

# Estudo de indicadores para gestão de rega na viticultura de precisão

Por

Rui Miguel Leandro Pires

**Orientador:** Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos

**Co-orientador:** Doutor Aureliano Natálio Coelho Malheiro



Dissertação submetida à  
UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO  
para obtenção do grau de  
MESTRE

em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, de acordo com o disposto no  
DR – I série – N.º151, Decreto-Lei n.º 115/2013 de 7 de Agosto e no  
Regulamento de Estudos Conducente ao Grau de Mestre da  
UTAD DR, 2.ª série – N.º149 de 4 de Agosto de 2011



# Estudo de indicadores para gestão de rega na viticultura de precisão

Por

Rui Miguel Leandro Pires

**Orientador:** Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos

**Co-orientador:** Doutor Aureliano Natálio Coelho Malheiro

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

para obtenção do grau de

MESTRE

em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, de acordo com o disposto no

DR – I série – N.º151, Decreto-Lei n.º 115/2013 de 7 de Agosto e no

Regulamento de Estudos Conducente ao Grau de Mestre da

UTAD DR, 2.ª série – N.º149 de 4 de Agosto de 2011



*Orientação Científica :*

**Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos**

Professor Associado com Agregação do  
Departamento de Engenharias da Escola de Ciências e Tecnologia  
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

**Doutor Aureliano Natálio Coelho Malheiro**

Professor Auxiliar do  
Departamento de Agronomia da  
Escola de Ciências Agrárias e Veterinárias da  
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro



*‘Que as dificuldades dos meus dias não me roubem a minha fé de vencer.’*

*Priscilla Rodighiero*

*Aos meus pais, irmãos, avós e namorada*



UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO  
Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Os membros do Júri recomendam à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro a aceitação da dissertação intitulada “**Estudo de indicadores para gestão de rega na viticultura de precisão**” realizada por **Rui Miguel Leandro Pires** para satisfação parcial dos requisitos do grau de **Mestre**.

Dezembro 2018

Presidente: **Doutor João Agostinho Lacerda Pavão,**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharias da Escola de  
Ciência e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto  
Douro

Vogais do Júri: **Doutor João Luis Honório Matias,**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharias da Escola de  
Ciência e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto  
Douro

**Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos,**  
Professor Associado com Agregação do Departamento de  
Engenharias da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de  
Trás-os-Montes e Alto Douro



# Estudo de indicadores para gestão de rega na viticultura de precisão

*Rui Miguel Leandro Pires*

Submetido na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro  
para o preenchimento dos requisitos parciais para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

**Resumo** — Com a evolução do desenvolvimento tecnológico do últimos anos, a demanda por sistemas de monitorização das condições de desenvolvimento das culturas tem colocado as práticas agrícolas num outro nível. Na verdade, a aquisição de dados associada a metodologias e algoritmos que apoiam decisões para a melhor prática agrícola tem tornado a agricultura mais sustentada.

Esta dissertação visa o estudo de indicadores para gestão de rega na viticultura de precisão, no que resulta um protótipo adequado à gestão eficiente da rega.

Neste trabalho foi utilizado o Raspberry Pi 3 model B+, ao qual foram acoplados sensores adequados à leitura dos parâmetros julgados mais relevantes. Foram usados sensores que melhor definem as necessidades principais da planta e do ambiente em torno da mesma. Todos os dados adquiridos pelo protótipo, incluindo imagem, foram periodicamente enviados para uma nuvem privada e tornados disponíveis para alimentarem sistemas de apoio à decisão com o objetivo de melhorar a eficiência de rega.

Os resultados em laboratório convenceram de que se trata de um sistema económico e potenciador destas práticas.

**Palavras Chave:** Agricultura de precisão, sistema de gestão rega, sensorização, raspberry pi, necessidades hídricas, sensores, SDI-12.



# Study of indicators for irrigation management in precision viticulture

*Rui Miguel Leandro Pires*

Submitted to the University of Trás-os-Montes and Alto Douro  
in partial fulfillment of the requirements for the degree of  
Master of Science in Electrical Engineering and Computers

**Abstract** — With the evolution of technological development in recent years, the demand for systems to monitor the conditions of crop development has put agricultural practices to another level. In fact, the acquisition of data associated with methodologies and algorithms that support decisions for the best agricultural practice has made agriculture more sustainable.

This dissertation is aimed at the study of indicators for irrigation management in precision viticulture, resulting in a prototype suitable for efficient irrigation management.

In this work the Raspberry Pi 3 model B + was used, to which were coupled sensors adapted to the reading of the parameters considered more relevant. Sensors were used that best define the plant's main needs and the surrounding environment. All data acquired by the prototype, including image, were periodically sent to a private cloud and made available to power decision support systems with the aim of improving irrigation efficiency.

The results in the laboratory convinced that it is an economic system and an enhancer of these practices.

**Key Words:** Precision agriculture, system management of irrigation, sensing, raspberry pi, water needs, sensors, SDI-12.



# Agradecimentos

---

Os meus agradecimentos institucionais ao Magnífico Reitor da Universidade de Trás-os-Montes de Alto Douro, Professor Doutor António Fontainhas Fernandes, pelas facilidades concedidas à realização dos estudos conducentes ao grau de Mestre.

Ao Professor Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharias da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, orientador deste trabalho pela sua motivação, sugestões, orientações e paciência para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Aureliano Natálio Coelho Malheiro, Professor do Departamento de Agronomia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, orientador deste trabalho pela sua motivação, sugestões, orientações e paciência para a realização deste trabalho

Ao Engenheiro Nuno Miguel Silva, Investigador da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, pelo grande apoio e disponibilidade durante todo o processo deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos Jorge Mendes e André Ferraz, pela ajuda, companheirismo e amizade que contribuíram para a finalização deste trabalho.

A todos os meus colegas deste grande curso de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, pelo convívio, apoio e amizade ao longo de destes anos, em especial, António Pereira, José Barreiro, Jean Paiva, Stefan Vidal, Patrick Vidal, Diogo Valente, Luis Santos, Artur Martins, Carlos Coelho, Nuno Penelas e Diogo Faceira que mais que colegas se tornaram amigos que levo comigo para a vida.

A todos os meus amigos de infância que nunca deixaram de me apoiar nesta caminhada em especial, André Vilela, Marcos Vinicius, Carlos Costa, Sara Reis, Fábio Sigre, Sebastião Lordelo, irmãos Melo, João Pedro, Ricardo Machado e Tiago Teixeira.

À minha namorada Inês Reis, por sempre estar do meu lado, mesmo nos momentos mais complicados, pelo apoio e amizade que contribuíram para a finalização do meu percurso académico.

Aos meus pais e irmãos, pelo incentivo e acompanhamento ao longo deste trabalho e ao longo de todos estes anos, pois sem eles nada disto seria possível. Agradeço a oportunidade que me deram para poder ter um percurso académico digno.

UTAD

Vila Real, 10 de Abril de 2018

Rui Miguel Leandro Pires

# Índice geral

---

Resumo	xi
<i>Abstract</i>	xiii
Agradecimentos	xv
Índice de tabelas	xxi
Índice de figuras	xxiii
Acrónimos e abreviaturas	xxvii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Sistemas de rega inteligente . . . . .	4
1.2 Indicadores de rega na viticultura . . . . .	5
1.3 Motivação e enquadramento . . . . .	6
1.4 Organização da dissertação . . . . .	6
<b>2 Necessidades hídricas das plantas</b>	<b>9</b>
2.1 Evapotranspiração das plantas . . . . .	9
2.1.1 Transpiração . . . . .	10
2.1.2 Evaporação . . . . .	11
2.1.3 Estimativa da evapotranspiração . . . . .	11
2.2 Métodos de avaliação do estado hídrico das plantas . . . . .	14
2.2.1 Método visual . . . . .	15

2.2.2	Método de temperatura foliar . . . . .	15
2.2.3	Método de potencial hídrico foliar . . . . .	16
2.2.4	Transpiração relativa . . . . .	18
2.2.5	Método de dendrometria . . . . .	20
2.3	Resumo . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Sistema de rega inteligente</b>	<b>23</b>
3.1	Revisão do estado da arte . . . . .	24
3.2	Discussão . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Protótipo de sistema de monitorização</b>	<b>35</b>
4.1	Requisitos funcionais . . . . .	35
4.2	Arquitetura do sistema . . . . .	37
4.3	Módulos periféricos . . . . .	39
4.3.1	Processamento e controlo . . . . .	39
4.3.2	Norma SDI-12 . . . . .	40
4.3.3	Barramento SPI . . . . .	44
4.3.4	Sensores . . . . .	45
4.3.5	Dispositivo de imagem . . . . .	49
4.3.6	Conetividade com o exterior . . . . .	50
4.3.7	Alimentação elétrica do protótipo . . . . .	50
4.4	Serviços de software . . . . .	51
4.4.1	Sistema operativo . . . . .	52
4.4.2	Base de dados local . . . . .	54
4.4.3	Sistema de gestão de base de dados . . . . .	55
4.4.4	Serviços cron . . . . .	55
4.4.5	Algoritmo principal . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Resultados obtidos e discussão</b>	<b>61</b>
5.1	Avaliação em laboratório . . . . .	61
5.2	Plataforma mySense . . . . .	63
5.3	Implementação da base de dados local . . . . .	64
5.4	Procedimento de software . . . . .	66
5.4.1	Sensores de saída analógica . . . . .	66
5.4.2	Sensores SDI-12 . . . . .	67
5.4.3	Aquisição de imagem . . . . .	67
5.4.4	Procedimento de transferência de dados . . . . .	68
5.5	Recolha de dados . . . . .	69
5.6	Discussão . . . . .	75

<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalho futuro</b>	<b>77</b>
6.1	Conclusões . . . . .	77
6.2	Perspetivas de trabalho futuro . . . . .	78
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Código do protótipo</b>	<b>91</b>
A.1	Script para recolha de dados . . . . .	91
	A.1.1 Script para uso da norma SDI-12 . . . . .	101
A.2	Script para recolha de imagens . . . . .	106
A.3	Script para envio de dados para o mySense . . . . .	109
A.4	Script para apagar dados da base de dados local . . . . .	116
A.5	Script PHP para o envio de imagens . . . . .	117



# Índice de tabelas

---

2.1	Valores de coeficiente cultural . . . . .	13
2.2	Resumo de alguns sensores usados na determinação das necessidades hídricas das plantas. . . . .	22
4.1	Trama de dados SDI-12. . . . .	42
4.2	Comandos e respostas SDI-12. . . . .	43
4.3	Significados dos caracteres usados nos comandos SDI-12. . . . .	44
4.4	Especificações do sensor 237-L de folha húmida. . . . .	48
4.5	Especificações do sistema de alimentação. . . . .	51



# Índice de figuras

---

1.1	Bomba de água, desenhada pelo grego chamado Dános. . . . .	2
1.2	Diagrama de fluxo de um sistema de rega inteligente. . . . .	5
2.1	Métodos de avaliação do estado hídrico da planta. . . . .	14
2.2	Câmara de pressão. . . . .	17
2.3	Sonda de Granier. . . . .	18
2.4	Dendrometria. . . . .	21
3.1	Conceito de rega inteligente associado a este trabalho. . . . .	24
3.2	Arquitetura do sistema desenhado por Satyanarayana and Mazaruddin (2013). . . . .	25
3.3	Configuração do sistema de rega automatizado. . . . .	26
3.4	Diagrama de rega em malha fechada utilizado por Ooi et al. (2008). . . . .	27
3.5	Layout conceitual do sistema da rede de sensores sem fio em campo para rega específica do local apresentada por Kim et al. (2008). . . . .	28
3.6	Esquema apresentado por Dursun and Ozden (2011) para a rega de cerejeiras anãs. . . . .	29
3.7	Diagrama de blocos para sistema de rega inteligente. Proposto por Sahu and Behera (2015). . . . .	30

3.8	Diagrama de blocos para SSW. Proposto por Moghaddam et al. (2010).	31
3.9	Diagrama de blocos para o sistema implementado por Gawali and Chaudhari (2016).	32
4.1	Diagrama funcional do protótipo implementado.	38
4.2	Raspberry Pi 3 Model B+.	40
4.3	Ilustração de sistema básico SDI-12.	41
4.4	Temporizações da norma SDI-12.	42
4.5	O sensor DHT22.	45
4.6	O pluviómetro RG2+M-06.	46
4.7	O Dendrómetro DD-L.	47
4.8	Sensor 237-L.	48
4.9	O sensor 5TE.	49
4.10	Webcam HP HD 2300.	49
4.11	Router Wi-Fi Huawei E533.	50
4.12	Raspberry + Debian = Raspbian.	52
4.13	Diagrama E-R.	54
4.14	Tabelas presentes na base de dados local.	54
4.15	Visão geral da ferramenta de administração de bases de dados MySQL, phpMyAdmin.	55
4.16	Comandos básicos do crontab.	56
4.17	Fluxograma relativo ao algoritmo geral de funcionamento do protótipo.	58
5.1	Protótipo implementado.	62
5.2	Plataforma <b>mySense</b> .	63
5.3	Página geral do objeto da plataforma <b>mySense</b> e, canais existente.	64
5.4	Resultados de envio de dados para a base de dados local.	65
5.5	Conjunto de resultados dos dados de multimédia na base de dados local.	65
5.6	Gáfico com os resultados obtidos através do <b>mySense</b> .	69
5.7	Gráfico ilustrativo aos resultados dos dados do sensor de folha húmida na plataforma <b>mySense</b> .	70





# Acrónimos e abreviaturas

---

## Lista de acrónimos

<b>Sigla</b>	<b>Expansão</b>
ADC	<i>Analog Digital Converter</i>
AP	Agricultura de precisão
E	Evaporação
ET	Evapotranspiração
$ET_0$	Evapotranspiração de referência
$ET_c$	Evapotranspiração da cultura
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
GPIO	General Purpose Input/Output
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
IoT	<i>Internet of things</i> (Internet das coisas)
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
$K_c$	Coefficiente cultural

<b>Sigla</b>	<b>Expansão</b>
MDS	<i>Maximun daily shrinkage</i> (Contração máxima diário)
PM	Método de Penman-Monteith
SBC	<i>Single Board Computer</i>
SDT	Sonda de dissipação térmica
SDV	<i>Stem diameter variation</i> (Variação do diâmetro do caule)
SGR	<i>Stem growth rate</i> (Taxa de crescimento do caule)
T	Transpiração
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
VP	Viticultura de precisão
VWC	<i>Volumetric water content</i> (Conteúdo volumétrico de água no solo)
WIU	<i>Wireless information unit</i>
WLAN	<i>Wireless local area network</i>
WPAN	<i>Wireless personal area network</i>
WSN	<i>Wireless sensor network</i>
WSU	<i>Wireless sensor unit</i>

## Lista de abreviaturas

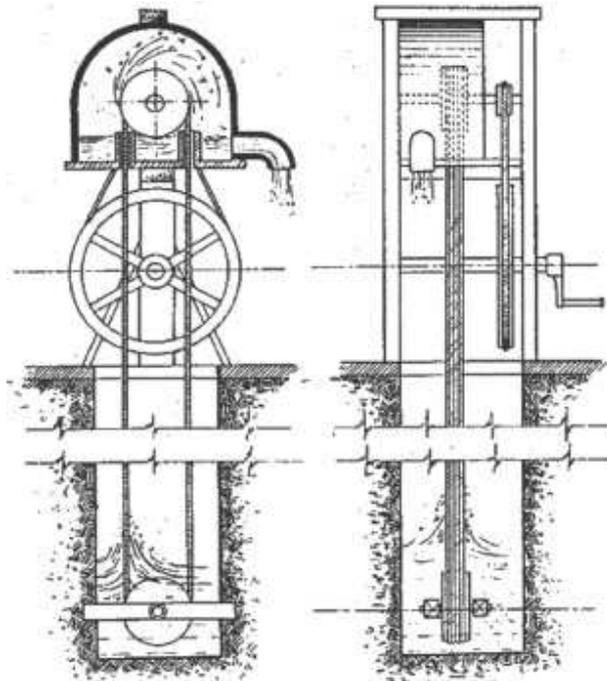
<b>Abreviatura</b>	<b>Significado(s)</b>
et al.	e outros (autores)
etc.	etcetera, outros
i.e.	isto é, por conseguinte
vs.	versus, por comparação com



# Introdução

---

Desde o início dos tempos que o Homem pratica o uso de rega, Fig. 1.1, para tirar rendimento dos seus cultivos agrícolas. A rega é uma prática usada na agricultura com a finalidade de colmatar a insuficiente precipitação num determinado período do ciclo vegetativo de uma cultura numa dada região. De uma forma geral, os nossos antepassados tiravam partido do que os rodeavam para conseguirem obter a melhor técnica de regadio na zona em que habitavam. Nos princípios limitavam-se a tirar partido das cheias naturais dos grande rios mas, com o evoluir das eras, o Homem começou a estabelecer técnicas de regadio mais eficientes ([Magalhães, 2016](#)).



