia disponíveis.

A topologia em estrela representa a implementação mais simples dispondo apenas de um coordenador onde os restantes elementos se ligam como clientes. O ZC controla toda a rede, assumindo um papel principal na rede toda a informação que circula na rede tem que passar pelo ZC, esta implementação tem a desvantagem de todos os clientes dependerem do ZC para comunicar, para os clientes poderem comunicar tem que ter alcance de sinal RF com o ZC, esta topologia está limitada a espaços pequenos 150 metros para ambientes abertos e 30 metros para ambientes urbanos.

A topologia em Árvore é formada por sub-redes que comunicam entre si através de elementos de encaminhamento (ZR), esta topologia permite comunicar com elementos situados a distâncias maiores entre si, existindo uma distribuição de dados e mensagens de controlo

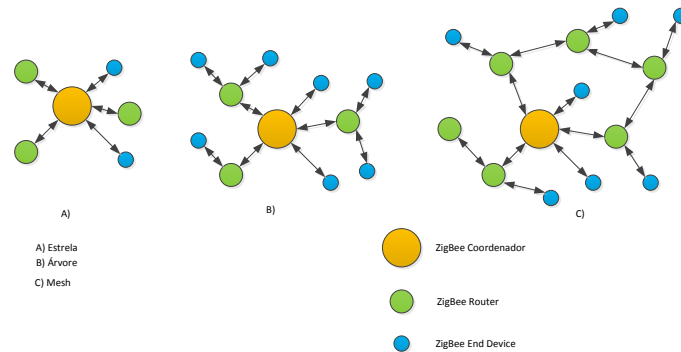


Figura 4.2.: Representação gráfica da topologia da rede ZigBee

numa estrutura hierárquica. O alcance do sinal de RF deste tipo de rede é maior, tendo em vista que um coordenador pode controlar um cliente de outra rede através de uma solicitação ao outro coordenador. Sendo que o alcance depende proporcionalmente do número de elementos da rede. [9]

A topologia *Mesh* permite a entrada de novos dispositivos, aumentando o alcance da rede e expansão física. Os dispositivos do tipo FFD (ZR e ZR) são livres de comunicar com outros FFD permitindo o ajuste automático durante a inicialização e otimização do tráfego de dados. O nó coordenador (ZC) regista todas as entradas e saídas de dispositivos na rede, não assumindo um papel de destaque na rede. Esta topologia permite construir redes mais extensas e complexas, possibilitando o controlo e monitorização de grandes áreas. [9]

4.1.3. Modos de operação da rede

A rede ZigBee opera em dois modos distintos, *beaconing* e *non-beaconing*, no modo *beaconing* os nós ZigBee Router (ZR) transmitem periodicamente informação de sinalização (*beacon*) para confirmar a presença de outros nós na mesma rede, os nós precisam de estar activos no momento da sinalização, entrando novamente no modo *sleep* entre as sinalizações. Este modo permite diminuir o consumo energético, o intervalo de tempo entre *beacons* varia entre 15,36 a 256.56s, para uma taxa de transferência de 250kbit/s. Diminuir o tempo de actividade dos nós (*duty cycle*), requer elevada precisão nas temporizações, desvantagem de reduzir o consumo energético do dispositivo.

No modo *non-beaconing* todos os dispositivos permanecem com os seus receptores activos, significa um consumo mais elevado, leva ao uso de fontes de alimentação mais robustas para alimentar os nós.

4.1.4. Formação de Rede

Para iniciar a formação de uma rede o coordenador (ZC) procurar por um conjunto de canais, após finalizar a procura os canais ficam ordenados por ordem decrescente em níveis de energia, sendo desprezados os canais de nível mais baixo. O coordenador (ZC) procura em cada canal por dispositivos ou redes ZigBee, escolhendo o melhor canal lógico (canal livre) para criar a rede, atribui um endereço lógico (ID) a todos os dispositivos adicionados à rede, os endereços são atribuídos por coordenadores (ZC) ou router (ZR), usando um algoritmo de árvore estruturada.

4.1.5. A arquitectura protocolar ZigBee / IEEE 802.15.4

A arquitectura protocolar é composta por diferentes camadas, cada camada executa serviços específicos para a camada superior, expondo um interface para a camada superior através do ponto de acesso ao serviço (SAP), as diferentes formas estão esquematizadas da seguinte forma:

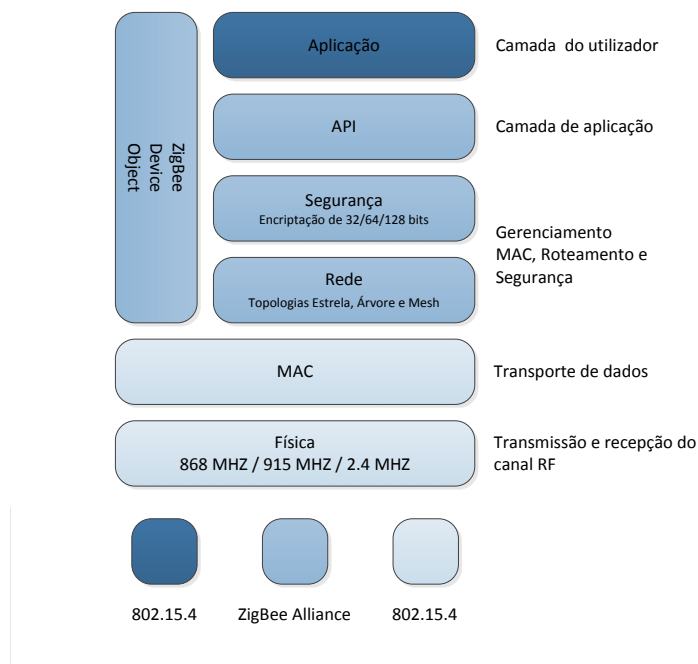


Figura 4.3.: Camada protocolar ZigBee

A camada protocolar ZigBee é formada por diferentes normas as duas camadas inferiores, camada física (PHY) e Media Access Control (MAC), estão definidas pela norma IEEE

802.15.4, sobre estas está definida a camada de rede (NETWORK), segurança e API definidas pelas normas da ZigBee Alliance e existe a subcamada Aplicação também definida pela norma IEEE 802.15.4.

A camada física (PHY) acomoda as necessidades de interfaces de baixo custo, permitindo níveis elevados de integração. Esta camada é responsável pela transmissão e recepção de mensagem através do canal físico. Das suas funções fazem parte a activação e desactivação do *transceiver*, detecção da energia (RED), indicação da qualidade da ligação (LQI).

A camada MAC tem o papel de controlar o acesso aos canais RF, utilizando mecanismos de prevenção de colisão (CSMA-CA) efectuando comunicações com a camada física. Permite o funcionamento de um dispositivo de funcionalidade reduzida (RFD) operem sem grandes necessidades de memória, responsável pela especificação do tipo de dispositivos permitidos na rede, sincronização e transmissão de *beacon* conferindo fiabilidade à operação.

A camada de rede (NWK), primeira camada definida pela norma ZigBee é responsável pelo inicio ou fim da ligação de um dispositivo à rede, a descoberta de novos dispositivos na vizinhança (e o armazenamento de informação relativa aos mesmos) e atribuição de endereços (apenas em dispositivos Coordenador).

4.1.6. Transferência de dados Formato de um pacote de dados

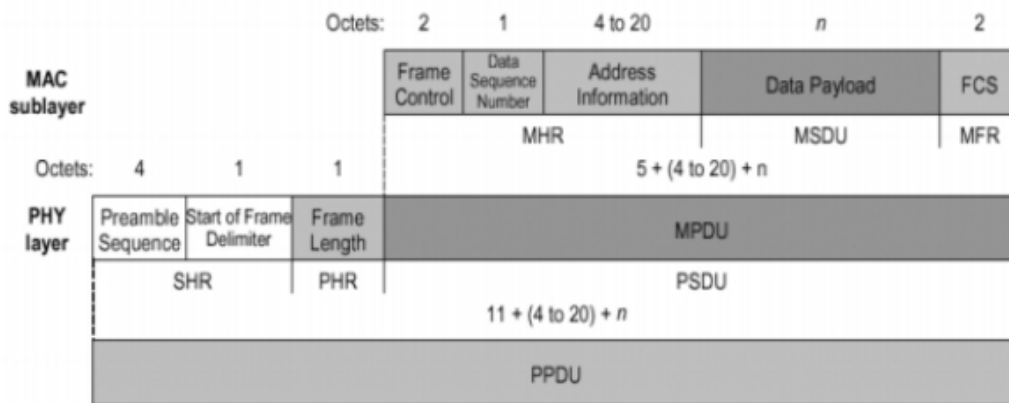


Figura 4.4.: Trama de um pacote ZigBee

A norma ZigBee adoptou a proposta de um novo algoritmo de segurança, baseado na simplificação do algoritmo de encaminhamento (AODV). Esta proposta foi adoptada como parte da especificação IEEE 802.15.4. A camada MAC utiliza o (AES) como seu algoritmo de criptografia que descreve grande variedade de rotinas de segurança. Estas rotinas

promovem a confiabilidade, integridade e autenticidade dos pacotes da camada MAC. A camada MAC faz o processamento da segurança sendo as camadas superiores responsáveis pelo controlo do processo ajustando as chaves de criptografia e determinando os níveis de segurança que devem ser usados. Quando a camada MAC transmite (ou recebe) um pacote, verifica o destino (a fonte do pacote), recupera a chave associada a esse destino (fonte), e usa essa chave para processar o pacote de acordo com a rotina de segurança designada para essa chave. Cada chave está associada a uma rotina de segurança o cabeçalho do pacote MAC possui um bit que especifica a habilitação da segurança para o pacote.

5. Design e implementação

Para a execução deste projecto foi efectuada uma análise de mercado com o objectivo de encontrar *hardware* capaz de satisfazer os critérios de selecção para os diversos componentes necessários (sensores, microcontroladores, e módulos de comunicação). Obteve-se uma grande diversidade de preços, funcionalidades e limitações.

Tendo em conta os problemas encontrados pelos diversos autores descritos na revisão da literatura, foram elencados os seguintes aspectos como sendo fulcrais para o sucesso deste projecto:

- Flexibilidade do sistema;
- Comunicação sem fios com o exterior;
- Portátil e simples de utilizar;
- Utilização de software *open-source*;
- Solução de baixo custo e fiável;
- Sistema autónomo;
- Interface com o utilizador intuitivo;
- Visualização dos dados via *web*;

Por flexibilidade do sistema entende-se que o sistema tem a capacidade de se adaptar a diferentes tipos de culturas e a diferentes configurações de sensores na medição das propriedades do solo. A comunicação sem fios com o exterior permite o envio de dados sem a utilização de extensos cabos entre as culturas, o que, para grandes áreas de cultivo ou para uma instalação com múltiplas estações de aquisição tornaria os custos inportáveis, por outro lado a não utilização de extensos cabos facilita os trabalhos agrícolas. Um sistema simples e de fácil utilização, permite ao agricultor instalar facilmente o sistema sem necessitar de qualquer conhecimentos técnico. A utilização de software *open-source* permite a continuidade e melhoria deste trabalho por outras pessoas. Uma solução de baixo custo e fiável permite colmatar a falha descrita dos sistemas de monitorização serem caros e pouco fiáveis. Um sistema autónomo dotado da sua própria alimentação sem recorrer a rede eléctrica. Os dados estando disponíveis via *web* permitem ao utilizador aceder a eles em qualquer local com acesso à *internet*. Tendo em conta os objectivos do projecto optou-se pela melhor relação qualidade preço, deste modo é esperado construir um sistema de baixo custo sem comprometer o desempenho. Outro parâmetro de grande importância é o consumo de energia do sistema, quando maior a autonomia e eficiência do sistema menor o impacte ambiental.