**Figura 1.1** – Bomba de água, desenhada pelo grego chamado Dános.

Com o avançar dos anos, com a evolução da sociedade, a revolução industrial, muitos fatores contribuíram para as alterações climáticas, sendo que, a agricultura em geral viu-se forçada a adaptar não só a forma de cultivo mas também as técnicas de regadio, dada a incerteza relativa à definição das estações chuvosas e as estações onde a escassez de água é maior (Carvalho et al., 2016).

Com estas alterações e com a crescente demanda de água doce, este bem precioso é cada vez menor face às necessidades humanas. Cerca de 80 % da água consumida pela agricultura é utilizada na rega. Considerando a escassez de água, ao longo dos últimos anos diferentes estratégias têm vindo a ser seguidas no sentido de otimizar o seu consumo, regando apenas o estritamente necessário e de modo a suprir as necessidades hídricas das plantas. É então fundamental aferir essas necessidades, cuja quantificação poderá ser obtida por diferentes metodologias, onde o uso da eletrónica e dos computadores, nomeadamente sensores e sistemas inteligentes prestam um papel preponderante. Estas tecnologias permitem avaliar

---

as necessidades do solo e da planta dando assim resposta de quando e quanto regar. O combinar destas vertentes da engenharia eletrotécnica leva à promoção do conceito de rega de precisão (Fernandes, 2017) enquadrada na agricultura de precisão (AP).

A AP, pode ser entendida como um ciclo de processos que influenciam o desenvolvimento de espécies cultivadas através da recolha de informação de parâmetros específicos (Wall, 2001; Kim et al., 2008; Fernandes, 2017). Taylor and Whelan (2005) definem a AP, como sendo um sistema de produção agrícola para incrementar a eficiência, a rentabilidade e a produtividade de uma cultura tendo em conta as variabilidades espacial e temporal.

No entanto, o conceito de AP é utilizado para práticas agrícolas em geral, sendo que outros termos têm sido aplicados para especificações de diferentes áreas dentro da agricultura. Importa referir nesta dissertação a Viticultura de Precisão (VP), área de estudo onde se encontra inserida o tema abordado (Morais et al., 2008).

Sensores de fluxo de seiva, de teor de água no solo, dendrómetros, e outros sensores permitem avaliar a dinâmica hídrica na planta, de forma a determinar a necessidade de rega de uma dada cultura. Ao nível de sensores de fluxo de seiva, Granier, em 1985, propôs o método de dissipação de calor para estudos de transpiração, que permitiria calcular a densidade de fluxo de seiva. Este método é baseado no aquecimento de um segmento do tronco, por uma fonte de calor (sonda de aquecimento contínuo), onde a energia térmica fornecida é dissipada através de convecção entre a sonda de aquecimento e uma sonda de referência (não aquecida) permitindo o cálculo do fluxo de seiva. Outros sensores como o dendrómetro, que mede as variações do troco da planta, bem como sensores de conteúdo volumétrico de água no solo, são também auxiliares preciosos na determinação das necessidades hídricas. Finalmente, os sistemas de aquisição de dados que permitem uma recolha contínua e ininterrupta destas variáveis para um repositório em nuvem sobre o qual correm algoritmos que realizam o cálculo das necessidades hídricas das plantas e permitem determinar a altura e quantidade de água a dispender numa determinada localização. Estamos, portanto, perante sistemas inteligentes de rega que medem as necessidades e aplicam a água estritamente necessária a suprir as reais necessidades

de rega evitando o desperdício.

## 1.1 Sistemas de rega inteligente

A água é essencial à vida e, como tal, um fator de desenvolvimento das culturas na agricultura. A água é um fator limitante para a produção de uma cultura, pois o excesso ou a sua falta no solo afeta o crescimento e o desenvolvimento da planta. Para se obter uma produção de qualidade é necessário conhecer as relações hídricas da cultura e do solo, sendo que, através desse conhecimento é possível viabilizar uma melhor gestão da água despendida na rega (Pupin et al., 2010).

Segundo Testezlaf (2010), um sistema de rega inteligente visa gerir a quantidade de água que é utilizada e a minimização dos custos de operação. Este tipo de sistema tem de ser capaz, através do auxílio de dados recolhidos por sensores, de determinar quais os momentos em que se deve iniciar e terminar o processo de rega da planta, como ilustrado na Fig. 1.2. A determinação do momento certo para que este processo se inicie é:

- Não exceder o stress hídrico da cultura;
- A água presente no solo não pode ultrapassar o nível crítico da planta.

O momento de para a irrigação dependerá da quantidade de água presente no solo, que não pode ultrapassar a capacidade de armazenamento (note-se que no caso da videira é desejável um stress hídrico moderado, particularmente durante a maturação), pelo sistema radicular da planta. Para tal, é necessário tempo suficiente para que seja reposta a água consumida pela planta.

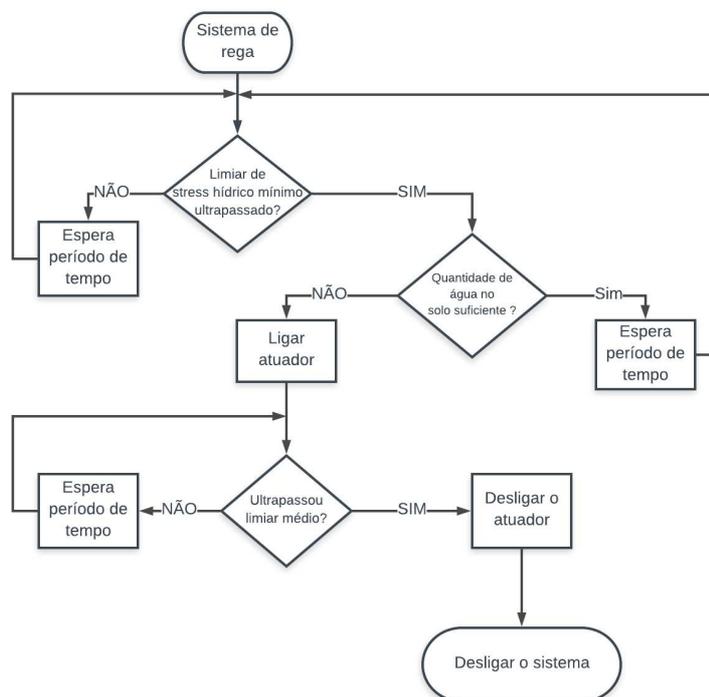


Figura 1.2 – Diagrama de fluxo de um sistema de rega inteligente.

## 1.2 Indicadores de rega na viticultura

Várias metodologias têm sido estudadas ao longo dos últimos anos para se compreender a melhor forma de regar. Estes estudos são baseados numa análise do estado hídrico da planta, para assim se obter uma gestão eficiente da rega. Com o uso cada vez mais comum de tecnologias avançadas de eletrónica e de sensores inteligentes, a monitorização referente ao stress hídrico das plantas, obtidos através de indicadores baseados em medidas automáticas e contínuas, permitem estabelecer um limiar na decisão de quando regar.

Para tomar uma decisão correta de rega, algum conhecimento de fisiologia vegetal é necessário, nomeadamente o stress hídrico e o facto do armazenamento de água no solo não poder ultrapassar o nível crítico da planta (Remorini and Massai,

2003). Esta tomada de decisão depende assim de vários fatores sendo que, os mais importantes para este estudo são a cultura em questão, a videira, o solo e por último o sistema de rega.

A cultura da planta é o fator mais importante para se estabelecer os parâmetros corretos de quando regar. Estes fatores incidem principalmente sobre o stress hídrico da planta, sendo que este pode ser estudado através de vários métodos que disponibilizam índices para uma melhor gestão do estado da planta. [Remorini and Massai \(2003\)](#) referem que estes índices podem ser obtidos mediante técnicas como a determinação do fluxo de seiva, potencial hídrico e dendrômetria.

### 1.3 Motivação e enquadramento

Face ao gasto indesejável de água no âmbito da agricultura, é necessária a procura de alternativas viáveis que permitam suprir as necessidades hídricas das plantas de uma forma o mais sustentada possível, isto é, aplicar água quando e onde é necessária. Sistemas de rega inteligente permitem não só otimizar água, um recurso natural cada vez mais escasso, mas também permite que o agricultor obtenha um cultivo mais eficiente. O uso de diferentes tipos de sensores, combinados, uso de plataformas de processamento computacional assente no paradigma de Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT) e conceção de sistemas de apoio à decisão permitirão um ganho de competências na recolha e processamento de dados no local, com vista à monitorização contínua dessas variáveis ao longo do ciclo vegetativo da planta.

### 1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. No presente capítulo fez-se uma introdução de enquadramento e apresentou-se a motivação do trabalho.

O capítulo 2 inicia-se com uma abordagem às necessidades hídricas das plantas,

onde se efetua uma passagem pelas definições mais importantes quando se afere o estado hídrico da planta, a evapotranspiração e suas vertentes a transpiração e a evaporação. Seguidamente faz-se um levantamento dos métodos de deteção do estado hídrico das plantas.

Sistemas de rega inteligente são apresentados no capítulo 3, que usa compreender a demanda associada a este tipo de sistemas.

Com base no conhecimento adquirido, propõe-se, no capítulo 4, um protótipo de um sistema de aquisição de dados numa lógica de plataforma IoT que adquire dados periodicamente e os envia, através de uma ligação GSM/GPRS para uma plataforma de IoT, denominada **mySense**, os dados adquiridos pelos sensores combinados de teor de água, condutividade elétrica e temperatura do solo, sensor de humectação da folha, de volume do caule, de quantidade de precipitação por determinado tempo e zona e um sensor combinado de temperatura e humidade relativa do ar .

O capítulo 5 está reservado à apresentação e discussão dos resultados obtidos com o protótipo, quer em ambiente laboratorial, quer no seu uso numa vinha da UTAD, durante o pouco tempo disponível para o efeito.

No capítulo 6 apresentam-se algumas conclusões e perspetiva-se o trabalho subsequente que pode ser levado a cabo no futuro.



# 2

## Necessidades hídricas das plantas

---

A avaliação do estado hídrico das plantas é, por princípio, essencial em qualquer estratégia de rega inteligente. Para tal, é necessário que um conjunto de conceitos básicos sobre o uso de água por parte das plantas seja apreendido. Este capítulo aborda a transpiração das plantas, assim como um enquadramento dos fatores que contribuem para a transpiração. Posteriormente são apresentados os métodos mais comuns para a avaliação do estado hídrico das plantas.

### 2.1 Evapotranspiração das plantas

A evapotranspiração é um termo muito estudado devido à sua importância na estimativa do consumo de água pelas plantas. [Penman \(1948\)](#), define a evapotranspiração potencial como sendo o processo responsável pela transferência de água a partir de fontes terrestres de superfície totalmente coberta de vegetação verde, de baixo porte, em pleno desenvolvimento e sem restrição de água no solo para a atmosfera tendo um papel importante no ciclo hidrológico ([Medeiros, 2002](#)).

Contudo, dadas as diferenças entre as culturas, foi necessário encontrar um conceito geral para o termo da evapotranspiração. Esta representa o consumo de água por

parte de uma cultura, geralmente medida em milímetro por dia (mm/dia).

A evapotranspiração,  $ET$ , combina dois processos: a transpiração,  $T$ , das plantas e a evaporação direta de água do solo,  $E$  (Richard G. Allen, 1998).

Ao longo dos tempos o conceito de evapotranspiração tem sofrido alterações, uma vez que é um processo que está incluído em diversas áreas. Na agricultura a evapotranspiração contribui para a quantificação do volume de água que as plantas necessitam durante o seu ciclo. Segundo Oliveira (2007), no âmbito da agricultura existem duas definições vistas como sendo de grande interesse para melhor monitorizar as culturas em produção, sendo elas:

- **Evapotranspiração de referência**,  $ET_0$  - é a evapotranspiração de uma extensa superfície vegetada (normalmente relva), em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, com altura entre 8 e 15 cm ( $IAF = 3$ ), sem restrição hídrica. Nesse caso a  $ET$  depende apenas das variáveis meteorológicas.
- **Evapotranspiração da cultura**,  $ET_c$  - é a evapotranspiração de uma cultura específica sob condições particulares de disponibilidade de água.

### 2.1.1 Transpiração

A transpiração  $T$ , consiste na perda de água líquida através dos tecidos foliares, da planta para a atmosfera. Este processo permite que a planta tenha uma regulação da quantidade de água existente nela própria. Isto é, a água que flui nas plantas desde a raiz até às folhas onde se encontram os estómas onde ocorre o processo de transpiração na planta sob a forma de vapor para a atmosfera impedindo a destruição dos tecidos da planta. O processo de transpiração engloba duas estruturas diferentes da planta: as cutículas e os estómas. As cutículas impedem, normalmente, a desidratação da planta enquanto que os estómas abrem e fecham consoante a existência de maior ou menor disponibilidade de água na planta. Como as plantas estão sob influência direta do sol e, em consequência de radiação solar intensa, a

perda de água pode tornar-se um problema e levar à desidratação e morte da mesma devido à perda excessiva de água, pelo que os estómas funcionam como reguladores (Almeida, 2015).

### 2.1.2 Evaporação

Processo pelo qual os átomos ou moléculas no estado líquido ganham energia suficiente para passar ao estado gasoso, isto é quando a água numa superfície livre ou húmida, passa para a atmosfera na forma de vapor, a uma temperatura inferior à de ebulição.

A evaporação é a via primária pela qual a água se move do estado líquido de volta ao ciclo da água como vapor de água atmosférica. Estudos mostraram que os oceanos, mares, lagos e rios fornecem cerca de 90 % da humidade na atmosfera por evaporação, com os 10 % restantes atribuídos à transpiração das plantas (Survey, 2016).

### 2.1.3 Estimativa da evapotranspiração

A evapotranspiração tem um papel fundamental na decisão da quantidade de água necessária para regar as plantas, pois é através dela que é obtida uma estimativa de água perdida pela planta.

Segundo Silva et al. (2008), o processo de evapotranspiração, determina-se pela quantidade de energia disponível para vaporizar a água, sendo que, os métodos mais comuns para determinação dos fluxos de calor latente são: o método das flutuações instantâneas, o método aerodinâmico e a razão de Bowen (Monteith, 1981; Pereira et al., 1997; Silva et al., 2008).

Segundo a literatura, para o cálculo de evapotranspiração é geralmente utilizado o procedimento clássico da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e para a Agricultura, FAO, fazendo uso de coeficientes culturais ( $K_c$ ), e ao cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) (Doorenbos and Pruitt, 1992; Allen et al.,

1998).

Penman (1948) inicialmente estabeleceu uma equação para a estimativa da evapotranspiração, a qual seria modificada por Monteith até se alcançar a equação que hoje é conhecida como equação padrão de *Penman-Monteith* adotada pela FAO, equação (2.1) e, utilizada por muitos investigadores (Silva et al., 2008).

$$\lambda ET_{PM} = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \delta e / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad (2.1)$$

onde  $ET$  = Evapotranspiração ( $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ );  $\Delta$  = Declive da curva da saturação do vapor;  $R_n$  = Radiação líquida ( $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ );  $G$  = Densidade do fluxo de calor do solo ( $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ );  $\lambda$  = Calor latente de vaporização da água ( $\text{MJkg}^{-1}$ );  $\rho$  = Massa volumétrica do ar;  $C_p$  = Calor específico do ar ( $\text{kJkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ );  $e$  = *déficit* de pressão de vapor ( $\text{kPa}$ );  $\delta$  = Taxa de variação de saturação específica, humidade, temperatura; ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\gamma$  = Constante psicrométrica ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $r_a$  = Resistência aerodinâmica ( $\text{sm}^{-1}$ );  $r_c$  = Resistência do copado ( $\text{sm}^{-1}$ ).

Dada a dificuldade em determinar a totalidade das variáveis anteriores (por exemplo  $r_c$ ) é geralmente realizada uma estimativa da evapotranspiração cultural ( $ET_c = ET_0 \times K_c$ ) recorrendo ao procedimento clássico da FAO fazendo uso de coeficientes culturais ( $K_c$ ), e evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) (Doorenbos and Pruitt, 1992). A  $ET_0$  é a evapotranspiração de uma cultura de referência (relva), e pretende refletir o efeito das condições climáticas nas necessidades hídricas das plantas. Portanto, é uma variável climática, exprimindo o poder evaporativo da atmosfera, e pode ser calculada a partir de dados climáticos.

A FAO tomou em consideração o método de Penman-Monteith ( $PM$ ) como padrão do cálculo para a estimação da evapotranspiração de referência (Allen et al., 1998; Richard G. Allen, 1998).

Esta equação assenta nos princípios matemáticos expostos na equação (2.2).

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} \cdot U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 3,34 \cdot U_2)} \quad (2.2)$$

onde  $ET_0$  = Evapotranspiração de referencia ( $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ );  $R_n$  = Radiação líquida ( $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ );  $G$  = Densidade do fluxo de calor do solo ( $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ );  $T$  = Temperatura média do ar a 2 metros de altura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $U_2$  = Velocidade do vento a 2 metros de altura ( $\text{sm}^{-1}$ );  $e_s$  = Pressão de vapor de saturação ( $\text{kPa}$ );  $e_a$  = Pressão real de vapor ( $\text{kPa}$ );  $\Delta$  = Declive da curva da saturação do vapor ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\gamma$  = Constante psicrométrica ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

A Tabela 2.1.3, apresenta os valores do coeficiente cultural para algumas espécies vegetais.

Espécie	Valores de $K_c$	
	Baixos	Altos
Vinha (semelhante a arbustos)	0,60	0,80
Oliveira	0,58	0,80
Citrinos	0,65	0,65
Relvados (esp. estação fria)	0,80	0,60
Relvados (esp. estação quente)	0,60	0,60
Árvores (folha caduca)	0,50	0,97
Árvores (folhas caduca com coberto vegetal)	0,98	1,27

\*os valores baixos são para árvores temporãs (Março/Abril) e os altos para a média estação (Maio/Junho).

**Tabela 2.1** – Valores do coeficiente cultural (Costello et al., 1992).

Este cálculo incide na quantidade de água que é perdida pelas plantas por evapotranspiração, uma vez conhecidas as características envolventes.

## 2.2 Métodos de avaliação do estado hídrico das plantas

Para aferir a quantificação das necessidades hídricas é recorrente a utilização de diversas metodologias. Cada vez mais viáveis, é importante referir algumas tecnologias que possibilitam essa viabilidade dos métodos. A Fig. 2.1, representa alguns desses métodos e suas variáveis de estudo.

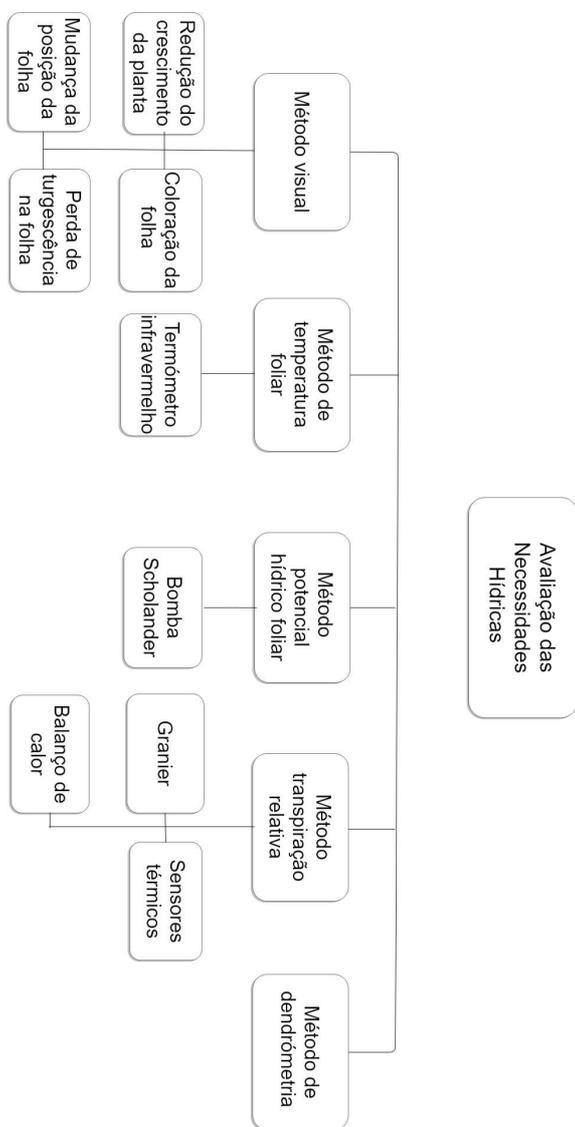


Figura 2.1 – Métodos de avaliação do estado hídrico da planta.

### 2.2.1 Método visual

Um dos métodos que permite obter vários indicadores sobre o stress hídrico da planta é o método visual. Este método incide na recolha de dados que possam ser relevantes para a caracterização de um perfil do estado da planta. Este método apoia-se no simples facto de não ser necessário qualquer auxílio de cálculos e qualquer tipo de implementação para obter-se um indicador, embora nem sempre preciso e com a devida exatidão. A partir do método visual, conseguem-se obter indicadores relevantes para se conhecer o estado da planta como a perda de turgescência na folha, a mudança da posição e coloração da folha bem como uma redução do seu crescimento.

### 2.2.2 Método de temperatura foliar

A menor disponibilidade de água no solo provoca um aumento da resistência estomático (fecho parcial ou total do estóma) e, conseqüentemente, uma diminuição de libertação de dióxido de carbono pela fotossíntese, reduzindo assim a transpiração e levando ao aumento da resistividade estomática e stress hídrico. Segundo [Tanner \(1960\)](#), se a transpiração decresce, e a estrutura do vento e o balanço de radiação se mantêm iguais, a ascensão da água até às folhas será menor levando a um aumento da temperatura foliar.

A temperatura foliar ou da canóia tem sido utilizado como indicador de stress hídrico para fins de monitorização de áreas irrigadas ([Gonzalez-Dugo et al., 2014](#); [Taghvaeian et al., 2012](#)). Este método recorre a sensores de infravermelho, por meio de um termopar ou de termómetros de infravermelho, sobre folhas que se encontram expostas à radiação solar direta ao longo do dia ([Sanmartín and Acevedo, 2001](#)). Devido à absorção da radiação solar incidente, quanto menor a quantidade de água transpirada, maior será o aquecimento das folhas em relação ao ar ([Jackson, 1982](#)). Com este método é possível obter a diferença de temperatura entre plantas que se encontram em stress hídrico ou não.

As plantas bem irrigadas apresentam-se com uma temperatura da canóvia inferior à do ar, e nas plantas sob stress hídrico a temperatura da canóvia é maior ou igual à temperatura do ar. A termometria por infravermelho pode ser utilizada para estimar índices, através da diferença entre a temperatura do ar e a temperatura foliar, e da disponibilidade de água no solo (Idso et al., 1977). A utilização deste método é de uso relativamente fácil e rápido na obtenção das medições, não necessitando de contacto ou destruição da planta em estudo (Kirkham, 2014). Contudo, este método apresenta dificuldades no seu uso devido a fatores ambientais.

### 2.2.3 Método de potencial hídrico foliar

Este método afere ao estudo do potencial hídrico foliar ( $\psi_w$ ) da planta através de uma câmara de pressão (Magalhães, 2008; Magalhães, 2012). Scholander et al. (1964), descreve uma câmara de pressão, Fig. 2.2(a), capaz de medir o potencial hídrico da planta, em unidades de pressão (bar ou MPa). Esse potencial é obtido através de duas medições:

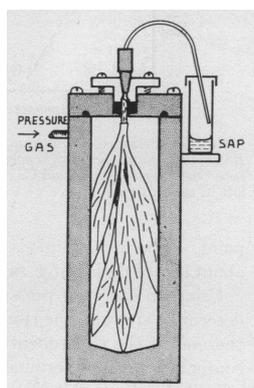
- Potencial hídrico foliar de base;
- Potencial hídrico foliar diário;

O potencial hídrico de base é medido de madrugada já que estudos admitem que nessa altura do dia haja equilíbrio entre o potencial de água no solo e o potencial de água na planta, não estando suscetível à transpiração e às condições meteorológicas durante a medição (Magalhães, 2008; Magalhães, 2012). O potencial hídrico foliar diário, é sujeito às condições meteorológicas durante a medição e está suscetível à transpiração, sendo que as medições feitas para obter estes dados é feita de preferência ao meio dia (Carbonneau, 2002; Magalhães, 2008).

Este potencial é medido através de uma câmara de pressão, onde é aplicada uma pressão sobre uma folha extraída da videira e colocando-a no interior da câmara. Após o corte da folha e sua colocação na câmara é necessário aguardar até que surja

uma gota de água no pecíolo cortado, o que permitirá estimar a capacidade das células em captarem água livre, sendo que quanto menor essa quantidade de água maior terá de ser a pressão exercida pela câmara (Lousada, 2015).

A câmara de Scholander possui a vantagem de ser um método portátil que possibilita a determinação do potencial hídrico das plantas, tornando a sua utilização no terreno vantajosa. Assim, pode-se retirar a folha da planta desejada e evitar alterações ao nível do seu estado hídrico, obtendo valores sobre as mudanças do seu estado hídrico (Gálvez Pavez et al., 2011). Estes valores são indicadores de como a planta reage à quantidade de água nos solos, permitindo assim uma melhor monitorização do seu estado hídrico.



(a)



(b)



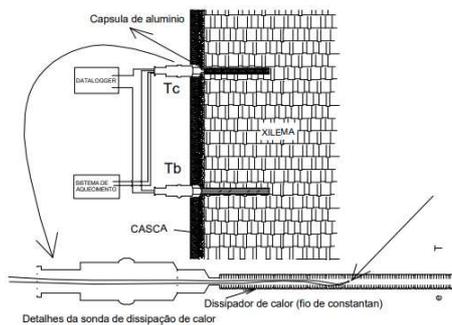
(c)

**Figura 2.2** – Câmara de pressão: (a) Bomba de pressão descrita por Scholander et al. (1964); (b) Câmara de pressão modelo 615 equivalente à bomba de Scholander et al. (1964); (c) Uma folha anexada a um pecíolo é colocada dentro de uma câmara selada e o gás pressurizado é adicionado lentamente à câmara. Adaptado de Danielle (2016).

### 2.2.4 Transpiração relativa

A transpiração relativa,  $TR$ , corresponde à razão entre a transpiração de uma parcela sob stress hídrico e a transpiração de uma parcela bem regada. A  $TR$  é útil na determinação do consumo de água, podendo ser correlacionada com um indicador de stress hídrico, como o potencial hídrico foliar. A  $TR$  pode então ser determinada através de medições de fluxo de seiva xilémica (*sap flow*) realizadas simultaneamente em plantas nas duas situações hídricas referidas. Dentro dos métodos de medição de seiva xilémica daremos particular ênfase ao de dissipação térmica pela sua simplicidade e menor custo.

Ainda que existam métodos que permitem o relacionamento da transpiração com o fluxo de seiva, nesta dissertação o estudo incide na sonda de Granier ou sonda de dissipação térmica, SDT, proposta originalmente por Granier (1985), Fig. 2.3(a).



(a)



(b)

**Figura 2.3** – Sonda de Granier: (a) Esquema do sensor de Granier inserida perpendicularmente ao tronco de uma árvore (Delgado-Rojas et al., 2007); (b) Aplicação da sonda de Granier.