5.1. Arquitectura Proposta

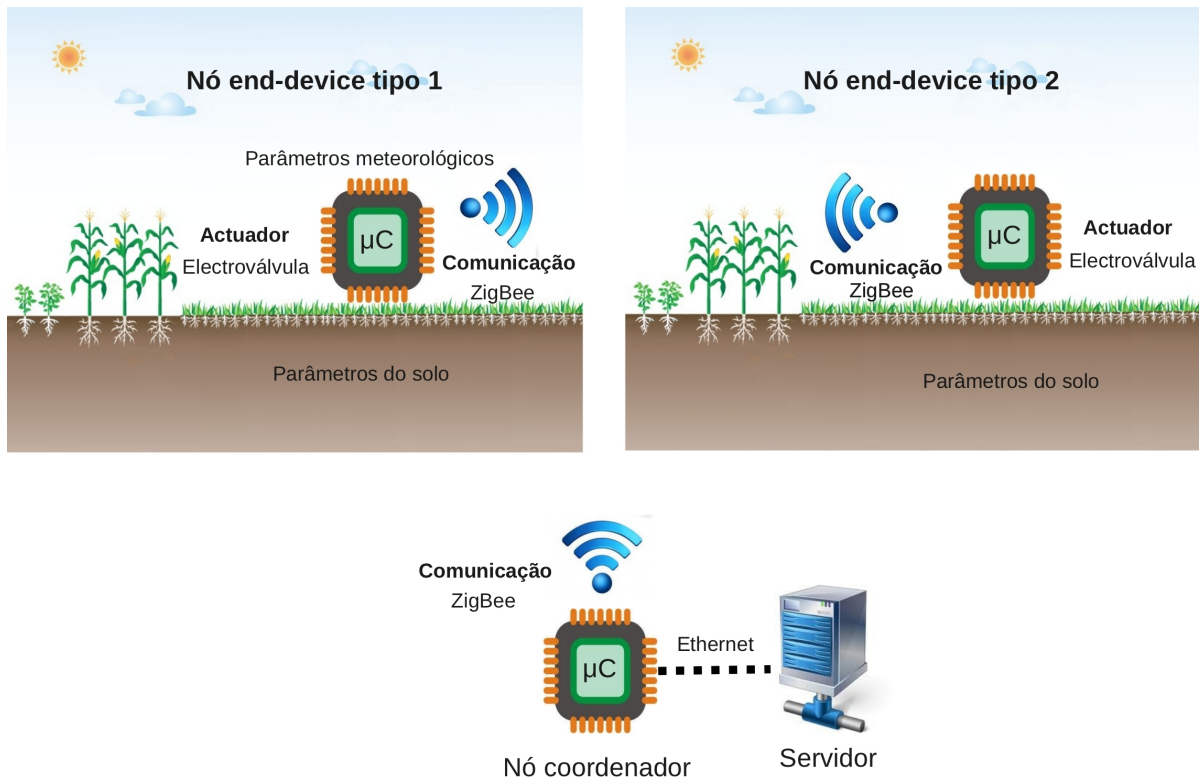


Figura 5.1.: Arquitectura proposta para o sistema

O sistema global é constituído por três elementos base, um servidor, um nó coordenador e diversos nós *end-devices*. Os nós *end-devices* dividem-se em dois tipos, o nó de tipo 1 e nó de tipo 2. O nó de tipo 1 faz a monitorização dos parâmetros do solo e dos parâmetros ambientais (estação meteorologia), o nó de tipo 2 possui menos sensores efectuando apenas a monitorização dos parâmetros do solo. Cada tipo de nó contém características específicas para as funções a realizar no sistema. A comunicação entre os diferentes *end-devices* e o nó coordenador é efectuada por módulos ZigBee (norma IEEE 802.15.4). O nó coordenador efectua a passagem dos dados da rede sem fios para a rede com fios (norma IEEE 802.3) onde se encontra alojado o servidor. Os nós *end-devices* estão ligados a electroválvulas para abertura/fecho do sistema de irrigação.

5.2. *Hardware*

Os nós *end-devices* fazem a monitorização constante dos parâmetros do solo (temperatura e humidade a diferentes profundidades) e ambientais (temperatura, humidade, pluviosidade, fluxo luminoso, pressão atmosférica, direcção e velocidade do vento).

Em função do valor predefinido para a cultura a monitorizar o microcontrolador faz actuar a electroválvula para repor o valor pretendido de humidade no solo.

Vamos proceder a descrição do *hardware* que constitui cada nó e funções para o processamento de dados.

5.2.1. Microcontrolador

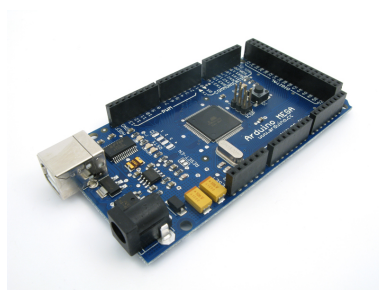


Figura 5.2.: Microcontrolador *Arduino Mega*

Com base na oferta do mercado em termos de microcontroladores tivemos em consideração as seguintes características: consumo de energia, portas analógicas (ADC), portas digitais, extensibilidade para outras redes (GSM, zigBee). Ponderando estas características o microcontrolador escolhido para efectuar o interface entre os sensores e a rede sem fios foi o ATMEGA 1280. Este microcontrolador é comercializado em kit's de desenvolvimento com o nome “arduino mega” sendo uma solução *open-source*, a programação é efectuada no Arduino Integrated Development Environment (IDE), programa fornecido na página oficial do *arduino*, a linguagem de programação utilizada é C++, são disponibilizadas algumas bibliotecas para o desenvolvimento de aplicações no microcontrolador.

5.2.2. Sensores

No projecto deste trabalho foram definidos os seguintes sensores:

- Humidade:
 - Ambiente (DHT11);
 - Superfície do solo;

- Subsolo (*Watermark 200SS*);
- Temperatura:
 - Solo (LM35);
 - Ambiente (DHT11);
- Pressão atmosférica (BMP085);
- Luminosidade;
- Pluviômetro;
- Anemômetro;

Estando os mesmos apresentados detalhadamente de seguida.

5.2.2.1. Sensor de temperatura e humidade do ar

O sensor DHT11 mede a temperatura e humidade relativa do ar. Possui um único chip capaz de medir estes dois parâmetros simultaneamente, obtemos como parâmetro de saída um sinal digital calibrado [Sensor and Reserved, 2006]. O sensor possui um elemento resistivo para medir a humidade relativa do ar e um NTC para medir a temperatura. Ambos os elementos do sensor estão ligados a um conversor analógico-digital (ADC) e um circuito série, obtendo assim uma maior fiabilidade no sinal adquirido, sendo este imune a perturbações externas ao sistema. O sensor possui tecnologia *CMOSens*[®] que garante uma excelente fiabilidade e estabilidade a longo prazo. O microcontrolador possui uma biblioteca para corrigir o valor de *offset* dado pelo sensor para o parâmetro da humidade relativa. Na Tabela 5.1 são apresentadas as características do sensor DHT11 para a medição das variáveis humidade relativa (RH) e temperatura ($^{\circ}C$).

Parâmetros	Valores	
	Humidade	Temperatura
Resolução	$\pm 1\%$ RH	$\pm 0.1^{\circ}C$
Precisão	$\pm 4\%$ RH (Max $\pm 5\%$ RH)	$\pm 2^{\circ}C$
Gama de medidas	20-90 %RH,	0 - 90 $^{\circ}C$
Repetibilidade	$\pm 1\%$ RH	$\pm 1^{\circ}C$
Histerese	$\pm 1\%$ RH	-
Estabilidade	$\pm 1\%$ RH /Ano	-

Tabela 5.1.: Características do Sensor DTH11

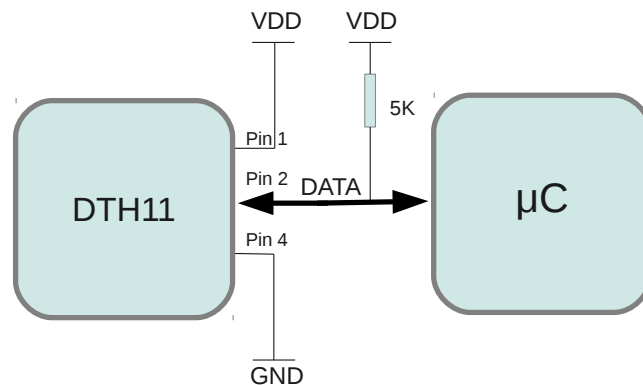


Figura 5.3.: Esquema de ligação do sensor DHT11

	Condições	Mínima	Máxima
Tensão de alimentação	DC	3v	5.5v
Corrente de alimentação	Medida	0.5mA	2.5mA
	Média	0.2mA	1mA
	Standby	0.1mA	0.150mA
Período de amostragem	Segundos	1s	

Tabela 5.2.: Consumo de energia do sensor DHT11

Pela análise da Tabela 5.1 podemos verificar que o sensor apresenta alguns erros associados à medição dos valores para a humidade relativa do ar, este erro não é crítico para a monitorização. Mesmo não sendo necessária elevada precisão ainda é feita uma calibração do sensor para minimizar esse erro [Uk, 2010].

Na Tabela 5.2 são indicados os valores de corrente para um intervalo de tensão de 3-5.5V, a uma temperatura ambiente de 25°C. Utilizando os dados apresentados e efectuando o cálculo da potência verificamos que este sensor apresenta um valor de potência médio na ordem dos 1.25mW.

Este sensor apresenta a desvantagem de não permitir efectuar medidas para temperaturas negativas mas este aspecto não é crítico para o nosso clima. Caso se pretenda que o sistema seja implementado em regiões onde se registem temperaturas negativas, este sensor deve ser substituído apenas se as culturas a monitorizar suportem esse tipo de temperaturas.

Com os parâmetros que este sensor mede podemos calcular o ponto de orvalho [Kunze et al., 2007], utilizando o algoritmo apresentado em [Noaa, 1991], solução mais eficiente em comparação com as restantes fórmulas [dew, 2012].