A SDT utiliza princípios relativamente simples podendo ser aplicada diretamente no campo sem necessidade de alterar as condições fisiológicas da planta (Delgado-Rojas et al., 2007; Fernández et al., 2001; Tatarinov et al., 2005). A equação (2.3), conhecida pela expressão empírica de Granier ( $k$ ) permite estimar o fluxo de seiva de uma planta ( $J_s$ ) a partir da diferença térmica medida entre duas sondas ( $DT$ ). Estas sondas são aplicadas ao longo do caule das plantas.

$$k = \frac{(DT_m - DT)}{DT} = 0,0206 \times J_s^{0,8124} \quad (2.3)$$

onde  $DT_m$  é a diferença de temperatura entre as duas sondas, na situação de fluxo nulo ( $^{\circ}C$ ).

O fluxo de seiva ( $F$ ) é calculado considerando a área da secção efetiva do xilema que conduz a seiva bruta ( $AS$ ), ou seja, equação (2.4):

$$F = 118,99.10^{-6} k^{1,231} AS \quad (2.4)$$

[Granier \(1985\)](#) refere que duas sondas cilíndricas de 2 mm de diâmetro são inseridas radialmente no tronco, separados por uma distância de 5 cm, sendo que a inferior se encontra a 5 cm do solo. Compostas por uma agulha hipodérmica de 20 mm de comprimento e de 2 mm de diâmetro, no qual se encontra um termopar de Cobre-Constantan (tipo K) para efeitos de medição da variação térmica no interior do lenho. Os termopares encontram-se ligados entre si em série com o fim de ter uma diferença de temperatura entre os pontos de inserção ([Delgado-Rojas et al., 2007](#); [Fernández et al., 2001](#); [Tatarinov et al., 2005](#)).

A sonda colocada na posição superior é aquecida de modo contínuo à potência constante de 0,2 W [Granier \(1985\)](#), enquanto que a de posição inferior se encontra à temperatura natural dos tecidos do tronco. Este método tem por base a condução do fluxo de seiva entre as duas sondas onde a diferença de temperatura permite calcular a sua densidade.

O método de Granier apresenta a vantagem de ser relativamente pouco dispendioso, relativamente a outros métodos de medição do fluxo de seiva, permitindo aumentar o número de plantas amostradas e, conseqüentemente, obter medições de transpiração mais fiáveis ao nível da parcela ([Paço, 2003](#)).

### 2.2.5 Método de dendrometria

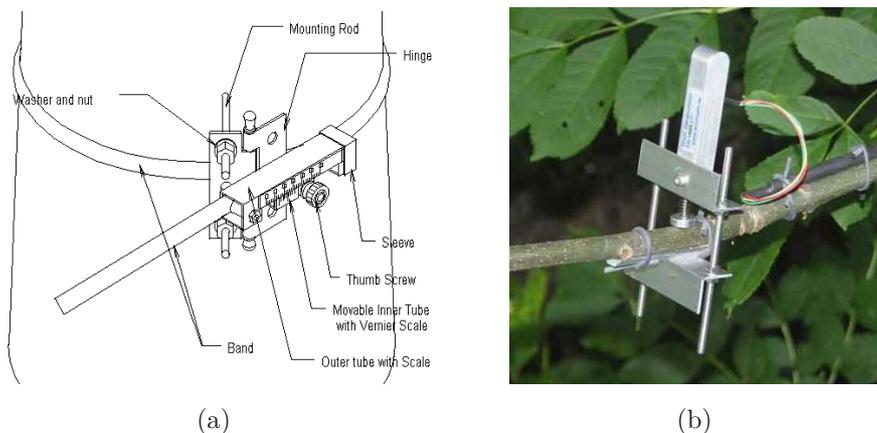
A dendrometria, segundo a sua Etimologia, vem das palavras *dendro* (árvore) e *metron* (medida). Este método permite saber a variação do teor de água nos tecidos do caule, através das variações do seu perímetro/diâmetro. Estas variações podem originar o encolhimento e a expansão de um modo reversível dos tecidos do caule (Molz and Klepper, 1973).

A dendrometria tem sido utilizada principalmente para o estudo da disponibilidade da água na planta, normalmente em árvores de fruta, onde a sua aplicação permite uma melhor gestão no que toca à irrigação (Nortes et al., 2005; García-Orellana et al., 2007; Fereres and Goldhamer, 2003).

Este método incide na utilização de cintas variáveis que permitem a determinação do encolhimento máximo diário, MDS, e a taxa de crescimento do caule, SGR, como apresentado na Fig. 2.4.

Segundo De Swaef et al. (2015), o método de SDV incide na combinação de quatro mecanismos, despoletados simultaneamente para a obtenção de melhores resultados e mais precisos, sendo eles:

- A contração reversível e expansão de elementos de xilema condutores mortos devido ao aumento e relaxamento das tensões internas;
- A retração reversível e expansão dos tecidos vivos em resposta a diferentes níveis de hidratação do tecido;
- O crescimento de tronco radial irreversível;
- A expansão e contração térmica (Daudet et al., 2004).



**Figura 2.4** – Dendrometria: (a) Esquema de um dendrómetro numa árvore. Adaptado de (Corporation, 2010); (b) Dendrómetro aplicado em árvore de caule pequeno. Adaptado de (Agriexpo, 2010).

## 2.3 Resumo

Nas subsecções anteriores foram apresentadas e descritas algumas metodologias, para a determinação das necessidades hídricas das plantas.

A tendência que se observa nos dispositivos inteligentes na agricultura é a oferta de sistemas que recorrem cada vez mais a dispositivos que se destinam a quantificar parâmetros que podem ser relacionados com as necessidades hídricas, nomeadamente o uso da sonda de dissipação térmica e de dendrometria.

Para tal, ferramentas são utilizadas com o intuito de permitir a execução de técnicas necessárias para os diversas culturas.

A Tabela 2.2, mostra algumas das tecnologias utilizadas na execução dos métodos apresentados nas subsecções anteriores.

Todos os métodos observados e estudados, permitiram um melhor conhecimento dos métodos de medida que se traduzem em requisitos importantes para a conceção de um sistema protótipo descrito no capítulo 4.

Descrição	Tipo	Especificações	Fabricante
Temperatura foliar	2956	<a href="https://www.specmeters.com/weather-monitoring/environmental-meters/hand-held-meters/ir-crop-temp/">https://www.specmeters.com/weather-monitoring/environmental-meters/hand-held-meters/ir-crop-temp/</a>	Spectrum
Temperatura foliar	2958	<a href="https://www.specmeters.com/weather-monitoring/environmental-meters/hand-held-meters/ir-crop-temp-external/">https://www.specmeters.com/weather-monitoring/environmental-meters/hand-held-meters/ir-crop-temp-external/</a>	Spectrum
Temperatura foliar	PCE-TC 28	<a href="https://www.pce-instruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/temperature-meter-pce-instruments-temperature-meter-pce-tc-28-det_1224897.htm?_list=kat&amp;_listpos=6">https://www.pce-instruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/temperature-meter-pce-instruments-temperature-meter-pce-tc-28-det_1224897.htm?_list=kat&amp;_listpos=6</a>	PCE Iberia
Potencial de água na folha	AP4	<a href="https://www.delta-t.co.uk/product/ap4/#overview">https://www.delta-t.co.uk/product/ap4/#overview</a>	Delta-T D.
Fluxo de seiva	TDP	<a href="http://www.dynamax.com/images/uploads/papers/TDP_Manual.pdf">http://www.dynamax.com/images/uploads/papers/TDP_Manual.pdf</a>	Dynamax
Fluxo de seiva	SGDC	<a href="http://www.dynamax.com/images/uploads/papers/156_StemHeatBalanceMethod_NewSensor_SGDC.pdf">http://www.dynamax.com/images/uploads/papers/156_StemHeatBalanceMethod_NewSensor_SGDC.pdf</a>	Dynamax
Fluxo de seiva	SF-G	<a href="http://ecomatik.de/en/products/sap-flow-sensor/sf-g/">http://ecomatik.de/en/products/sap-flow-sensor/sf-g/</a>	Ecomatik
Fluxo de seiva	SF-L	<a href="https://ecomatik.de/en/products/sap-flow-sensor/sf-l/">https://ecomatik.de/en/products/sap-flow-sensor/sf-l/</a>	Ecomatik
Dendrômetro	DR	<a href="https://ecomatik.de/en/products/dendrometer/radius-dr/">https://ecomatik.de/en/products/dendrometer/radius-dr/</a>	Ecomatik
Dendrômetro	DD-L	<a href="https://ecomatik.de/en/products/dendrometer/diameter-dd-l/">https://ecomatik.de/en/products/dendrometer/diameter-dd-l/</a>	Ecomatik
Dendrômetro	DD-S	<a href="https://ecomatik.de/en/products/dendrometer/diameter-dd-s/">https://ecomatik.de/en/products/dendrometer/diameter-dd-s/</a>	Ecomatik

**Tabela 2.2** – Resumo de alguns sensores usados na determinação das necessidades hídricas das plantas.

# 3

## Sistema de rega inteligente

---

A Internet das Coisas, permitiu significativamente inovar os métodos utilizados para a recolha de dados no nosso quotidiano e também na agricultura. A necessidade de uma agricultura mais inteligente e o agravamento das alterações climáticas fizeram com que este sector necessite cada vez mais de tecnologias de monitorização das condições das culturas, onde o paradigma da IoT promete contribuir. Este novo paradigma permitiu a integração na área da agricultura de métodos mais inovadores e precisos para a recolha de informação sobre certa cultura com o fim de melhorar e aumentar a sua produção. Sensores sem fios são uma contribuição importante para a monitorização das culturas, permitindo uma recolha de dados com maior granularidade e menos invasiva.

Neste capítulo faz-se uma abordagem aos sistemas de rega inteligentes, permitindo perceber de que forma a monitorização é fundamental na rega. A Fig. 3.1, ilustra o conceito básico da rega inteligente, onde estão presentes os pontos de monitorização e de ativação, ligados em rede de sensores sem fios a um controlador de dados que os armazena, executa algoritmos (baseados em regras) e gera decisões quanto à atuação.

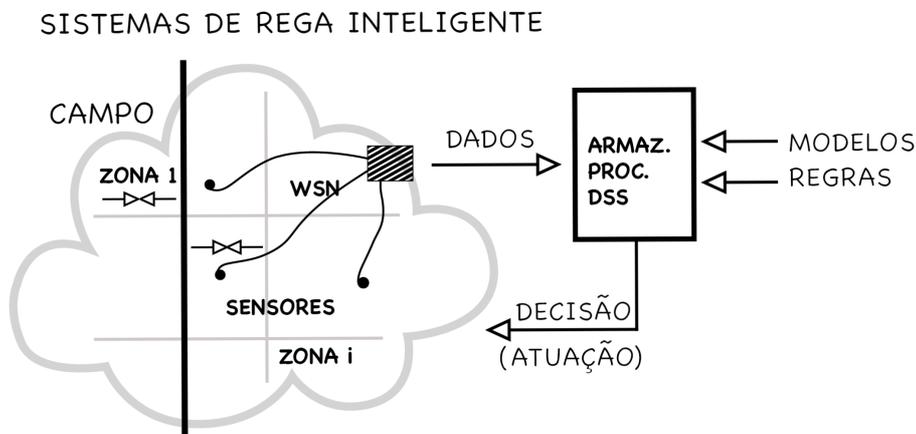


Figura 3.1 – Conceito de rega inteligente associado a este trabalho.

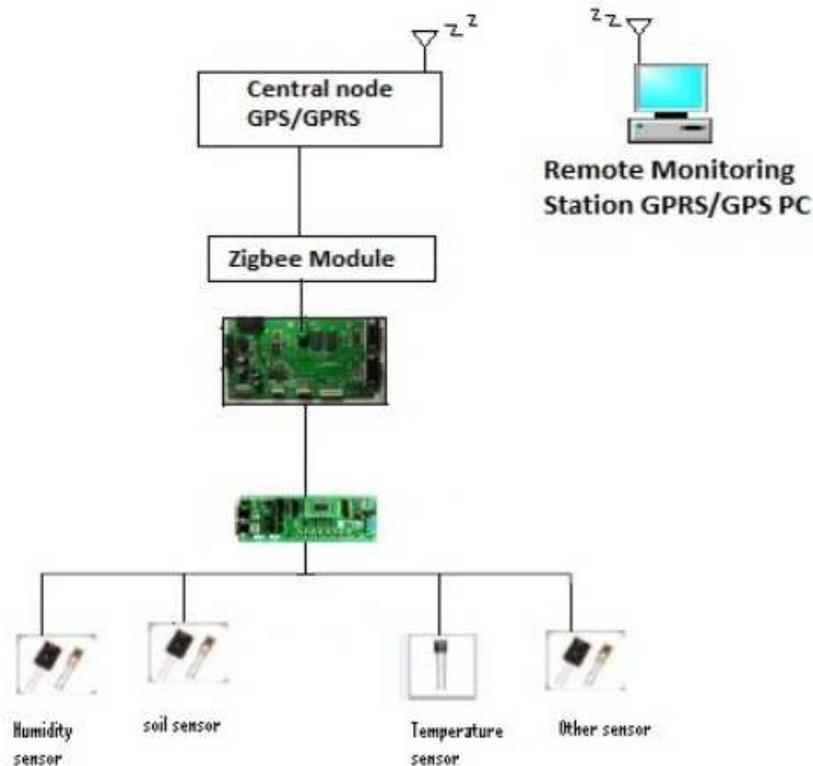
### 3.1 Revisão do estado da arte

Ao longo dos últimos 15 anos, os sistemas embebidos e as tecnologias de comunicação sem fios têm sofrido uma grande evolução o que levou a um crescimento em larga escala de dispositivos de monitorização para um grande número de aplicações.

De entre as variadas aplicações destes sistemas embebidos em monitorização, estão as redes de sensores sem fios, ou *Wireless Sensor Network*, WSN, o que, no caso da agricultura, possibilita uma monitorização mais abrangente em tempo real dos cultivos em questão. Através da recolha de diferentes dados é possível obterem-se padrões sobre a produção da cultura (variabilidade espacial) o que permite uma agricultura de precisão, onde sensores são utilizados para a recolha de dados e enviados para uma estação de controlo a fim de serem tomadas decisões sobre os dados recolhidos, [Kalaivani et al. \(2011\)](#).

[Satyanarayana and Mazaruddin \(2013\)](#) desenvolveram um sistema sem fios baseado na monitorização remota utilizando comunicação ZigBee. O sistema proposto consiste na monitorização da humidade relativa e da temperatura através da

aquisição de dados e transmissão para estações centrais, Fig. 3.2, com o objetivo de os agricultores saberem as condições meteorológicas nos seus terrenos agrícolas.

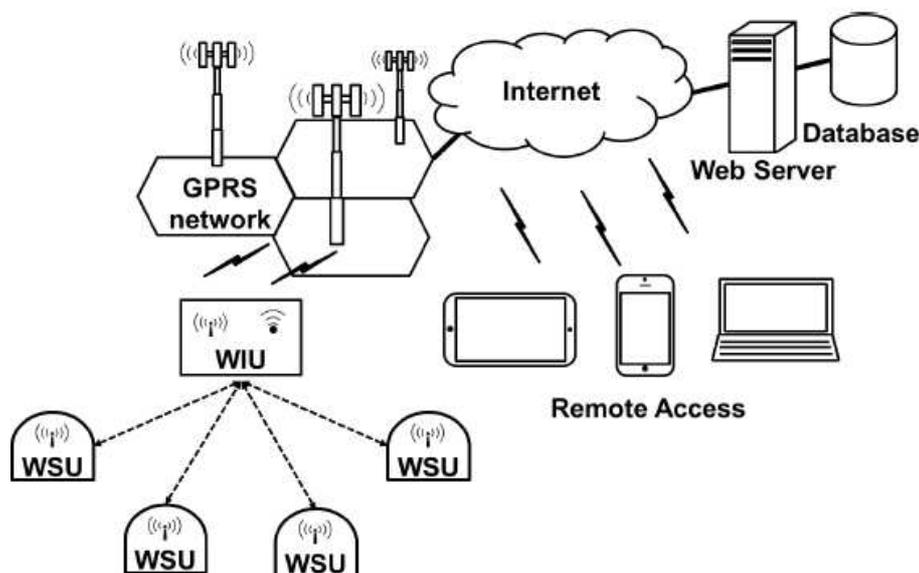


**Figura 3.2** – Arquitetura do sistema desenhado por [Satyanarayana and Mazaruddin \(2013\)](#).

Neste sistema, foram usados nós ZigBee, baseados no circuito integrado CC2430, e sensor de temperatura e de humidade relativa do ar SHT15 e para alimentação foi usado um painel solar. Para a temperatura e humidade relativa, foi usado o sensor digital SHT15 (Sensirion, Suíça).

[Gutiérrez et al. \(2014\)](#), refere um sistema, Fig. 3.3, sem fios viável e rentável com potencialidade de uso em culturas localizadas em áreas geograficamente isoladas e com escassez de água. Com vista à otimização dos recursos hídricos gastos na rega foi desenvolvido um sistema automatizado baseado em micro-controladores e de comunicação sem fios. O sistema desenvolvido pode ser dividido em duas partes,

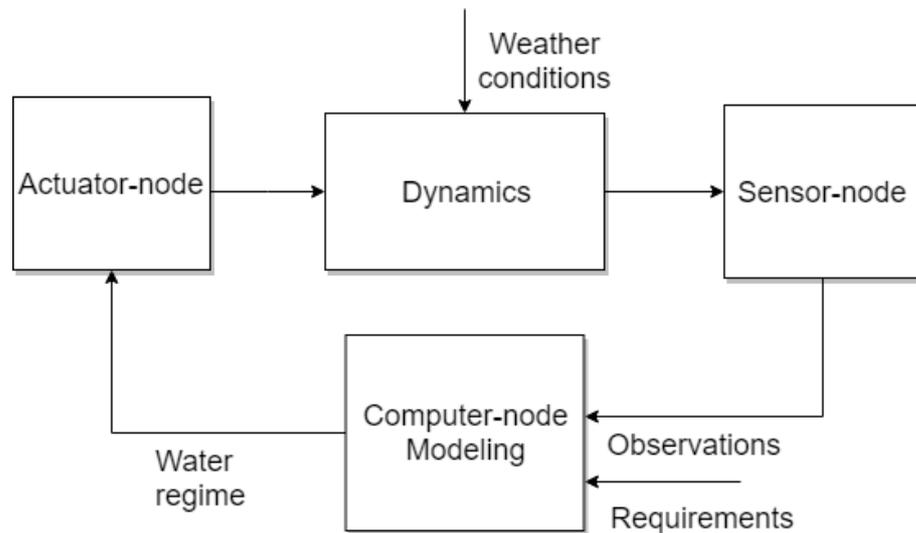
em *Wireless Sensor Unit*, WSU, e em *Wireless Information Unit*, WIU. A WSU foca na comunicação feita entre os nós de sensores e o recetor de dados sendo este efetuado através do protocolo ZigBee. Esta rede é composta pela WSU onde os sensores de humidade do solo (VH400) e de sensores de temperatura (DS1822), um painel solar (MPT4.8-75) capaz de recarregar baterias do tipo AA de 2000 mAh Ni-MH e, um micro-controlador para a aquisição de dados e transceptor de rádio onde os resultados podem ser monitorizados remotamente online.



**Figura 3.3** – Configuração do sistema de rega automatizado. WSU's e uma WIU, com base nas tecnologias de microcontrolador, ZigBee e GPRS. Adaptado de [Gutiérrez et al. \(2014\)](#).

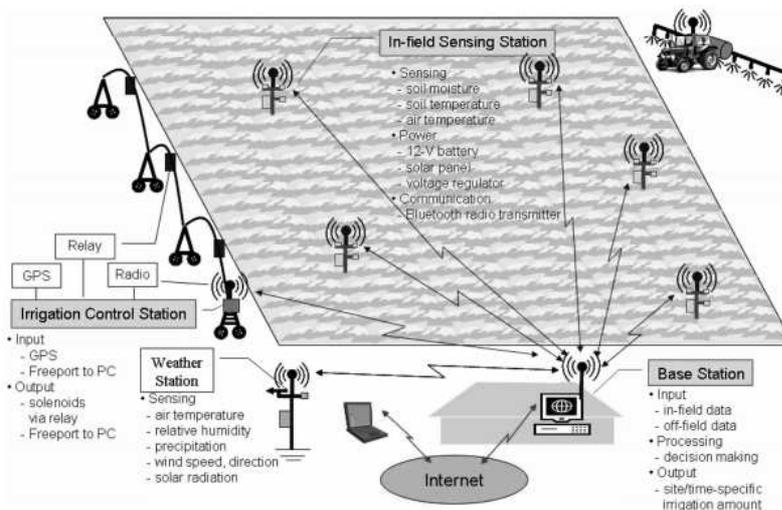
Para a avaliação e monitorização de vinha, [Ooi et al. \(2008\)](#) utilizou rega em malha fechada, como ilustra a Fig. 3.4. Tendo como objetivo conseguir estabelecer uma agenda de rega adequada para o seu cultivo, a partir de medições como a temperatura e a humidade do solo, refere a colocação de sensores *Sentek EnviroScan* em quatro videiras experimentais para a medição contínua da humidade do solo em diferentes profundidades, 20 cm, 40 cm, 60 cm e 80 cm. A monitorização a várias profundidades permite saber a distribuição de água presente no solo e compreender de que forma o *déficit* de água deve ser corrigido através de rega. Na monitorização em malha fechada, a previsão meteorológica, a humidade e temperatura do solo

e o conhecimento do estado fenológico das videiras permite estabelecer estratégias otimizadas de rega.



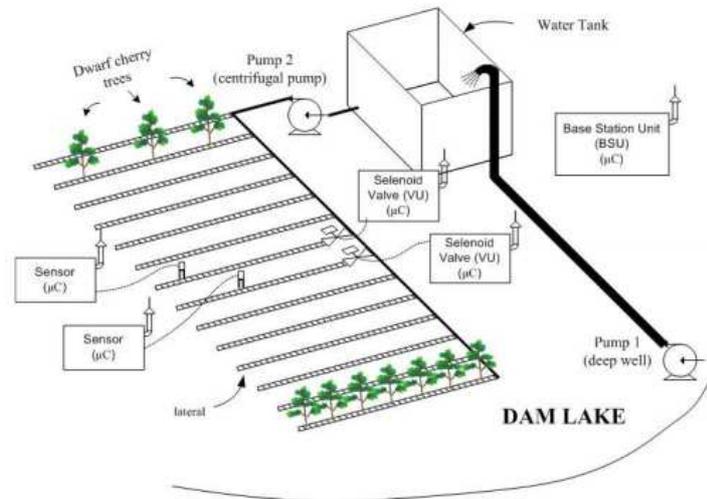
**Figura 3.4** – Diagrama de rega malha fechada utilizado por [Ooi et al. \(2008\)](#).

[Kim et al. \(2008\)](#) descrevem um sistema detalhado onde visa questões sobre uma rede de sensores sem fios para a recolha de dados sobre o solo e controlo em tempo real de um sistema de rega de precisão. Neste artigo é descrito um processo pelo qual são colocadas cinco estações de sensores distribuídas num campo com a função de recolher periodicamente dados e a transmissão desses dados para uma estação base, como ilustra, [Fig. 3.5](#). Este sistema consiste em sensores dispersos pelo campo que monitorizam condições como a humidade do solo, temperatura do solo e temperatura do ar. Entre estes encontra-se uma estação meteorológica que permite obter dados sobre o campo, como a temperatura do ar, humidade, precipitação, radiação solar entre outros. A estação base descrita por [Kim et al. \(2008\)](#) é onde o processamento dos dados é realizado e para onde são enviados os comandos para o controlo da rega. O controlador de rega sendo uma estação amovível, quando passar pelas estações estáticas no campo saberá em qual das zonas deve ser aplicada a rega de acordo com os dados adquiridos nas localizações relevantes. Esta estação de rega utiliza o GPS para indicar à estação base qual a zona que devem ser ligado os atuadores.



**Figura 3.5** – Layout conceitual do sistema da rede de sensores sem fio em campo para rega específica do local apresentada por [Kim et al. \(2008\)](#).

[Dursun and Ozden \(2011\)](#) descrevem no seu artigo uma aplicação de uma rede de sensores sem fios, autónoma e de baixo custo para uma solução de rega controlada. Com este sistema pretende-se evitar o *stresse* hídrico das culturas, contando com o apoio à decisão, através de dados adquiridos por um conjunto de sensores de humidade do solo, (10HS, Decagon). Na estação base, os dados recebidos da unidade de sensores são avaliados e processados para ser efetuada uma tomada de decisão na qual se decide qual parte da área deve ser irrigada.



**Figura 3.6** – Esquema apresentado por [Dursun and Ozden \(2011\)](#) para a rega de cerejeiras anãs.

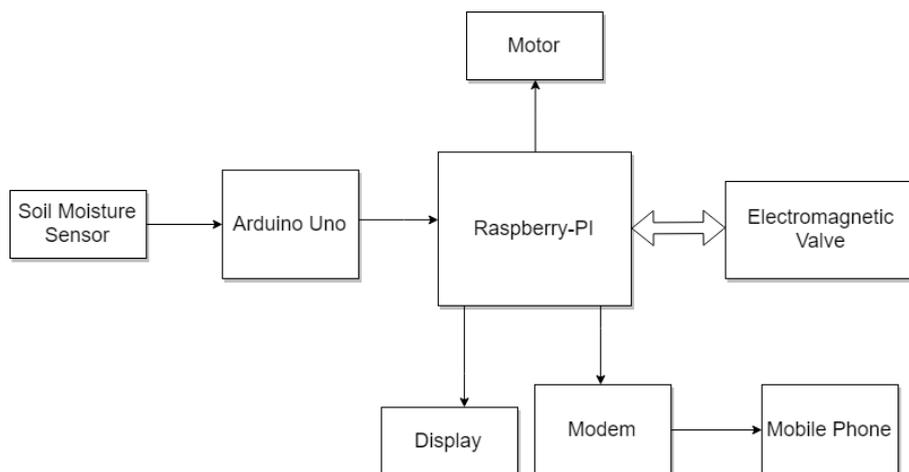
[Sahu and Behera \(2015\)](#) propõem um protótipo de baixo custo para controlo de um sistema de rega, como ilustra a Fig. 3.7. Este sistema é composto por um módulo sensorial e um de controlo. O nó sensorial é implantado no campo de cultivo, onde irá ser efetuada a rega, para detetar o valor de humidade do solo. Após efetuar as medições os dados recolhidos são enviados para o nó de controlo. Ao receber o valor do sensor, o nó de controlo verifica o valor exigido de humidade presente no solo. Quando a humidade do solo não se encontra ao nível exigido, o motor é ligado para regar a área do campo agrícola associado e uma mensagem de alerta é enviada para o telemóvel do agricultor.

Este protótipo é composto por um sensor de humidade do solo usado para detetar o nível de humidade no solo e enviar os dados para o dispositivo de rede sem fios. Estes são enviados para um Arduino-Uno. A cada 5 minutos o Arduino envia um valor de humidade presente no solo para um Raspberry-Pi, que por sua vez, irá controlar a eletroválvula e o motor de rega.

O Raspberry-Pi é utilizado para efetuar a comunicação com o agricultor enviando-lhe o estado do campo através de uma mensagem para o telemóvel, conseguindo tal

através da utilização de um modem. Este processo permite ao agricultor atualizar o seu conhecimento do estado dos campos com informação de regar ou não.

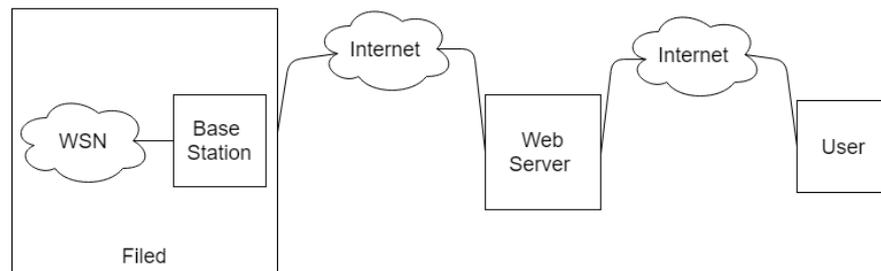
Ao utilizar o sistema de rega inteligente, otimiza-se o uso de água, reduzindo o desperdício e reduzindo a intervenção humana dos agricultores.



**Figura 3.7** – Diagrama de blocos para sistema de rega inteligente. Proposto por [Sahu and Behera \(2015\)](#).

[Moghaddam et al. \(2010\)](#), apresentam uma tecnologia para um sistema de sensores inteligente que mede a humidade do solo nos campos agrícolas (Fig. 3.8) alimentados com baterias integradas e painéis solares. A comunicação entre os nós é feita usando a tecnologia IEEE 802.15.4/ZigBee. A estação base atualiza os dados para o servidor usando conectividade 3G. O servidor guarda as informações recolhidas pelos nós dos sensores e qualquer utilizador pode visualizar a informação em tempo real, integrando assim todo o sistema dos sensores *in situ* ao utilizador remoto. Esta metodologia conhecida como *Smart Sensor Web*, SSW, é guiada pela inteligência de um sistema de controlo que tem a finalidade de determinar uma estratégia ideal para a medição do teor de água no solo através das configurações dos sensores ao longo do tempo e uma estratégia de estimativa com base na informação de valores do teor de água no solo. A implementação deste sistema é definida pela implantação de vários nós atuadores que são colocados em diferentes profundidades com vários sensores.