5.2.2.2. Sensor de humidade do solo (superfície)

O sensor para medir a humidade do solo à superfície (sensor de condutividade eléctrica do solo) é um sensor extremamente simples de construir. É constituído por dois eléctrodos e electrónica para o calculado da tensão eléctrica que atravessa o solo. Quanto maior o índice de humidade do solo maior a condutividade entre os eléctrodos. Devido ao baixo valor comercial do sensor optámos pela solução comercial, o sensor apresenta o esquema da figura 5.4

Parâmetros	Valores
Alimentação	3.3 – 5v
Tensão de saída	0 – 4.2v
Corrente	35mA

Tabela 5.3.: Características do sensor de humidade do solo

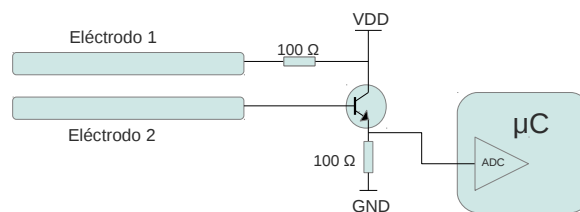


Figura 5.4.: Esquema de ligação do sensor de humidade do solo

Na figura 5.4 temos representado o esquema do sensor esta concepção para o calculo da condutividade eléctrica do solo possui uma falha grave. O circuito adequado para este tipo de sensor funciona em modo AC, o esquema apresentado na figura 5.4 funciona em DC. O funcionamento em modo DC provoca a polarização do sensor e conseqüentemente à leitura de valores errados e degradação do sensor a longo prazo (corrosão dos eléctrodos).

5.2.2.3. Sensor de humidade de profundidade ajustável

O sensor *Watermark 200SS* da *Irrrometer Corporation* é um sensor de matriz granular cuja resistência varia em função da humidade. O *Watermark 200SS* é um produto relativamente recente, é constituído por dois eléctrodos envolvidos em gesso dentro da matriz granular. Na parte exterior existe uma tela perfurada de metal como protecção, o valor da tensão da água no solo é obtido pela medição da condutividade eléctrica entre os eléctrodos.



Figura 5.5.: Exemplo do sensor Watermark

Para adquirir o valor do sensor *Watermark 200SS* é preciso recorrer a uma fonte de corrente alternada ou um circuito capaz de bloquear a componente DC. O bloqueio da componente DC evita a polarização do sensor, que influencia as medições do sensor e degradação a longo prazo. Para a medição correcta do valor do sensor utilizamos o circuito representado na figura 5.6, o condensador filtra a componente DC do sinal. O microcontrolador gera um sinal de excitação contínuo comutado no *pin* digital, este valor varia entre 0 – 5V com uma frequência de 40Hz, sendo o valor lido pelo ADC quando o sinal de excitação está a 5V.

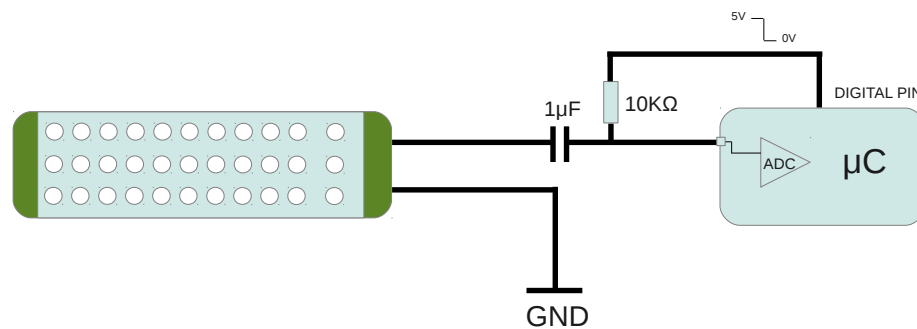


Figura 5.6.: Esquema de Ligação do sensor *Watermark 200SS*

Através da tensão de saída ligada ao ADC do microcontrolador obtemos o valor da resistência do sensor usando a relação do divisor de tensão.

$$V_{out} = \frac{R}{R_{wm} + R} \times 5 \quad (5.1)$$

A tensão de saída é dada por V_{out} , R o valor da resistência do circuito ($10K\Omega$) e R_{wm} o valor da resistência do sensor (Ω). Para obtermos a tensão matricial do solo, em kPa , verificamos a existem vários trabalhos realizados para obter esse valor para este tipo de sondas [Allen, 2000] [Shock et al., 1998]. Com base na análise dos trabalhos realizados a equação de *Choque* é apresentado como a melhor solução sendo a escolhida. A equação 5.2 corresponde a equação de *Choque*.

$$SWP = \frac{3,213 \times RWM + 4,093}{(1 - 0,009733 \times RWM - 0,01205 \times Tsoil)} \quad (5.2)$$

Na equação 5.2, SWP corresponde à tensão de água no solo (kPa), RWM é a resistência do sensor em ($k\Omega$) e $Tsoil$ a temperatura do solo ($^{\circ}C$). A temperatura do solo influencia o valor do potencial de água no solo para corrigir esse valor utiliza-se o valor da temperatura do solo (sensor LM35). Para minimizar os erros de leitura da resistência são efectuadas cinco leitura consecutivas e calculada a média [Fisher, 2012].

5.2.2.4. Sensor de luminosidade

O sensor BH1750 mede a intensidade luminosa sendo constituído por uma fotoresistência cujo valor da tensão varia em função da intensidade luminosa. A tensão é convertida pelo ADC de 16 bits num sinal de saída em formato digital, não sendo necessário grandes cálculos para o cálculo do valor da fotoresistência. A comunicação dos dados adquiridos com o microcontrolador é feita pelo protocolo de comunicação I2C.

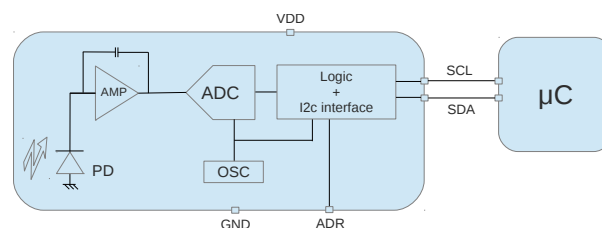


Figura 5.7.: Esquema de ligação do sensor BH1750

Parâmetros	Valores
Alimentação	3 – 5v
Corrente	7mA
Potencia dissipada	260mW
Resolução	1 – 65535lx

Tabela 5.4.: Características do sensor BH1750

O sensor de luminosidade apresenta uma elevada resolução, sendo possível detectar as diferentes fases do dia. O protocolo de comunicação I2C permite uma rápida aquisição do valor do sensor, sendo este valor já calibrado pelo próprio sensor. A tabela 5.4 representa as características do sensor, verificamos que o sensor apresenta um consumo de energia baixo, enquadrando-se com os requisitos do sistema.

5.2.2.5. Sensor de pressão atmosférica

O sensor BMP085 mede a pressão atmosférica. É constituído por um sensor piezo-resistivo, um ADC, uma unidade de controlo com E2PROM e um interface serie I2C. O sensor BMP085 adquire o valor da pressão atmosférica e temperatura não compensada sendo estes valores compensados pela unidade de controlo do BMP085 e enviado pelo protocolo I2C para o microcontrolador. A E2PROM tem 176 bits de dados para compensar a temperatura de *offset* e outros parâmetros do sensor.

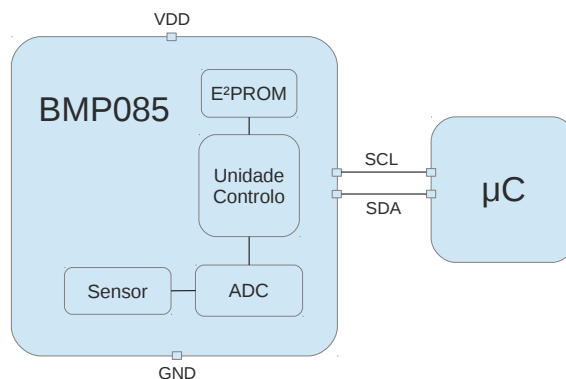


Figura 5.8.: Esquema ligação do sensor BMP085

Parâmetros	Valores
Alimentação	1.8-3.6v
Corrente	0.005mA
resolução	300-1100hPa

Tabela 5.5.: Características do sensor BMP085

Formula para o cálculo absoluto da altitude:

$$Altitude = 44330 * \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right) \quad (5.3)$$

Para o cálculo da pressão ao nível do mar

$$p_0 = \frac{p}{\left(1 - \frac{altitude}{44330} \right)^{5.255}} \quad (5.4)$$

Estas formulas são fornecidas no *datasheet* do sensor, os dados do sensor são adquiridos por I2C, que devolve o valor da pressão atmosféricas e temperatura ambiente devidamente compensados. Este sensor possui um consumo de energia mínima $0.017mW$.

5.2.2.6. Sensor de Temperatura do solo

O sensor de temperatura Lm35 é fabricado pela *Texas Instruments*, este sensor pertence à classe dos sensores de precisão de circuito integrado, não necessitam de qualquer tipo de calibração nem circuito de condicionamento para obter valores precisos para a temperatura. . Para efectuarmos a aquisição de temperaturas do solo o sensor foi encapsulado como ilustra a figura 5.10, com este encapsulamento pretende-se isolar o sensor da humidade do solo.

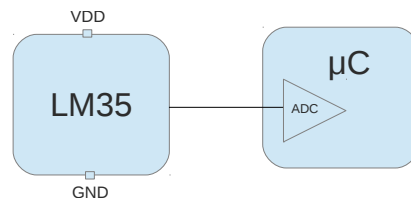


Figura 5.9.: Esquema ligação do sensor Lm35

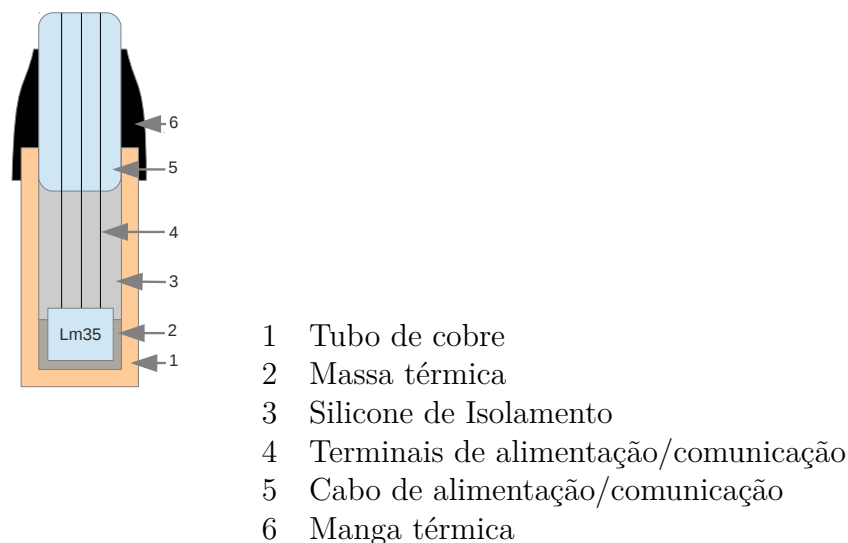


Figura 5.10.: Encapsulamento do sensor Lm35

Procedemos a calibração do sensor antes de ser encapsulado recorrendo a uma caixa fechada e um sensor com maior precisão e resolução. Após o encapsulamento colocamos o sensor em água para detectar eventuais problemas, procedemos à medição do valor da temperatura da água e valor do sensor Lm35, apresentado o mesmo valor. Pelo teste efectuado concluímos que o sensor se encontra calibrado. O sensor Lm35 apresenta valores precisos para a temperatura do solo, o encapsulamento do sensor demonstrou ser eficaz para medir a temperatura mesmo quando o solo se encontra molhado.