Um nó coordenador central é implantado para agendar eventos de transmissão de dados dos atuadores. Ao receber as leituras dos atuadores, o coordenador central estima a variação espacial do teor de água no solo. O nó coordenador decide então o cronograma para futuras medições. Desta maneira, aproveita-se a correlação espaço-temporal do teor de água no solo para estimar um número reduzido de medições.



**Figura 3.8** – Diagrama de blocos para SSW. Proposto por [Moghaddam et al. \(2010\)](#).

[Gawali and Chaudhari \(2016\)](#) descrevem um sistema WSN de baixo custo e consumo de energia, para monitorização da temperatura e humidade relativa do ar e temperatura do solo presentes nos campos agrícolas através de medições periódicas. Após as medições desses parâmetros os dados são enviados periodicamente para um nó central, permitindo assim uma monitorização das condições do campo mais claras e precisas. Este sistema, ilustrado na Fig. 3.9, consiste num micro-controlador de baixa potência, MSP430G2553 (Texas Instruments, USA). Para medição de temperatura e humidade relativa do ar, foi utilizado o sensor integrado DHT11 (Adfruit, USA). Os dados obtidos são enviados através do Xbee Pro S2 para o nó central. Para a comunicação sem fio, foi usado o protocolo ZigBee na recolha de dados no nó central e para a interface do utilizador o GSM/GPRS. A quantidade total de água consumida nos campos foi calculada através dos dados recolhidos pelos nós de sensores, permitindo assim que seja ativado o atuador numa determinada área do campo agrícola. No final de cada intervalo de tempo, todos os dados recolhidos são guardados num cartão SD, para servirem de análise no futuro. Uma interface para utilizador foi projetada para uma interatividade simples onde o agricultor é capaz de definir a condição de limiar das variáveis implicativas de decisão, de

qualquer lugar apenas enviando mensagens usando a aplicação desenvolvida para o efeito.

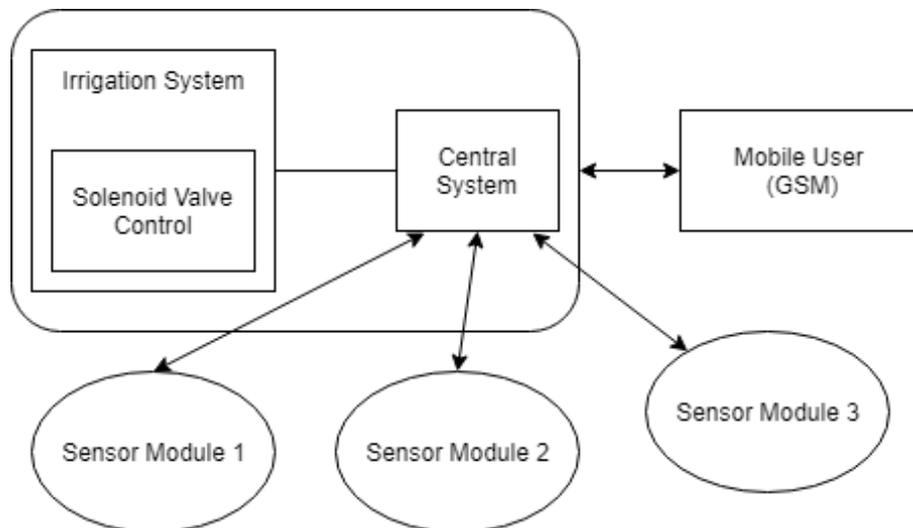


Figura 3.9 – Diagrama de blocos para o sistema implementado por [Gawali and Chaudhari \(2016\)](#).

## 3.2 Discussão

Atualmente, a maioria das soluções comerciais disponíveis no mercado integram sistemas de redes de sensores sem fios, visto que têm custos mais baixos e uma instalação mais facilitada. Apesar da introdução de tecnologias sem fios, os custos ainda continuam altos para o agricultor comum.

Sistemas de rega inteligente baseados no conceito de IoT para uma agricultura de precisão vai mais além do que regar. Consiste no agrupamento de módulos que permitem obter informação sobre diversas variáveis de uma determinada cultura ou área agrícola. Estes sistemas podem ser divididos por fases entre os quais se destacam:

- **Módulo de recolha de informação:** Nos sistemas de rega de precisão, redes de sensores sem fios viabilizam recolha de dados sobre uma determinada

cultura para que esta possa ter um desenvolvimento saudável. Estas redes de sensores implementadas em áreas de monitorização, formam sistemas auto-organizáveis permitindo assim uma monitorização constante levando ao estabelecimento a longo prazo de padrões sobre determinada área e cultura. A recolha de informação permite a obtenção de dados como temperatura e humidade do solo, humidade relativa e temperatura do ar, pressão atmosférica, velocidade do vento, precipitação na área monitorizada, situação de crescimento dos cultivos, quantidade de humidade presente nas folhas, leitura do fluxo de seiva, entre outros.

- **Módulo de comunicação:** As WSN são já muito populares no mundo da agricultura de precisão. Neste módulo é procurado efetuar uma comunicação sem fios que seja viável para comunicação entre todos os nós intervenientes. Dentro das WSN encontram-se as normas como o GSM/GPRS 3G/4G, ZigBee, rede IEEE 802.11 (Wi-Fi), entre outras.
- **Módulo controlador de rega:** O controlador de rega é onde as decisões são processadas e onde partirá a decisão de regar ou não. Após o módulo de informação recolher periodicamente os dados e estes serem enviados para uma estação base, é necessário processar os dados recolhidos. Através de algoritmos que permitam uma gestão propícia das condições favoráveis para a cultura, o controlador de rega tem de ser capaz de acionar, ou não, o sistema de rega a ser utilizado no campo.

Tendo em consideração as soluções estudadas e a revisão bibliográfica realizada, conclui-se que a solução mais indicada, seria um sistema sem fios com dispositivos de baixo custo baseados em comunicação sem fios GSM/GPRS. Deste modo, apresenta-se uma proposta para um sistema protótipo no capítulo 4, baseado no esquema da Fig. 3.1.



# 4

## Protótipo de sistema de monitorização

---

O estudo e conceção de um protótipo que seja capaz de monitorizar parâmetros relevantes para a determinação do estado hídrico de uma planta, como a videira, é sempre uma mais-valia para o estabelecimento de qualquer estratégia de rega inteligente.

Neste capítulo são definidos os requisitos funcionais de um protótipo, sendo apresentados todos os seus módulos constituintes de acordo com o considerado como objetivo principal deste trabalho de dissertação, assentando, essencialmente, sobre a determinação das necessidades hídricas das plantas através de sistemas de baixo custo.

### 4.1 Requisitos funcionais

Como anteriormente descrito, esta dissertação tem como objetivo a conceção e implementação de um sistema embebido capaz de efetuar a monitorização do estado de uma cultura através de ferramentas dentro do conceito de IoT. O sistema encontra-se dividido em três blocos fundamentais:

- Sensores e aquisição de dados;
- Processamento local;
- Comunicação para o sistema remoto.

### **Sensores e aquisição de dados**

A aquisição de dados é efetuado por dispositivos de entrada, compostos por cinco sensores e um dispositivo de imagem. Estes permitem adquirir amostras da temperatura e da humidade relativa do ar, da precipitação, do estado da folha por défice de água em tempo real, da condutividade elétrica, conteúdo volumétrico de água e temperatura do solo. Com o apoio de uma câmara de vídeo por forma a tirar fotografias à videira, é possível acompanhar o crescimento da planta, sendo possível detetar alguma anomalia que possa ocorrer na mesma.

### **Processamento local**

As informações recolhidas pelos sensores são efetuadas através de leituras com intervalos de 15 minutos e guardadas numa base de dados local. Estes dados são posteriormente enviados para a plataforma *mySense* de duas em duas horas, juntamente com uma fotografia tirada pela câmara de vídeo, fazendo um registo fotográfico do desenvolvimento planta.

### **Comunicação para o sistema remoto**

Com estas informações recebidas é possível estabelecer padrões não só de como a videira se comporta em determinadas épocas do ano, mas também sobre o ambiente onde se encontra inserida. Com o recurso de fotografia, obtida através do dispositivo de imagem, torna-se possível apenas com um acesso à plataforma *mySense* a visualização do estado do crescimento da planta, pois muitas das vezes as vinhas encontram-se em local de difícil acesso.

Com evolução e a introdução das tecnologias IoT na agricultura torna-se possível a adoção deste tipo de sistemas, proporcionando assim melhores condições das práticas de uma viticultura de precisão.

Para tal, foi implementado no Raspberry Pi um mecanismo de atualização das variáveis referentes aos intervalos de tempo da aquisição de dados, de fotografia e envio da informação adquirida pelos sensores da base de dados local para a plataforma *mySense*, através do envio de comandos para o micro-computador obtidos na resposta do servidor, sempre que são enviados dados.

De forma resumida o protótipo a desenvolver tem os seguintes requisitos:

- Baixo custo;
- Permitir o uso de sensores com saída analógica;
- Permitir o uso de sensores que usem protocolo SDI-12;
- Estar "dotado" de câmara de vídeo;
- Permitir o armazenamento temporário de dados.

## 4.2 Arquitetura do sistema

Com base nos requisitos funcionais anteriormente enumerados, o protótipo a implementar baseia-se num computador do tipo *SBC - Single Board Computer* do tipo Raspberry Pi, ao qual estão ligados todos os sistemas periféricos quer como interface aos sensores quer para a comunicação com o sistema remoto para o qual são enviados os dados. A arquitetura funcional encontra-se ilustrada na Fig. 4.1.

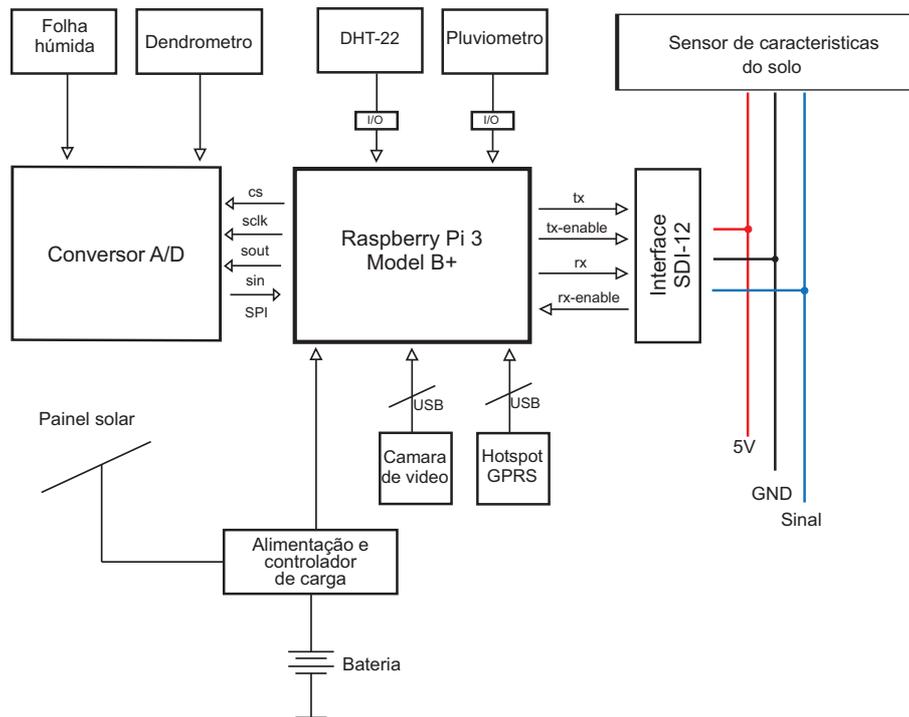


Figura 4.1 – Diagrama funcional do protótipo implementado.

Por observação da Fig. 4.1, destacam-se vários periféricos que se destinam a realizar a interface entre os vários sensores e o SBC.

Quer o sensor de folha húmida quer o dendrómetro apresentam uma saída analógica pelo que é necessário um conversor analógico/digital. O sensor combinado de temperatura e humidade relativa de baixo custo DHT22, utiliza um protocolo digital próprio e funciona a 3,3 V. Já o pluviômetro (RG2, Campbell) necessita de uma entrada digital já que a saída deste sensor é um contacto livre de potencial. Embora não essencial, optou-se pela implementação de uma interface SDI-12 para possibilitar o uso de um sensor de teor de água no solo (5TE, Decagon Devices) usado como referência. A câmara de vídeo (para tirar fotografias periódicas às plantas) e o *hotspot* para a comunicações remotas ligam-se por USB.

## 4.3 Módulos periféricos

Nesta secção é apresentado, em maior detalhe, o *hardware* utilizado, nomeadamente para o processamento e controlo do protótipo, normas de comunicação utilizadas, sensores utilizados e a conectividade com o exterior.

### 4.3.1 Processamento e controlo

A unidade de processamento do protótipo baseia-se num SBC Raspberry Pi 3 Modelo B+, Fig. 4.2(a). Possui um processador Broadcom BCM2837B0 que contém uma unidade de processamento central (CPU) com quatro núcleos Cortex-A53 (ARMv8) de 64-bits operando a uma frequência 1,4 GHz, uma unidade de processamento gráfico (GPU) Videocore IV que funciona a uma frequência de 250 MHz. Este modelo possui 1 GB de RAM. Possui uma porta de Ethernet gigabit com tráfego de 300 Mbps e possui suporte para redes sem fio sem necessitar de adaptadores, (Wi-Fi nos padrões 802.11 AC dual band (2,4 GHz e 5 GHz) e Bluetooth 4.2 BLE (Bluetooth Low energy)).

O Raspberry Pi 3 Modelo B+ conta com 40 pinos GPIO (pinos de entrada e saída), Fig. 4.2(b), que permitem a ligação com dispositivos periféricos, através da comunicação com a UART, comunicação I<sup>2</sup>C e SPI, que podem ser usadas nas mais variadas aplicações. É alimentado por um conector micro USB a 5 V e pelo menos 2,5 A de corrente. Conta com slot para cartão MicroSD, com 4 portas USB 2.0, interface de câmara (CSI) e de display (DSI).

Todas estas características foram tidas em conta na escolha da unidade de processamento para este trabalho. Um dispositivo do tamanho de um cartão de crédito e de baixo custo, possibilitando assim a sua fácil implementação em aplicações de monitorização no campo.



(a)

Peripherals	GPIO	Particle	Pin #	Pin #	Particle	GPIO	Peripherals
	3.3V		1	X	X	2	5V
I2C	GPIO2	SDA	3	X	X	4	5V
	GPIO3	SCL	5	X	X	6	GND
Digital I/O	GPIO4	DO	7	X	X	8	TX
			9	X	X	10	RX
	GND						GPIO15
Digital I/O	GPIO17	D1	11	X	X	12	D9/A0
							GPIO18
Digital I/O	GPIO27	D2	13	X	X	14	GND
Digital I/O	GPIO22	D3	15	X	X	16	D10/A1
							GPIO23
	3.3V		17	X	X	18	D11/A2
							GPIO24
	GPIO10	MOSI	19	X	X	20	GND
SPI	GPIO9	MISO	21	X	X	22	D12/A3
	GPIO11	SCK	23	X	X	24	CE0
							GPIO8
							SPI
DO NOT USE	GND	ID_SD	25	X	X	26	CE1
		DO NOT USE	27	X	X	28	DO NOT USE
							GPIO7
Digital I/O	GPIO5	D4	29	X	X	30	GND
Digital I/O	GPIO6	D5	31	X	X	32	D13/A4
							GPIO12
PWM 2	GPIO13	D6	33	X	X	34	GND
PWM 2	GPIO19	D7	35	X	X	36	D14/A5
Digital I/O	GPIO26	D8	37	X	X	38	D15/A6
							GPIO20
	GND		39	X	X	40	D16/A7
							GPIO21

(b)

**Figura 4.2** – Raspberry Pi 3 Model B+: (a) Raspberry Pi 3 Model B+; (b) Raspberry Pi 3 Model B+ GPIO. Adaptado de [Pi \(2018\)](#).

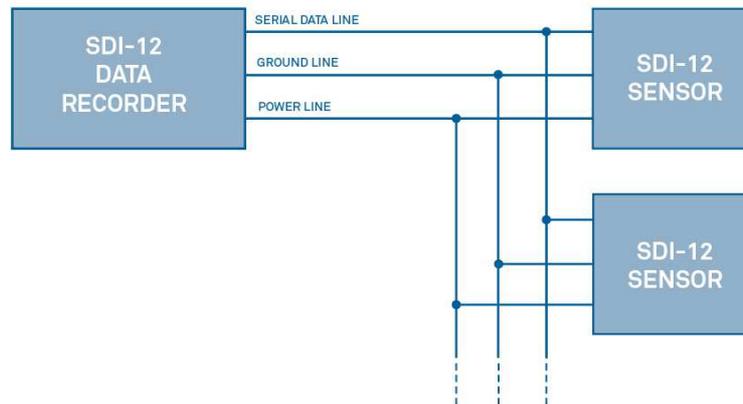
### 4.3.2 Norma SDI-12

A norma *Serial Digital Interface* a 1200 bit/s, é uma norma para interface entre gravadores de dados e sensores, ligados a um barramento comum, onde a comunicação é feita apenas sobre uma linha de dados série com tempos muito específicos. Os sensores SDI-12 são baseados em microcontroladores que utilizam o protocolo SDI-12, para comunicarem com o barramento.

Como qualquer sensor SDI-12, é necessário configurá-lo e ter um conhecimento detalhado do seu funcionamento, isto é, saber o que está a ser retornado, a quantidade de dados e as grandezas associadas.

#### Interface elétrica

O norma SDI-12 define a interface elétrica, os protocolos e a temporização ([Group, 2018](#)). Esta norma define uma interface num barramento, isto é, um ou mais sensores SDI-12 podem estar interligados por um barramento para transmitir informação entre o sistema de processamento e armazenamento de dados e os sensores ligados. A [Fig. 4.3](#), ilustra dois sensores SDI-12 ligados aos mesmo barramento.



**Figura 4.3** – Ilustração de sistema básico SDI-12. Adaptado de [Metergroup \(2018b\)](#).

Apenas são necessárias três linhas para constituir um barramento SDI-12, linha de dados (bidirecional) e alimentação elétrica (referência e linha de alimentação entre 0 V e 12 V).

### Protocolo de comunicação

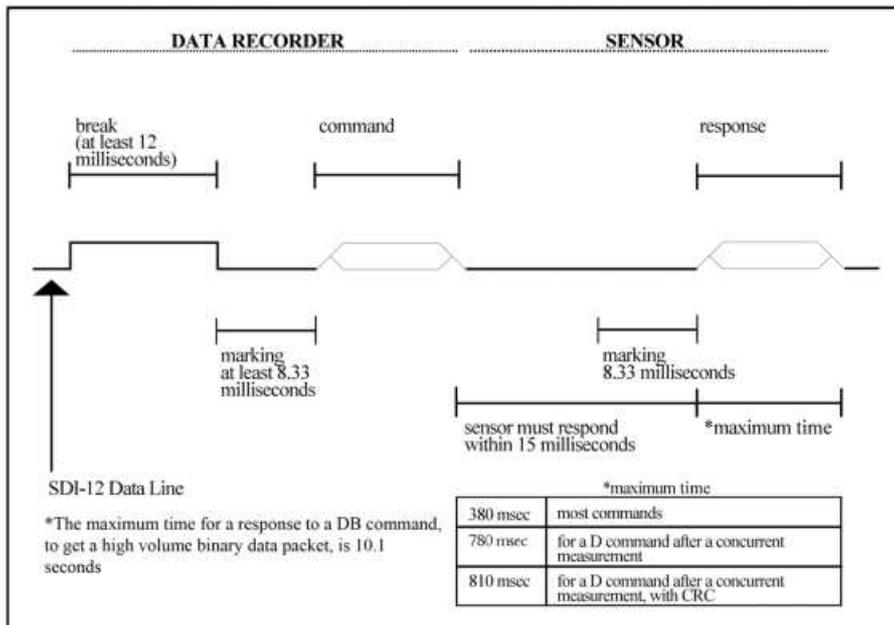
Como referido, a comunicação do SDI-12 é efetuada apenas por uma única linha de dados, o que leva a serem implementadas temporizações precisas já que durante parte do tempo a linha tem um sentido e o restante, tem outro. A comunicação SDI-12 é feita através de uma troca de caracteres ASCII, conforme definida pela norma. A comunicação é endereçada especificamente a cada sensor. Cada sensor requer um endereço de caracteres ASCII exclusivo. Os endereços válidos são caracteres ASCII 0-9, a-z e A-Z, totalizando 62 endereços únicos ([Coppock, 2015](#)).

Esta comunicação é feita a 1200 bit/s, onde cada *frame* de *bytes* contém *bits*, ilustrados na tabela 4.1.

A comunicação entre cada sensor e o gravador de dados requer tempos específicos, processando-se como ilustrado na Fig. 4.4.

1 <i>start bit</i>
7 bits de dados (o primeiro é o bit menos significativo <i>LSB</i> )
1 bit de paridade
1 <i>stop bit</i>

Tabela 4.1 – Trama de dados SDI-12.

Figura 4.4 – Temporizações da norma SDI-12. Adaptado de [Metergroup \(2018b\)](#).

- O gravador de dados “acorda”, com uma pausa, todos os sensores ligados ao barramento SDI-12, sendo que essa pausa é um *spacing* contínuo na linha de dados durante, pelo menos, 12 ms;
- De seguida envia um comando para um sensor específico, cujo endereço é o primeiro carácter do comando, instruindo-o a fazer uma medição;
- O sensor cujo endereço corresponde ao que foi enviado pelo controlador responde dentro de 15 ms retornando o tempo de espera máximo até que os dados provenientes da medição estejam prontos e o número de parâmetros que irá retornar;
- Caso a medição não se encontre imediatamente disponível, o gravador aguarda

até que o sensor comunique com ele através de um pedido referente a que os dados estão prontos e posteriormente o gravador transmite o comando para os receber. Se a medição se encontrar pronta de imediato então é emitida a instrução para receber os dados, não comunicando com nenhum sensor até que o sensor ativo responda.

### Comandos e respostas

A tabela 4.2 apresenta os comandos mais usados no SDI-12 e as suas respostas.

Nome	Comando	Resposta
Acknowledge Active	a!	a<CR><LF>
Send Identification	aI!	allccccmmmmvvxx...xx<CR><LF>
Change Address	aAb!	b<CR><LF>
Address Query	?!	a<CR><LF>
Start Measurement	aM!	atttn<CR><LF>
Send Data	aD0! ... aD9!	a<values><CR><LF>

**Tabela 4.2** – Comandos e respostas SDI-12. Adaptado de (Group, 2018).

Para uma melhor compreensão dos comandos SDI-12 é apresentada na tabela 4.3 uma decodificação do significado dos mesmos.

### Vantagens da utilização do SDI-12

O uso do SDI-12 possibilita a utilização de vários sensores SDI-12 em simultâneo, simplificando o processo de instalação e configuração de sensores. A utilização de sensores SDI-12 tem a vantagem que podem ser trocados sem que o gravador de dados sofra alterações a nível de *software*, a sua energia é fornecida através da interface, os gravadores de dados como o acima referido podem estar conectados com um ou mais sensores. A desvantagem do SDI-12 é quanto mais sensores existirem, mais difícil será isolar um sensor defeituoso e restaurar o barramento em caso de falha. Contudo, em aplicações de agricultura de precisão, é ainda muito utilizado.

Chave	Significado
a	<i>Address</i>
I	<i>SDI-12 version number</i>
c	<i>8-character vendor identification</i>
m	<i>6-characters indicating sensor model number</i>
n	<i>Number of data values being returned</i>
t	<i>Time in seconds until data will be ready</i>
v	<i>3-character sensor version number</i>
<values> pd.d	P - <i>polarity sign</i> d - <i>numeric digits before the decimal place</i> . - <i>decimal point option</i> d - <i>numeric digits after the decimal point pd.d</i>
<CR><LF>	<i>Terminates the response</i>

**Tabela 4.3** – Significados dos caracteres usados nos comandos SDI-12. Adaptado de (Group, 2018; Coppock, 2015).

### 4.3.3 Barramento SPI

De forma a garantir a utilização de um dendrómetro para medições do perímetro do caule e de um sensor de folha húmida, foi implementada uma interface SPI (*Serial Peripheral Interface*) para que seja possível usar um conversor analógico/digital (ADC) e assim realizar conversões entre uma tensão entre 0 V e 3,3 V para um número digital para posterior processamento por parte do Raspberry Pi. O SPI utiliza 4 linhas para conectar com o dispositivo sendo elas o relógio (CLK), *Master Input Slave Output* (MISO), *Master Output Slave Input* (MOSI) and *Chip Select* (CS) (Li et al., 2014).

Neste trabalho foi utilizado um conversor de ADC do tipo ADS1015 (Texas Instruments, USA), que pode ser consultado em : <https://learn.adafruit.com/raspberry-pi-analog-to-digital-converters/ads1015-slash-ads1115> e posteriormente adaptado para o pretendido.

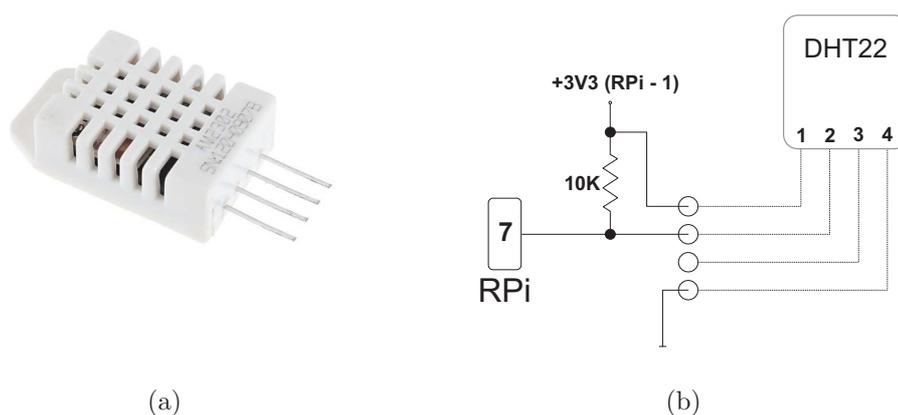
### 4.3.4 Sensores

Neste trabalho foram usados alguns sensores para a medida de diversas grandezas já enumeradas: Temperatura e humidade relativa do ar, perímetro do caule, folha húmida, teor de água no solo, condutividade elétrica no solo, temperatura do solo, precipitação e imagem.

Foram escolhidos os sensores mais adequados tendo em conta o seu custo e a sua disponibilidade. Estes sensores são resumidamente apresentados nas secções seguintes.

#### Sensor combinado de temperatura e humidade relativa do ar

Para a temperatura e humidade relativa do ar foi escolhido o DHT22 (Adafruit Industries, USA). Incorpora um sensor capacitivo de humidade e um termistor para medir a temperatura ambiente em redor e envia um sinal digital através do pino de dados, Fig. 4.5.



**Figura 4.5** – O sensor DHT22: (a) Fotografia; (b) Interligação do sensor DHT22 ao protótipo. Adaptado de (Adafruit, 2018).

O DHT22 permite medições de temperatura entre os  $-40$  e os  $+80^{\circ}\text{C}$  com uma precisão de  $\pm 0.5\%$  e, de humidade entre 0 a 100% com uma precisão de 2.5 %

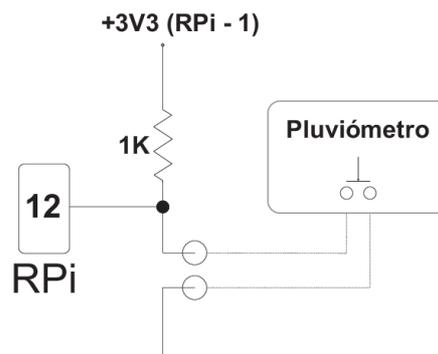
(Adafruit, 2018; Sparkfun, 2018). Este sensor não é muito fiável a longo prazo mas aceitável ao longo de uma época.

### Pluviómetro

Este componente foi escolhido, devido à sua disponibilidade no laboratório, Fig. 4.6. Este tipo de sensor permite saber a quantidade de precipitação que ocorre numa zona e ao longo do tempo. Com estas particularidades é possível ao fim de uma época saber uma estimativa da quantidade de precipitação que se fez sentir naquela zona levando assim a que sejam ajustadas as condições de rega. Para este trabalho foi usado o sensor RG2+M-06 Raingauge (Delta-T, UK). Este dispositivo tem uma sensibilidade de 2 mm por leitura (Delta-T).



(a) (a)



(b) (b)

**Figura 4.6** – O pluviómetro RG2+M-06 : (a) Fotografia; (b) Interligação do pluviómetro ao protótipo. Adaptado de Delta-T.

### Perímetro do caule

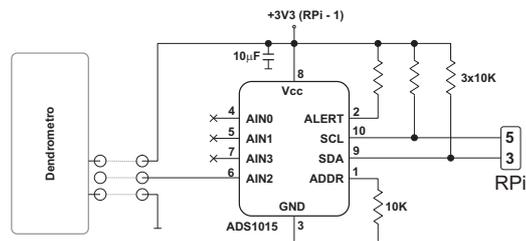
Para medições do perímetro do caule, foi escolhido com base no estudo deste projeto o dendrómetro de diâmetro largo (*Diameter Dendrometer Large*, (DDL), Fig. 4.7). Este sensor é adequado para medições em plantas/árvores de diâmetro de 3 a 30 cm, com uma exatidão de  $\pm 1,5\mu\text{m} \pm 0,12\%$ .