5.2.2.7. Pluviómetro e anemómetro



Figura 5.11.: Imagem do pluviómetro e anemómetro

O pluviómetro e anemómetro fazem parte de uma estação meteorológica de baixo custo adquirida numa superfície comercial, esta estação tem a particularidade de estabelecer a comunicação entre a consola e os sensores (pluviómetro e anemómetro) por radiofrequência 433MHz. Para o projecto foi desprezada a consola sendo a aquisição dos valores efectuado por um módulo RF (frequência de 433.92 MHz) ligado ao microcontrolador. O protocolo de comunicação [Ws and Ews, 2011] usado entre a consola e sensores é proprietário tendo sido desenvolvida uma biblioteca (disponibilizada na web) para interpretar esses dados, posteriormente esta biblioteca sofreu algumas alterações de configuração e optimização para ser compatível com o *hardware* existente.

O pluviómetro engloba-se na classe dos pluviómetros automáticos, o valor da pluviosidade é medido em função do tempo. O mecanismo de medição utiliza duas conchas (semelhante a uma balança de pratos) a água entra para uma concha quando o peso atingindo é superior ao da parte oposta é efectuada a descarga tomando a segunda concha o lugar da primeira e assim sucessivamente. Para converter os dados da variação das conchas em formato digital o pluviómetro contém um sensor de efeito de *Hall* [Neis, 2012], sempre que as conchas mudam de posição o sensor detecta esse movimento é contabilizando um pulso, cada pulso corresponde ao valor de 0.2mm de precipitação. Para aferir o pluviómetro utilizamos outro pluviómetro sendo este manual, medimos o valor mínimo (0.2mm) de água que faz variar o movimento das conchas, e ajustamos (utilizando os dois parafusos disponibilizados para esse efeito) o momento de variação para esse valor.

O anemómetro utilizado é do tipo rotor horizontal de conchas (anemómetro de *Robinson*) possui também um leme para indicar a direcção do vento. O princípio de funcionamento para medir a velocidade do rotor é idêntico à do pluviómetro, utilizando um sensor de efeito de *Hall* para medir a velocidade do vento, a calibração deste sensor foi efectuada recorrendo a outro anemómetro já calibrado existente no laboratório. Para medir a direcção do vento o leme faz variar um potenciómetro, medindo o valor da resistência obtemos a direcção. Para calibrar o sensor o anemómetro dispõe de uma bússola na parte superior, quando se liga o anemómetro o leme tem de estar a apontar para norte o geográfico.

5.2.3. Módulos de comunicação

Os módulos de comunicação são uma parte importante deste projecto. A rede sem fios como descrito por diversos autores na bibliografia apresenta-se como a melhor opção para as aplicações agrícolas. Os módulos Zigbee apresentam as melhores características para criar uma rede WSN de baixo consumo [Horvat, 2012], a topologia *mesh* permite cobrir uma vasta área, os módulos possuem uma taxa de transferência de dados adequada para o projecto. O envio de dados do módulo coordenador para o servidor é efectuada utilizando um módulo de *Ethernet*. A utilização do módulo de *Ethernet* vs modem GSM foi ponderada, o módulo GSM precisa de ligação de dados constante para envio de dados (plano de dados), grande parte das explorações agrícolas dispõem de casa de apoio local

onde é possível alocar o módulo coordenador. O servidor pode constar na rede local ou remota.

5.2.3.1. Ethernet

O módulo de *Ethernet* escolhido baseia-se no chip *WizNet W5100*, suporta até 4 ligações de *sockets* em simultâneo, conectando-se à rede através de um cabo RJ45. A ligação com o microcontrolador é efectuada pela porta SPI, o módulo suporta protocolo UDP e TCP. Possui um *buffer* de 16 Kbits, velocidade de ligação a rede 10/100Mbps sendo compatível com a norma IEEE 802.3. O módulo é comercializado em *shield* compatível com o microcontrolador, o *shield* traz um suporte para cartão de memória microSD não sendo utilizado nesta fase.

O nó coordenador é responsável pelo envio de dados para o servidor, este nó está ligado à rede local para envio de dados e alimentado pela rede eléctrica.

5.2.3.2. ZigBee



Figura 5.12.: Módulo XBee série 2

Os módulos Zigbee desempenham uma função primordial no sistema, sendo responsáveis pela rede sem fios por uma área extensa. Os módulos escolhidos são os *XBEE PRO* série 2, estes módulos possuem vantagem em comparação com a série 1, permitem criar redes com topologia *mesh*, a versão PRO permite uma distancia entre nós superior (1500 a 3200m) [International, 2012b]. Para o correcto funcionamento da rede todos os módulos são configurados usando o programa *X-CTU* disponibilizado pela *Digi* [International, 2012a], sendo necessário actualizar o *firmware*, definir o modo de funcionamento desse módulo (ZC, ZR ou ZED) e seleccionar o modo API, para podermos trabalhar sobre essa camada protocolar.

Configuração do módulo coordenador:

- Efectuar reset ao módulo após actualizar o *firmware*;
- Seleccionar ID para o módulo (ID="1AAA");
- Canal de comunicação (ID="1AAA");

- Identificar o no (NI="COORDINATOR");
- Seleccionar modo API (AP="2");
- Descarregar opções para o módulo;

Configuração dos módulos end-device:

Procedimento idêntico excepto na identificação do nó.

- Identificar o no (NI="END_DEVICE#")

5.2.4. Actuadores

O *CropSupervisor* possui electroválvulas para abertura e fecho da irrigação. Para o accionamento das electroválvulas utilizou-se um relé.

5.2.4.1. Relés

Os relés demonstraram ser a melhor opção para accionamento das electroválvulas, não necessitando de electrónica extra. Inicialmente estava projectado os módulos dotados de electroválvulas, solução inviável quando se pretende colocar os nós alimentado por bateria e painel solar ficando independentes da rede eléctrica. As electroválvulas apresentam um consumo de energia elevado, as mais pequenas são alimentadas a 12V e apresentam um consumo de energia de 5.88W por electroválvula. Este valor não permite projectar e dimensionar uma bateria e painel de pequenas dimensões e baixo custo. A solução encontrada passa por alimentar as electroválvulas através da rede eléctrica sendo o accionamento efectuado pelo microcontrolador através do rele. Esta solução permite adaptar o sistema a qualquer tipo de electroválvula existente na exploração agrícola. Outra solução para este problema passa por utilizar electroválvulas piezoeléctricas ou válvulas esféricas actuadas por um motor, estas duas soluções apresentam a desvantagem de serem extremamente caras, sendo incompatível com os pressupostos para este projecto.

5.2.5. Custos

Nesta secção vamos verificar o preço de cada componente e preço final de cada módulo para o sistema *CropSupervisor*.

5.2.5.1. Servidor

Para o servidor utilizou-se um computador que cumpria os requisitos mínimos exigidos para essa função. O aluguer de um servidor capaz de suportar a aplicação SCADABR tem um custo anual de 220€.

5.2.5.2. Nó coordenador

A tabela 5.6 demonstra o preço de cada componente constituinte do nó coordenador. O módulo Zigbee destaca-se como sendo o componente mais caro da lista mas é uma componente fundamental na constituição deste nó.

Nó coordenador	
Componente	Preço (€)
Microcontrolador	19,9
Shield ethernet	14,9
Shield expansão	16,80
Módulo xbee	35,56
Caixa	13,90
Transformador	11,5
Outros	5,0
TOTAL	117,56

Tabela 5.6.: Tabela de custos dos componentes do nó coordenador

5.2.5.3. Nó *end-device*

A tabela 5.7 demonstra o preço de cada componente constituinte do nó coordenador. Mesmo escolhendo os sensores e componentes que apresenta a melhor qualidade vs preço ainda apresenta um valor significativo.

Nó <i>end-device</i> tipo 1		Nó <i>end-device</i> tipo 2	
Componente	Preço (€)	Componente	Preço (€)
Microcontrolador	20,2	Microcontrolador	20,2
Shield v5	12,4	Shield v5	12,4
Módulo xbee	35,56	módulo xbee	35,56
E. Meteorológica	49,9	Sens. DTH11	5,6
Sens. DTH11	5,6	Sens. moisture	3,8
Sens. moisture	3,8	Sens. Watermark	37,9
Sens. Watermark	37,9	Sens. pressão	15,5
Sens. pressão	15,5	Sens. luminosidade	10,1
Sens. luminosidade	10,1	Módulo RF	3,6
Módulo RF	3,6	Relé	6,1
Relé	6,1	Caixa	16,9
Caixa	16,9	Outros	5,0
Outros	5,0	TOTAL	143,46
TOTAL	222,54		

Tabela 5.7.: Tabela de custos dos componentes dos nós *end-device*

5.3. Software

Para maior facilidade a identificar os sensores nos nós *end device* do tipo 1 e 2, possuem os sensores identificados por números sendo estes números igual para nós do mesmo tipo.

5.3.1. Servidor

Para o servidor procedeu-se a instalação da distribuição do *Ubuntu server* e respectiva configuração. O *software open-source* SCADABR foi posteriormente instalado.

O servidor pode estar ligado numa rede local ou numa rede exterior ao sistema. Para o nó coordenador saber a localização do servidor na rede exterior foi atribuído um *DynDns* ao servidor e guardado na memória do nó coordenador, sempre que o IP do servidor muda o servidor procede a actualização do seu *DynDns*. Os dados são recebidos pelo servidor através de pedidos de *request* HTTP, possuindo um *script* de captura do comando 'get', apenas são aceites as mensagens com formato da figura 5.13.



Figura 5.13.: Formato do pacote de rede a receber pelo servidor

O campo 'N' é fixo e significa nó, o 'ID' é referente ao nó end-device a que o coordenador requereu o valor do sensor, o campo sensor corresponde ao número do sensor (cada sensor possui número) e DATA corresponde ao valor do sensor a ser armazenado para o servidor.

Quando esta mensagem é enviada em sentido oposto serve para definir valores limite ou activar/desactivar a electroválvula (modo manual).

5.3.2. Nó coordenador

O nó coordenador efectua a passagem dos dados da rede ZigBee para a rede local até ao servidor. O coordenador sabe a localização do servidor pelo *DynDns* tendo sido também criado um para o coordenador, sendo possível ao servidor saber a localização do nó coordenador. Este nó possui software para manter a rede sem fios funcional, o seu funcionamento é simples mas exigente para evitar falhas. A rede criada está em modo API todas as mensagens contêm o *MAC address* do nó remetente, o campo ID que vamos usar para identificar os nós serve para diferenciar o número do sensor no servidor.

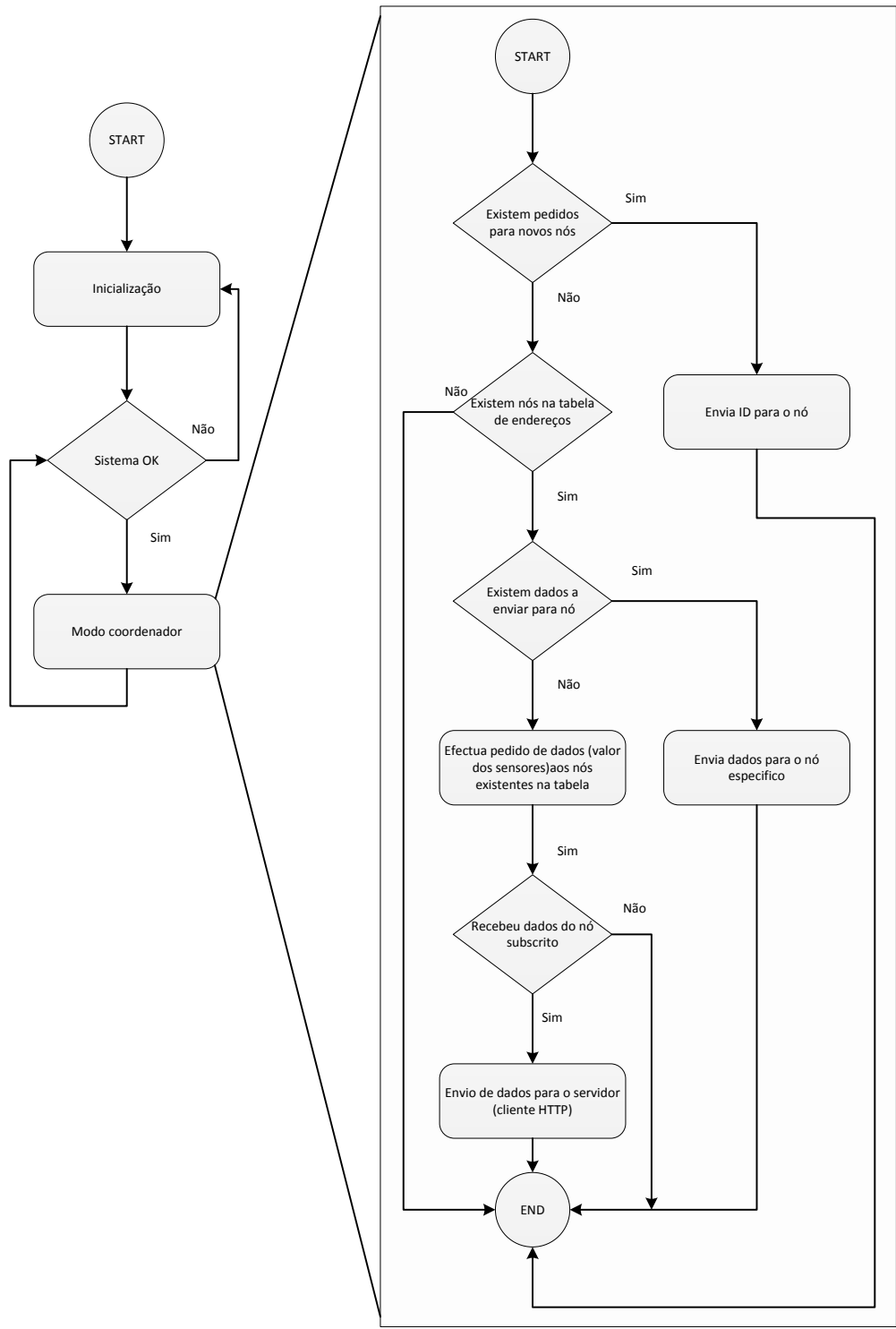


Figura 5.14.: Fluxograma de funcionamento do nó coordenador

A figura 5.14 demonstra o funcionamento do software do nó coordenador, este nó quando inicia verifica se existem pedidos de novos nós a adicionar a rede, caso exista o pacote recebido tem o formato da figura 5.15.

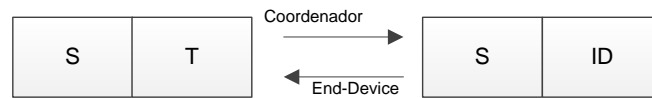


Figura 5.15.: Formato do pacote inicial

O nó end-device quando se pretende ligar o comando 'S' com o significado *setup* o comando 'T' corresponde ao tipo de nó end-device (1 ou 2), este campo é guardado na tabela juntamente com o MAC, o nó coordenador vai verificar a tabela de endereços se o MAC do end-device já deu entrada na tabela e esteja apenas 'off', caso esteja 'off' o nó coordenador envia o ID referente a esta entrada e activa o campo status para esse MAC com 'on'. Caso não o MAC ainda não tenha dado entrada na tabela procede-se a sua adição na tabela e envio do ID, o valor ID corresponde ao índice da tabela onde está armazenado o MAC do nó. O coordenador verifica constantemente se existem dados a enviar para algum nó end-device específico, este tipo de mensagem tem o formato da figura 5.16.



Figura 5.16.: Formato da mensagem a envia para nó end-device

O comando 'W' significa *write*, o 'ID' identifica o nó, o campo 'Sensor' identifica o sensor e DATA o valor a ser guardado. Este tipo mensagem tem origem no servidor. O coordenador vai efectuar o pedido de valores aos end-devices, seguindo a tabela faz o pedido pelos MAC aguardados, em função do tipo de nó sabemos quantos sensores existem no nó end-device, os nos 'off' são ignorados. Este tipo de pedidos tem o formato da figura 5.17.



Figura 5.17.: Pacote para leitura do valor do sensor

O campo 'R' significa *read*, 'ID' o nó a que se destina e 'sensor' a identificação do sensor a ler. O nó coordenado fica a espera que o nó end-device envie a mensagem de resposta contendo o valor do sensor, esta mensagem é idêntica à enviada pelo nó coordenador acrescentar apenas o campo data como podemos visualizar na figura 5.18.



Figura 5.18.: Pacote enviado pelo nó end-device

Caso o nó coordenador não receba nenhuma mensagem de resposta por parte do nó end-device vai efectuar a contagem de falhas, a existência de três falhas consecutivas do mesmo nó o coordenador actualiza a tabela de endereços no campo 'status' correspondente ao nó em falha com 'off'. Em caso de resposta afirmativa o nó coordenador envia os dados para o servidor tendo esta mensagem o formado da figura 5.13.

5.3.3. Nó *end-device*

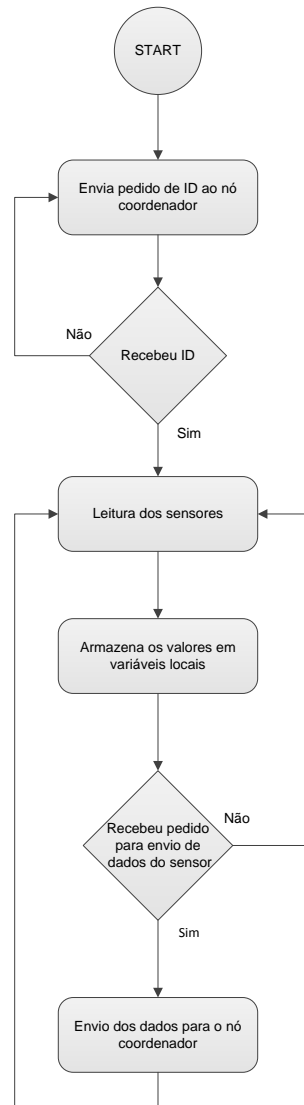


Figura 5.19.: Fluxograma de funcionamento do nó end-device

O nó end-device possui no seu software o Mac do nó coordenador permitindo o envio da primeira mensagem para este endereço, o formato da mensagem é igual ao da figura 5.15, ficando a espera que o coordenador retorne a mensagem com o ID, o valor do ID é armazenado na memória para fazer parte das mensagens a enviar. O end-device vai proceder a leitura dos sensores e guardar uma cópia destes em variáveis, deste modo

evita-se estar a espera de ler o sensor e só depois proceder ao envio da mensagem com o valor. A mensagem também pode ser de escrita como demonstrado na figura 5.16. Estas mensagens servem para activar/desactivar as electroválvulas manualmente, definir variáveis limites para o sistema e colocar o nó em modo manual/automático de irrigação. O envio das mensagens para o nó coordenador tem o formato da figura 5.18, ate receber novos pedidos o nó vai efectuando leituras aos sensores. Existem sensores cujo valor é incrementado até ser enviados para o servidor caso do pluviómetro. Para os sensores cujo valor é lido pelo ADC são efectuadas 5 leituras e posteriormente calculada a média a fim de reduzir os erros.

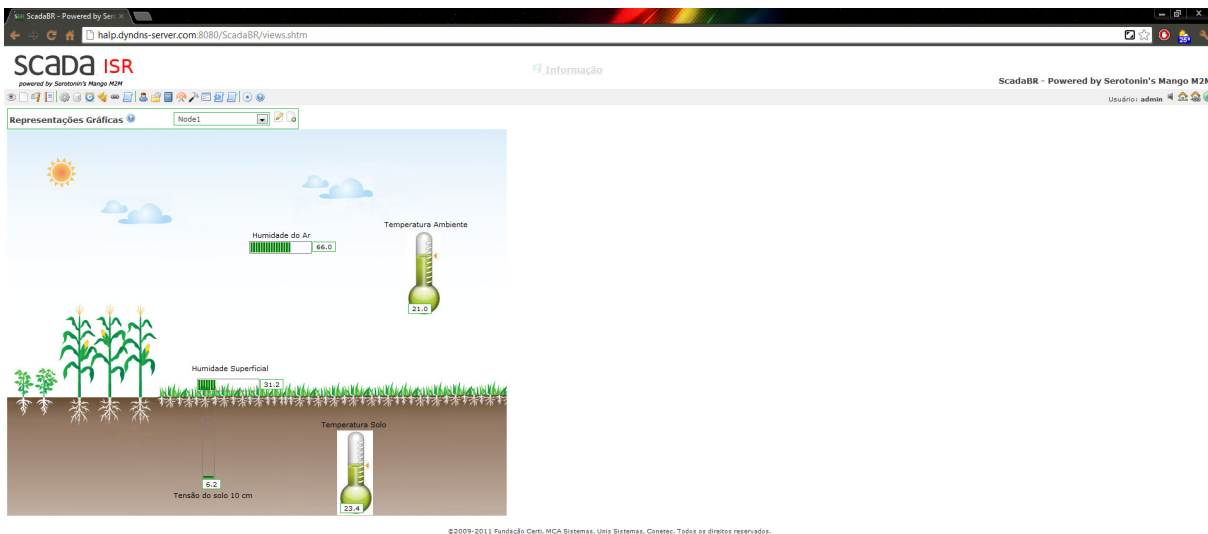


Figura 5.20.: Acesso remoto ao interface gráfico

6. Resultados Experimentais e discussões

6.1. Teste 1

6.1.1. Procedimento experimental

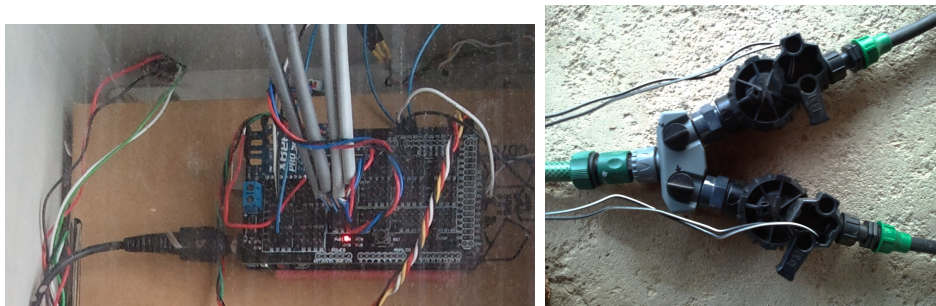


Figura 6.1.: Fotos da implementação do trabalho experimental

Para testar as potencialidades do projecto, vamos comparar o sistema desenvolvido com o método tradicional de rega (irrigação temporizada). A bancada de testes criada para testar ambos os sistemas é constituída por: dois vasos com as mesmas dimensões (340x320), duas plantas idênticas do tipo *Disa Uniflora* orquídeas da subfamília *Orchidoideae* e duas electroválvulas. Procedemos a instalação dos sistemas um em cada vaso.

As *Disa Uniflora* [Bernardos et al., 2005] são plantas que predominam em zonas húmidas (humidade do ar superior a 50%), temperadas (temperatura do ar superior a 18 °C) e sombrias não toleram a incidência directa de raios solares (queimaduras solares).

As electroválvulas são alimentadas a 24V AC, sendo actuadas por relés. Cada electroválvula faz accionar um aspersor, ambos foram calibrados para um débito de 0.4 L/min para manter este débito constantes a água encontra-se pressurizada (água da rede pública).

Atendendo as características das *Disa Uniflora* cada vaso contém solo com grande quantidade de matéria orgânica, para não haver concentração de água no fundo do vaso ambos se encontram perfurados..

O sistema tradicional é constituído com um microcontrolador e um relé. Para a teste o sistema tradicional efectua diariamente a irrigação as 08:00 durante 60 segundos, efectuando um débito de 0.4L diários.



Figura 6.2.: *CropSupervisor* instalado em vaso com *Disa Uniflora*

O *CropSupervisor* faz actuar a electroválvula quando a tensão do solo é superior a 11kPa valor óptimo para este tipo de cultivo e característica do solo. O sistema desliga quando o valor da tensão do solo atinge os 6kPa ou quando detecta precipitação, usando um contador interno sabemos o tempo que o sistema manteve a irrigação ligada.

Para maior precisão dos primeiros valores dos sensores o sistema foi ligado 12 horas após a instalação dos sistemas nos vasos.

6.1.2. Gráficos

Para ambos os sistemas vamos comparar os litros utilizados na irrigação em função dos dias, vamos proceder a análise dos gráficos obtidos para ambos os sistemas.

Pela análise dos gráficos 6.3 e 6.4 podemos verificar que os sistemas apresentam grande diferença mesmo tendo sido usados apenas nove dias de comparação. Verificamos que ambos os sistemas efectuaram a primeira irrigação quando foram ligados, o sistema tradicional efectuou mais irrigações durante este tempo.

Pelas tabelas 6.1 e 6.2 verificamos que o sistema tradicional gasta mais água ao longo do tempo, na primeira irrigação não recolocou o nível de humidade do solo nos valores

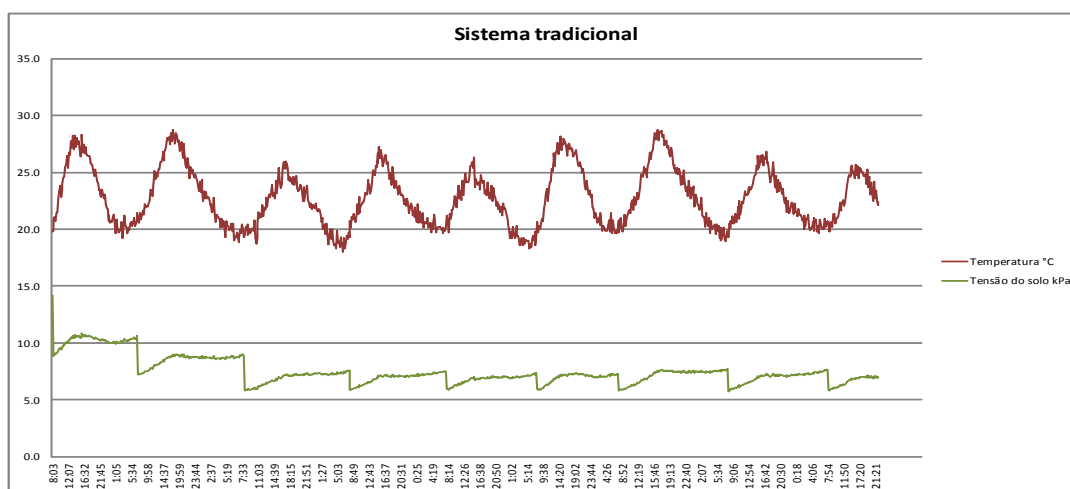


Figura 6.3.: Temperatura e tensão do solo no sistema tradicional

Dias	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
Duração (s)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	540
Debito (litros)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	3,6

Tabela 6.1.: Tempo e débito de irrigação do sistema tradicional

óptimos tendo sido atingido esse valor posteriormente. O sistema tradicional efectuou um maior número de regas diárias tendo gasto 3,6 litros de água no *CropSupervisor* apenas 2,55 litros de água efectuando um número menor irrigações mas de duração superior.

6.1.3. Discussão de resultados

Para os testes os curto período de tempo (9 dias) não nos permite verificar uma maior discrepância entre os dois sistemas, mas verificamos uma poupança ainda significativa no consumo de água para irrigação.

Verificamos uma poupança de água de 1,05 litros em apenas nove dias, mantendo a planta dentro dos valores óptimos. O sistema tradicional demora a repor o nível de humidade quando o solo se encontra demasiado seco. Quando o valor de humidade do solo é atingida verificamos um efeito oposto a saturação constante do solo, podendo levar ao aparecimento de fungos ou pragas.

Durante este período de tempo não verificamos a existência de precipitação, caso tivesse ocorrido o sistema tradicional iria proceder a irrigação como agendada.

Pela análise dos teste verificamos que foi conseguida uma poupança de água, caso tivesse

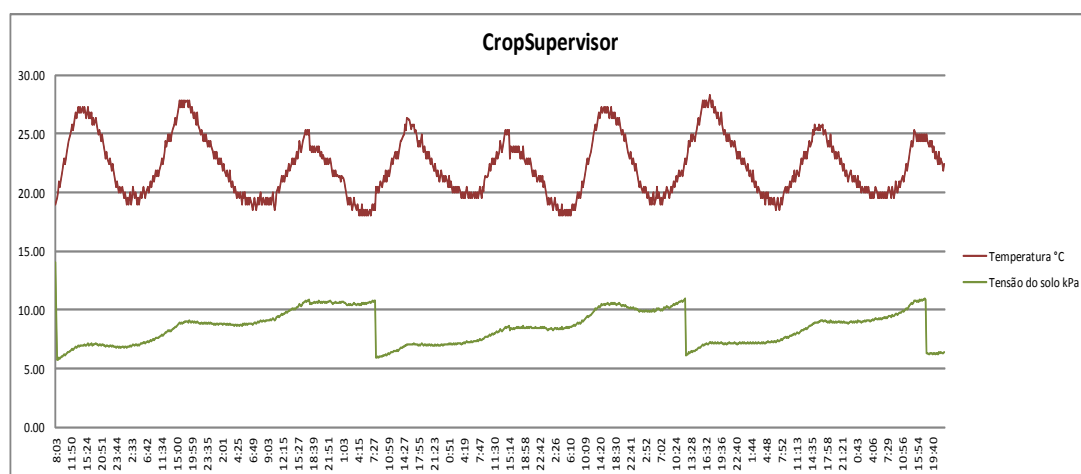


Figura 6.4.: Temperatura e tensão do solo usando *CropSupervisor*

Dias	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
Duração (s)	140	0	0	80	0	0	90	0	70	540
Debito (litros)	0,94	0	0	0,54	0	0	0,6	0	0,47	2,55

Tabela 6.2.: Tempo e débito de irrigação do *CropSupervisor*

ocorrido precipitação essa poupança era maior, porque o *CropSupervisor* apenas efectuada a irrigação quando a cultura necessita.

Pelos valores que conseguimos poupar a nível de água facilmente recuperamos o valor do custo inicial do equipamento em relação ao sistema tradicional de irrigação.

6.2. Teste 2

6.2.1. Procedimento experimental

Para testar novamente as potencialidades do projecto, vamos efectuar um segundo teste. Vamos comparar novamente o *CropSupervisor* com o método tradicional de rega (irrigação temporizada). A bancada de teste é diferente da anterior sendo constituída por: duas floreiras com as mesmas dimensões (720x150), duas electroválvulas, 2 aspersores por floreira e vamos proceder ao cultivo de nabos (*Brassica rapa L.*).

A cultura de nabos foi escolhida pelas suas características, facilidade em efectuar o plantio em floreiras, rápida geminação das sementes e atinge o ponto de colheita em dois meses. As electroválvulas são alimentadas a 24V AC, sendo actuadas por relés. Cada



Figura 6.5.: Floreiras com ambos os sistemas instalados

electroválvula faz accionar dois aspersores, tendo sido calibrados para um débito de 1 L/min. Para manter este débito constantes a água encontra-se pressurizada (água da rede pública). Para tornar este teste o mais próximo com as condições existentes numa exploração agrícola o solo utilizado foi recolhido no campo do baixo Mondego. Para não haver concentração de água no fundo das floreiras ambas se encontram perfuradas.

O sistema tradicional é constituído por um microcontrolador e um relé. Para a teste o sistema efectua diariamente a irrigação as 20:30 durante 60 segundos, efectuando um débito de 1L por dia.

Na figura 6.5 podemos verificar o aspecto da bancada de teste. Na floreira superior está instalado o *CropSupervisor*, na floreira inferior o sistema tradicional.

Para este teste não foram encontrados valores teóricos da tensão do solo para este tipo de cultura. Os valores foram escolhidos por observação das características do solo nos 3 primeiros dias, efectuando a actualização do software para esses novos valores. O *CropSupervisor* liga a irrigação quando a tensão do solo atinge os 12kPa, desliga quando a tensão do solo atinge os 7kPa ou detecta presença de precipitação. Para controlar o tempo de irrigação fizemos uso de um contador interno que conta o tempo que a electroválvula este ligada. Para maior precisão dos valores adquiridos por ambos os sistemas em teste, ambos os sistemas só foram ligados após 12 horas da instalação da instrumentação nas floreiras.

6.2.2. Gráficos

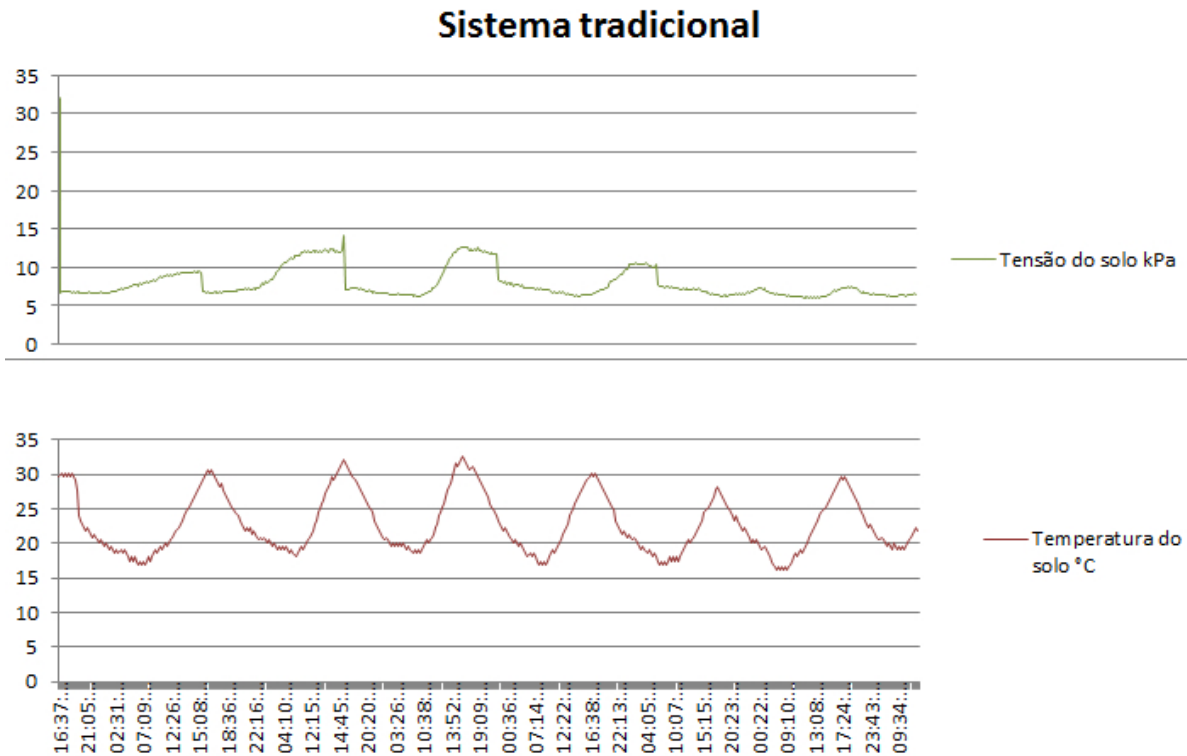


Figura 6.6.: Tempo e débito de irrigação do sistema tradicional

Para ambos os sistemas vamos comparar os litros utilizados na irrigação em função dos dias, vamos proceder a análise dos gráficos obtidos para ambos os sistemas.

Pela análise dos gráficos 6.6 e 6.7 podemos verificar que os sistemas apresentam grande diferença mesmo tendo sido usados apenas nove dias de comparação.

Dias	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Duração (s)	60	60	60	60	60	60	60	60	480
Débito (litros)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	8,0

Tabela 6.3.: Tempo e débito de irrigação do sistema tradicional

Pelas tabelas 6.3 e 6.4 verificamos que o sistema tradicional gasta mais água, na primeira irrigação não recolocando o nível de humidade do solo nos valores óptimos. Este valor foi atingido após três dias do sistema se encontrar em funcionamento. O sistema tradicional efectuou um maior número de regas diárias tendo gasto 8 litros de água. verificamos a ocorrência de precipitação ao oitavo dia de testes.

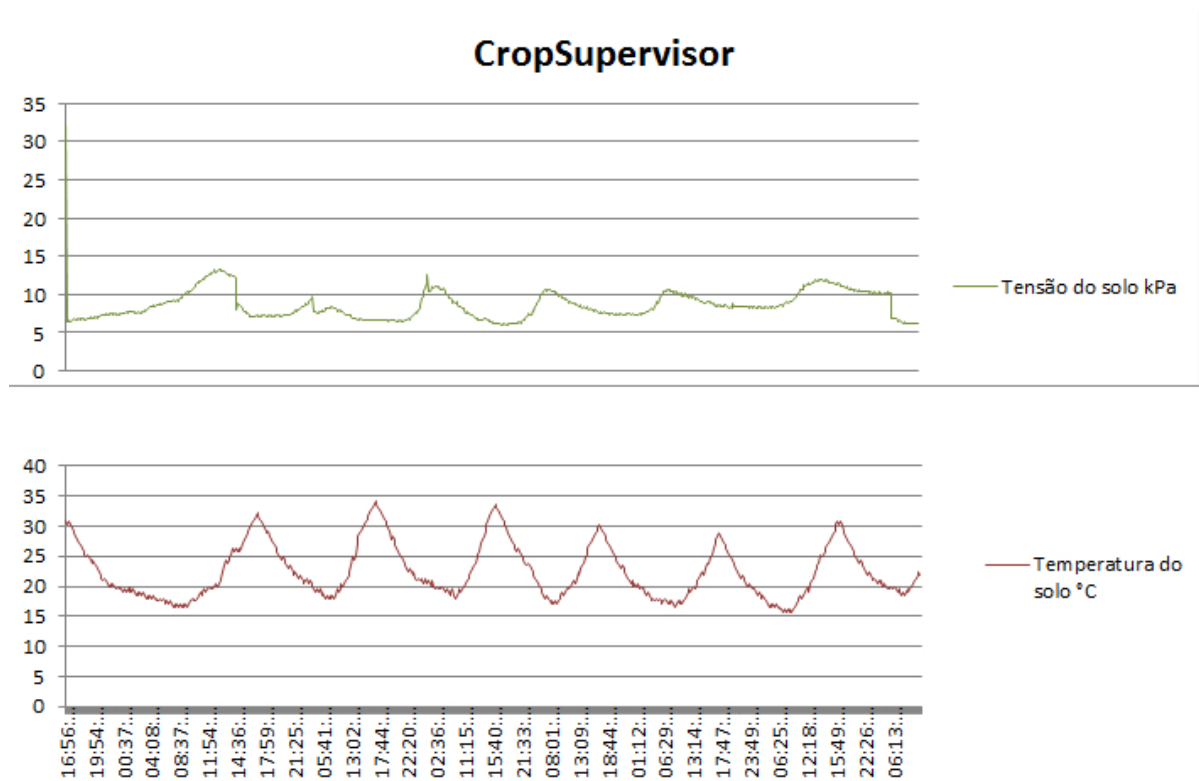


Figura 6.7.: Tempo e débito de irrigação do *CropSupervisor*

O *CropSupervisor* efectuou um número inferior de irrigações mas de duração superior, tendo gasto 5,2 litros de água.

6.2.3. Discussão de resultados

Para os testes o curto período de tempo (8 dias) não nos permite verificar uma maior discrepância entre os dois sistemas, mas verificamos uma redução no consumo de água para irrigação.

Obtivemos uma diferença de 2,55 litros em apenas oito dias, mantendo a cultura dentro dos valores que considerados óptimos para a cultura. O sistema tradicional demora a repor o nível de humidade quando o solo se encontra demasiado seco. Quando o valor de humidade do solo é atingida verificamos um efeito oposto. A saturação do solo pode levar ao aparecimento de fungos, pragas ou a destruição da cultura.

Durante este período de tempo verificamos a existência de precipitação no oitavo dia, o *CropSupervisor* não efectuou a irrigação do solo.

O *CropSupervisor* efectua apenas a irrigação quando a cultura necessita (valores definido

Dias	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Duração (s)	140	110	45	17	0	0	0	0	312
Débito (litros)	2,3	1,8	0,8	0	0	0	0	0	5,2

Tabela 6.4.: Tempo e débito de irrigação do *CropSupervisor*

pelo utilizador).

Pelos valores obtidos conseguimos poupar o custo inicial do equipamento em relação ao sistema tradicional de irrigação.

Através do servidor podemos aceder a mais variáveis que não usamos nesta comparação mas de grande importância para a agricultura de precisão. Na figura 6.8 está um exemplo de uma variável importante esta mostra a alteração do fluxo luminoso durante quatro dias.



Figura 6.8.: Gráfico do fluxo luminoso durante 4 dias em lux

7. Conclusões finais e trabalho futuro

Neste trabalho foi apresentada uma solução de monitorização e comando da irrigação para estruturas agrícolas. Efectuando a monitorização dos parâmetros do solo e meteorológicos importantes para a agricultura de precisão. A aquisição de dados é efectuada usando um microcontrolador, a transmissão e recepção de dados é feita por RF.

Os objectivos delineados no início do trabalho foram quase todos atingidos, sistema de baixo custo, fiável, comunicação sem fios, monitorização em tempo real, criação do servido para acesso remoto aos dados, ficando a faltar os nós seres autónomos (por falta de tempo para projectar o dimensionamento adequado para o sistema), o sistema encontra-se concebido (sistema de baixo consumo) para proceder a essa alteração num trabalho futuro.

Após a elaboração de um estudo qualitativo e quantitativo dos resultados obtidos chegamos a conclusão que o *CropSupervisor* constitui uma melhoria relativamente aos sistemas de baixo custo já apresentados, possuindo características e funcionalidades de sistemas de custo bastante elevado. O tipo de controlo de irrigação permite poupar água aproveitando a pluviosidade caso exista e efectuada a irrigação em função dos parâmetros definidos pelo utilizador para aquele tipo de cultura (o sistema possui valores predefinidos para utilizadores menos experientes) permitindo alterar este valor para os mais experientes.

CropSupervisor constitui um sistema prático para qualquer tipo de utilizador com ou sem conhecimentos técnicos. Apresenta-se como uma solução “amiga” do ambiente pelo baixo consumo de energia e gestão de água. A sua utilização é possível em pequenas e grandes explorações. Existindo fortes possibilidades para a sua implantação em jardins e pequenas horticulturas domésticas, deixando os utilizadores com tempo livre para outras tarefas sem terem preocupações com a irrigação. Permite ao utilizador visualizar os dados de forma remota em qualquer local com acesso a *internet*.

Além da evolução natural do *hardware* para este tipo de soluções, há que ter em consideração metas futuras. A implementação de um módulo solar já está prevista nessas metas sendo apenas necessário um circuito para gestão da autonomia do sistema. Criação de um pequeno módulo para rápida leitura do valor dos sensores de humidade do solo (demitindo detectar erros).

Para grandes explorações faz sentido a existência de um módulo GPS para envio da localização do nó, desta forma é fácil localizar e substituir os nós problemáticos, facilitando também o mapeamento dos valores no software. Uma solução híbrida para envio de dados

para o servidor (módulo GSM) pode fazer sentido em explorações remotas onde não existe acesso a rede local (LAN). Em pequenas explorações pode fazer sentido acrescentar conectividade para uma rede RS-485 reduzindo os custos em relação aos módulos de comunicação sem fios (ZigBee).

O interface gráfico necessita de melhoria (introdução de novas funcionalidades), a solução apresentada é *open-source* permitindo a qualquer utilizador experiente a sua configuração.

A nível da arquitectura do software implementação de sensorML (modo como os sensores se apresentam na rede) [Annexes et al., 2007].

Em conclusão os requisitos propostos neste projecto foram na sua maioria atingidos. O *CropSupervisor* proporciona uma camada de abstracção em relação as camadas de baixo nível, permitindo assim aos investigadores desenvolverem novos algoritmos adaptativos e inteligentes para melhorar a produção agrícola.

Bibliografia

- [dew, 2012] (2012). Dew point. http://en.wikipedia.org/wiki/Dew_point.
- [Adrian et al., 2005] Adrian, A. M., Norwood, S. H., and Mask, P. L. (2005). Producers perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48(3):256–271.
- [Agr, 2010] Agr, R. (2010). Recenseamento agrícola 2009 dados preliminares Dezembro 2010 O que mudou na agricultura portuguesa nos últimos dez anos.
- [Allen, 2000] Allen, R. (2000). Calibration for the Watermark 200SS soil water potential sensor calibration. *University of Idaho, Kimberley*, pages 18–21.
- [Annexes et al., 2007] Annexes, N., Annex, A., Annexes, I., and Annex, B. (2007). Open Geospatial Consortium Inc.
- [Anurag, 2008] Anurag, D. (2008). Agro-sense: precision agriculture using sensor-based wireless mesh networks. . . . *K-INGN 2008. First ITU-T*
- [Ash et al., 2010] Ash, C., Jasny, B., Malakoff, D., and Sugden, A. (2010). Feeding the future. *Science*, page 801.
- [Bernardos et al., 2005] Bernardos, S., Rey, F. D. E. L., and Amich, F. (2005). The section. pages 359–375.
- [Chel and Kaushik, 2011] Chel, a. and Kaushik, G. (2011). Renewable energy for sustainable agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(1):91–118.
- [de Portugal,] de Portugal, A. a. d. J. A. Agrícola, Inovação E Tecnologia Na Formação.
- [Doebelin, 2003] Doebelin, E. O. (2003). *Measurement Systems*.
- [Fisher, 2012] Fisher, D. K. (2012). Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. *Modern Instrumentation*, 01(02):8–20.
- [Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2012). *FAO Investment Centre*.
- [He et al., 2011] He, J., Dougherty, M., Arriaga, F. J., Fulton, J. P., Wood, C. W., Shaw, J. N., and Lange, C. R. (2011). Short-term soil nutrient impact in a real-time drain field soil moisture, controlled SDI wastewater disposal system. *Irrigation Science*.
- [Henares, 2007] Henares, D. (2007). ZigBee Connectivity. pages 1–5.
- [Horvat, 2012] Horvat, G. (2012). Power Consumption and RF Propagation Analysis on. pages 222–226.

- [International, 2012a] International, D. (2012a). X-CTU software. <http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352&osvid=57&type=utilities>.
- [International, 2012b] International, D. (2012b). XBee/XBee-PRO ZB RF Modules.
- [Jiber et al., 2011] Jiber, Y., Harroud, H., and Karmouch, A. (2011). Precision agriculture monitoring framework based on WSN. *2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pages 2015–2020.
- [Korduan et al., 2004] Korduan, P., Bill, R., and Bölling, S. (2004). An Interoperable Geodata Infrastructure for Precision Agriculture. *Agile Conference on Geographic . . .*, pages 747–751.
- [Kunze et al., 2007] Kunze, M., Glosch, H., and Ehrbrecht, B. (2007). Thermal dewpoint sensing: a new approach for dewpoint detection and humidity sensing. . . ., *2007. MEMS. IEEE . . .*, (January):119–122.
- [López et al., 2010] López, J. a., Garcia-Sanchez, A.-J., Soto, F., Iborra, a., Garcia-Sanchez, F., and Garcia-Haro, J. (2010). Design and validation of a wireless sensor network architecture for precision horticulture applications. *Precision Agriculture*, 12(2):280–295.
- [Maohua, 2001] Maohua, W. (2001). Possible adoption of precision agriculture for developing countries at the threshold of the new millennium. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1-3):45–50.
- [McBratney et al., 2005] McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., and Bouma, J. (2005). Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture*, (July 2004):7–23.
- [Morais et al., 2008] Morais, R., Fernandes, M. a., Matos, S. G., Serôdio, C., Ferreira, P., and Reis, M. (2008). A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 62(2):94–106.
- [Morvan et al., 2008] Morvan, X., Saby, N. P. a., Arrouays, D., Le Bas, C., Jones, R. J. a., Verheijen, F. G. a., Bellamy, P. H., Stephens, M., and Kibblewhite, M. G. (2008). Soil monitoring in Europe: a review of existing systems and requirements for harmonisation. *The Science of the total environment*, 391(1):1–12.
- [Murakami et al., 2007] Murakami, E., Saraiva, A. M., Ribeiro, L. C., Cugnasca, C. E., Hirakawa, A. R., and Correa, P. L. (2007). An infrastructure for the development of distributed service-oriented information systems for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58(1):37–48.
- [Neis, 2012] Neis, P. (2012). Transdutores de Corrente por Efeito Hall.
- [Noaa, 1991] Noaa (1991). density_algorithms.
- [Patil et al., 2011] Patil, P., H., V., Patil, S., and Kulkarni, U. (2011). Wireless Sensor Network for Precision Agriculture. *2011 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, pages 763–766.

- [Pedersen et al., 2004] Pedersen, S. M., Fountas, S., Blackmore, B. S., Gylling, M., and Pedersen, J. L. (2004). Adoption and perspectives of precision farming in Denmark. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 54(1):2–8.
- [Plant, 2001] Plant, R. E. (2001). Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1-3):9–29.
- [Robert, 2002] Robert, P. (2002). Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil*, (Figure 2):143–149.
- [Sensor and Reserved, 2006] Sensor, T. and Reserved, A. R. (2006). 1 © 2006 TechToys Co. www.TechToys.com.hk All Rights Reserved. pages 1–10.
- [Shock et al., 1998] Shock, C., Barnum, J., and Seddigh, M. (1998). Calibration of Watermark Soil Moisture Sensors for Irrigation Management. pages 139–146.
- [Simões, 2007] Simões, M. (2007). A Tecnologia como Auxiliar na Agricultura Biológica em Estufa.
- [Thompson et al., 2005] Thompson, R., Gallardo, M., Agüera, T., Valdez, L., and Fernández, M. (2005). Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science*, 24(3):185–202.
- [Tilak et al., 2002] Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N. B., and Heinzelman, W. (2002). A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2):28–36.
- [Uk, 2010] Uk, D.-r. (2010). Temperature Sensor DHT 11 Humidity & Temperature Sensor.
- [Wang et al., 2006] Wang, N., Zhang, N., and Wang, M. (2006). Wireless sensors in agriculture and food industry, Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(1):1–14.
- [Wang et al., 2007] Wang, Y., Huang, L., Wu, J., and Xu, H. (2007). Wireless sensor networks for intensive irrigated agriculture. *... and Networking Conference, ...*, pages 197–201.
- [Ws and Ews, 2011] Ws, V. and Ews, H. (2011). RF transmission protocol.
- [Xiao and Guo, 2010] Xiao, L. and Guo, L. (2010). The realization of precision agriculture monitoring system based on wireless sensor network. *... Communication Technologies in Agriculture ...*, pages 89–92.
- [Zhang et al., 2002] Zhang, N., Wang, M., and Wang, N. (2002). Precision agriculture, a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2-3):113–132.

A. Anexos

A.1. Fotografias do *CropSupervisor*

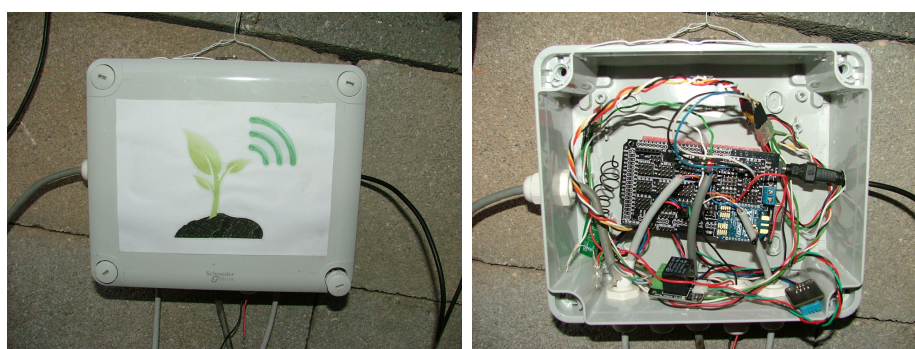


Figura A.1.: Fotos do *CropSupervisor*

A.2. Fotografias da evolução do Teste 2

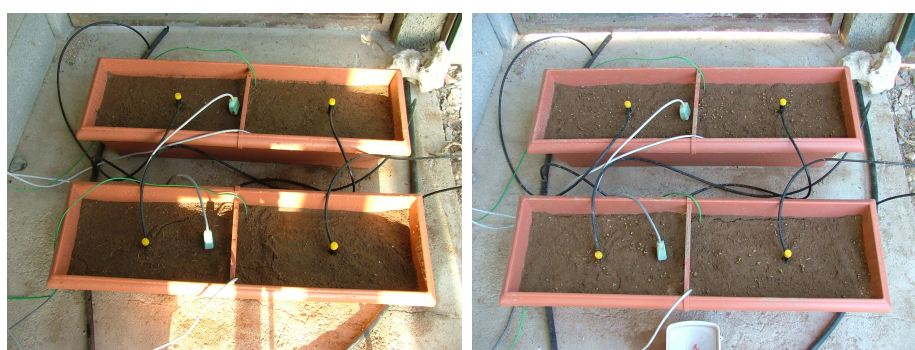


Figura A.2.: Fotos da evolução do teste 2 (esquerda dia 1 e direita dia 2)



Figura A.3.: Fotos da evolução do teste 2 (esquerda dia 4 e direita dia 6)



Figura A.4.: Fotos da evolução do teste 2 (dia 8)

A.3. *CropSupervisor*



Figura A.5.: Logótipo *CropSupervisor*

CropSupervisor: Sistema para monitorização e comando de explorações agrícolas, permite a monitorização e comando de explorações em tempo real via Internet.

Testes efectuados demonstram uma gestão correcta da irrigação de culturas, maximizando a utilização de água. Este sistema permite a monitorização das condições meteorológicas locais e apresenta-se como uma solução de baixo custo, viável e utiliza módulos sem fios para maior portabilidade.

Características:

Interface gráfico simples;	Instalação simples;
Visualização de dados via web;	Fácil adição de novos nós a rede;
Monitorização de culturas em tempo real;	Possibilidade de definir valores para a irrigação
Irrigação automática;	Aquisição de dados meteorológicos;
Detecção do ponto de orvalho;	Cálculo da altitude;

Tabela A.1.: Características do *CropSupervisor*

Variáveis a monitorizar:

- Humidade:
 - Ambiente;
 - Superfície do solo;
 - Subsolo;
- Temperatura:
 - Solo;
 - Ambiente;
- Pressão atmosférica;
- Luminosidade;
- Pluviosidade;
- Velocidade e direcção do vento;

Dados técnicos do *CropSupervisor*:

Dimensão sem sensores: 175mm x 150mm x 80mm;

Peso sem sensores: 0,7kg;

Intervalo de leitura: 30 segundos entre sensores;

Distancia entre máxima entre nós: 1500m(*interior*) – 3200m(*exterior*);

Intervalo de temperatura do solo: $-55^{\circ} - C150^{\circ}C$);

Precisão do sensor de temperatura do solo: $0,25^{\circ}C$);

Intervalo da temperatura ambiente: $0 - 50^{\circ}C$);

Precisão do sensor de temperatura: $+/- 2^{\circ}C$);

Intervalo da humidade do ar: 20 – 90 RH;

Precisão do sensor de humidade: $+/- 5$ RH;
Intervalo do barómetro 300,00 – 1100,00 *kPa*;
Precisão do barómetro: 0,5 em toda a gama;
Intervalo de tensão do solo: 0–200*kPa*;
Precisão da tensão do solo: $\pm 15\%$;
Intervalo de pluviosidade: 0 – 20*mm*;
Precisão do sensor do pluviómetro: 0,2*mm*;
Gama de trabalho do anemómetro: 0–40*m/s*;
Velocidade máxima de leitura: 60*m/s*;
Velocidade mínima de leitura: 1,4*m/s*;
Direcção do vento: 16 direcções;
Luminosidade (1 – 65535*lx*) ;