As principais vantagens deste dendrómetro são: robustez; precisão; estabilidade contra vento, neve, queda de pequenos ramos e pequenas frutas e não ser invasivo. A principal desvantagem é não efetuar medições para plantas com o caule de diâmetro superior a 30 cm (Ecomatik).

Uma vez que a implementação do dendrómetro será em videiras, para este trabalho foi o elemento escolhido tendo em conta as suas especificações.



(a)

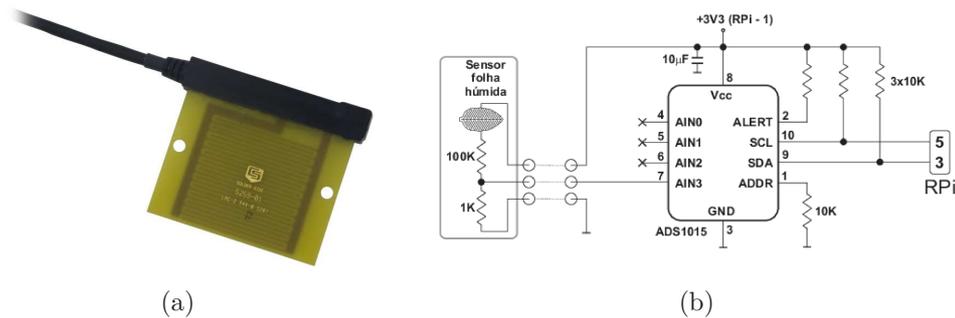


(b)

**Figura 4.7** – O Dendrómetro DD-L: (a) Fotografia; (b) Interligação do dendrómetro ao protótipo. Adaptado de (Ecomatik).

### Condensação de água nas folhas

Através de um sensor de folha húmida (237-L Wet Leafness Sensor, Campbell, USA), Fig. 4.8, é possível determinar a condensação da água nas folhas (Scientific, 2018a). Este sensor mede a condensação através da alteração da resistência elétrica da área do sensor, na transição de seco para húmido. Sabendo que, uma superfície húmida é menos resistente que uma superfície seca, levando então que as medições sejam dependentes da existência de água na superfície do sensor (Scientific, 2018b). A tabela 4.4 resume algumas das suas características.



**Figura 4.8** – Sensor 237-L: (a) Fotografia; (b) Interligação do 237-L ao protótipo. Adaptado de [Scientific \(2018b\)](#).

Transição da resistência ao molhado/seco	50 e 200 k $\Omega$ (sensor não revestido)
	20 a 1000 k $\Omega$ (sensor revestido)
Temperatura de serviço	0 a 100 °C
Largura	7,1 cm
Comprimento	7,6 cm
Profundidade	0,64 cm
Peso	91 g

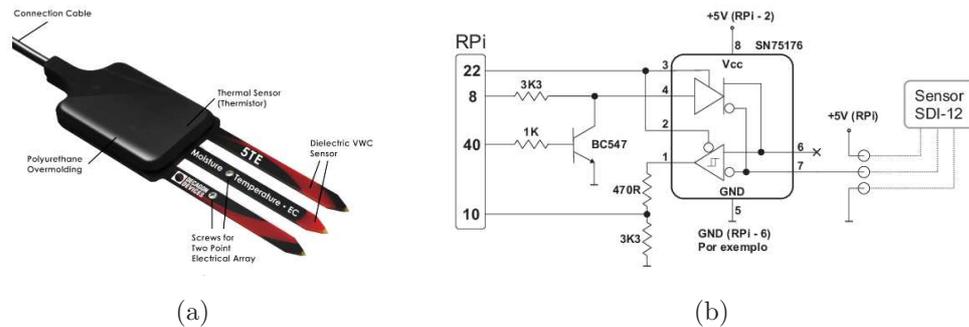
**Tabela 4.4** – Especificações do sensor 237-L de folha húmida. Adaptado de ([Scientific, 2018b](#)).

### Teor de água, condutividade elétrica e temperatura do solo

Tendo em conta as grandezas necessárias, o componente que melhor se enquadra neste projeto tendo em conta o baixo custo e a disponibilidade é um sensor da família de sensores ECH20, nomeadamente 5TE (Decagon, USA). Como referido anteriormente, este componente utiliza a norma SDI-12 para comunicação e encontrou-se disponível para uso neste trabalho.

O sensor 5TE, Fig. 4.9, é um sensor combinado usado na monitorização da condutividade elétrica, temperatura e o conteúdo volumétrico de teor de água nos solos. O 5TE determina a volumetria de teor de água (VWC) medindo a constante dielétrica do solo entre os elétrodos. O sensor trabalha a uma frequência de 70 MHz, para minimizar a textura e a salinidade presentes no solo, tornando o 5TE preciso na

maioria deles. Para a temperatura o 5TE usa um termístor, e para a condutividade elétrica usa um elétrodo de aço inoxidável. Este sensor opera nas escalas de medições de 0 a 100 % de VWC -40 to 50 °C e 0 até 23 dS/m, respetivamente (Decagon, 2018; Metergroup, 2018a).



**Figura 4.9** – O sensor 5TE: (a) Componentes do sensor 5TE; (b) Interligação do 5TE ao protótipo. Adaptado de Decagon (2018).

### 4.3.5 Dispositivo de imagem

Um dispositivo de imagem torna-se cada vez mais num elemento fulcral para a monitorização de processo agrícolas. Através de imagens recolhidas, através de fotografia e posterior análise é possível chegar a conclusões plausíveis sobre o estado hídrico da planta através do método utilizado desde os inícios da agricultura, o método visual. Para a realização deste trabalho foi utilizada uma webcam HP HD 2300 Y3G74AA, disponível para o uso neste trabalho. Extremamente fácil de utilizar, esta webcam liga-se ao SBC por cabo USB.



**Figura 4.10** – Webcam HP HD 2300.

### 4.3.6 Conetividade com o exterior

O protótipo desenvolvido deve comunicar com um sistema remoto com o objetivo de transferir os dados entretanto adquiridos e temporariamente armazenados e também de receber instruções. Esta comunicação, dadas as limitações decorrentes do uso deste tipo de sistemas em campo agrícola, pode ser feita recorrendo a uma ligação GSM/GPRS.

Para o efeito, foi usado, durante os ensaios, um hotspot de internet móvel. Para este trabalho foi utilizado um Wi-Fi Huawei E5330, Fig. 4.11, de fácil instalação.



Figura 4.11 – Router Wi-Fi Huawei E533.

### 4.3.7 Alimentação elétrica do protótipo

Um dos maiores desafios da monitorização em campo agrícola é a alimentação elétrica dos dispositivos eletrónicos utilizados, uma vez que a sua disponibilidade é escassa necessitando de reservatórios de energia que possam ser recarregados e/ou substituídos.

Uma opção que tem grande demanda para dispositivos IoT que perspetivam uma longa vida operacional, é a alimentação de baterias recarregadas por energia solar fotovoltaica. Para ser concedida tal tipo de alimentação a energia fornecida tem de ser capaz de garantir a viabilidade de todos os dispositivos envolvidos (Jayakumar et al., 2014).

Neste projeto foi utilizado sistema de alimentação auto-sustentável. Um painel solar de 30 W/12 V ligado a um carregador com corrente de carga de 10 A e 12/24 V e uma bateria de chumbo-ácido selada (*Valve Regulated Lead Acid* - VRLA) de 12 V. Posteriormente, a tensão da bateria foi reduzida para 5 V através de um conversor DC/DC.

A tabela 4.5 resume os dispositivos usados na alimentação elétrica.

Descrição	Modelo	Fabricante
Painel Solar	30 W 12 V	Xunzel
Controlador de carga	6.6 C	Steca Solsum
Bateria	UL 18-12 12 V 18Ah/20HR	Ultracell
Conversor	12V ->5 V	National Semiconductor

**Tabela 4.5** – Especificações do sistema de alimentação (Xunzel, 2016; Ultracell, 2018; Elektronik).

## 4.4 Serviços de software

O dispositivo descrito anteriormente foi concebido para a interligação com um conjunto de sensores, uma câmara de vídeo que permite a recolha de imagens e está dotado de comunicações com o exterior através de um *hotspot* GSM/GPRS 3G/4G. Como referido, o critério de seleção dos componentes foi o seu baixo custo para permitir que não haja grandes entraves à sua instalação.

Nesta secção descrevem-se os serviços de software que foram desenvolvidos para que este equipamento possa funcionar de forma correta, preferencialmente sem falhas ou com falhas das quais se possa recuperar de forma automática, isto é, sem intervenção humana. Em termos de serviços de software, há a ter em conta os seguintes serviços, descritos nas secções seguintes.

1. Sistema operativo;

2. Sistema de gestão de base de dados;
3. Serviços cron;
4. Algoritmo principal;
5. Módulos ou *script's* de gestão das interfaces implementadas.

#### 4.4.1 Sistema operativo

A Raspberry Pi Foundation fornece o Raspbian, Fig. 4.12, uma distribuição Linux baseada no Debian. O Linux é tecnicamente apenas o *kernel*, e um sistema operativo (SO) é muito mais do que isso. A coleção total de *drivers*, serviços e aplicações compõem o SO. Uma diversidade de distribuições de Linux tem sido desenvolvida ao longo dos anos, algumas das mais comuns em computadores *desktop* são Ubuntu, Debian, Fedora e Arch (Richardson and Wallace, 2013).

Para este sistema foi utilizada uma distribuição de Linux, recomendada pela Fundação Raspberry, o Raspbian baseado no Debian o qual se encontra disponível em [www.raspberrypi.org/downloads](http://www.raspberrypi.org/downloads). Este sistema operativo promove a utilização do Python como a principal linguagem de programação mas, com suporte para muitas outras linguagens.

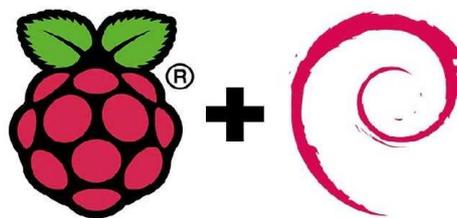


Figura 4.12 – Raspberry + Debian = Raspbian. Adaptado de Richardson and Wallace (2013).

### Módulos instalados no sistema operativo

Após a configuração do SO, foi necessária a instalação de alguns módulos que permitissem o acoplamento de todos os periféricos desejáveis. Para tal, foram instalados os seguintes:

- Adafruit-ADS1x15 (1.0.2)
- Adafruit-DHT (1.3.2)
- Adafruit-GPIO (1.0.3)
- mysqlclient (1.3.7)
- pigpio (1.38)
- pip (9.0.1)
- pyOpenSSL (16.2.0)
- pyserial (3.2.1)
- python-crontab (2.3.4)
- python-dateutil (2.7.3)
- RPi.GPIO (0.6.3)
- wiringpi (2.44.5)
- wiringpi2 (2.32.3)

### 4.4.2 Base de dados local

De forma a relacionar as tabelas utilizadas neste projeto, encontra-se a representação do diagrama E-R implementado para este sistema nas Fig. 4.13 e Fig. 4.14.

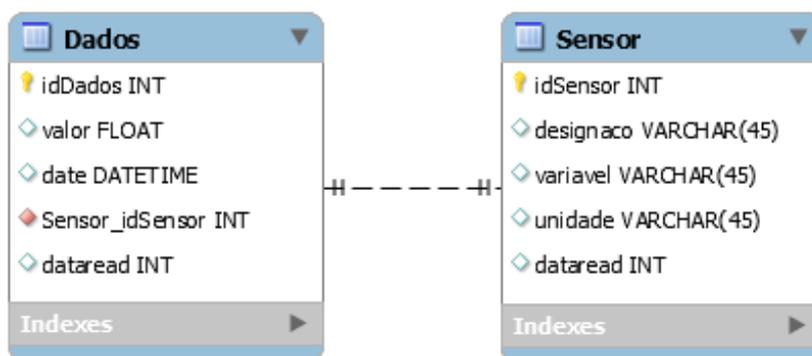


Figura 4.13 – Diagrama E-R.

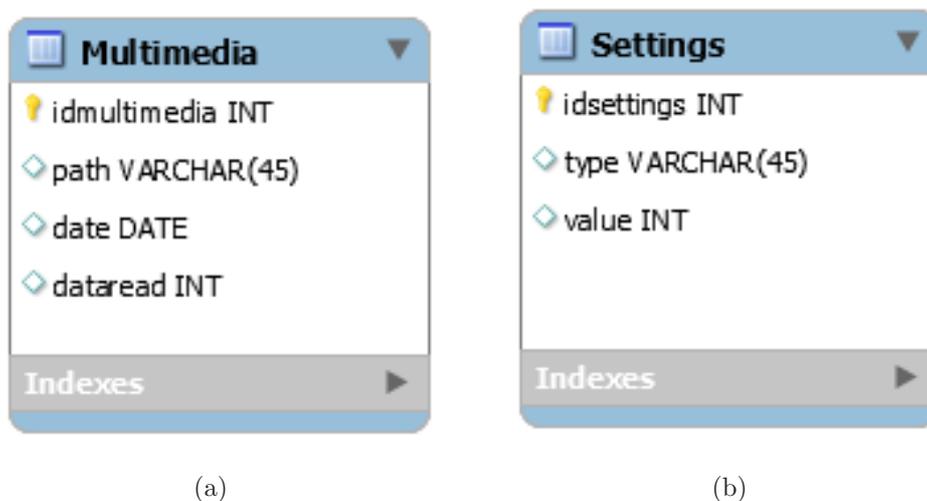


Figura 4.14 – Tabelas presentes na base de dados local. (a) Tabela associada aos ficheiros de multimédia recolhidos pelo sistema; (b) Tabela de *settings* gerais do sistema.

Esta base de dados foi elaborada utilizando o Sistema de Gestão de Base de Dados, phpmyadmimn. Tem como objetivo armazenar os valores recebidos pelas leituras dos sensores/câmara. Para tal, foi elaborado um *script* em linguagem Python que conta o desenvolvimento em software deste projeto onde se possibilitam funcionalidades

como obter a data/hora para um *update*, acordar os sensores para as suas leituras, ligação à base de dados local para onde serão enviados os dados. Este *script* foi devidamente instalado numa ferramenta disponível para sistemas UNIX, o *crontab*.

### 4.4.3 Sistema de gestão de base de dados

Para o armazenamento temporário dos dados recolhidos dos sensores foi necessário a instalação de um sistema de base de dados no Raspberry Pi. Para tal optou-se pela sobejamente conhecida base de dados MySQL por ser um sistema simples e com um suporte online muito expressivo. A interface com a base de dados ficou a cargo do phpMyAdmin, necessária para a administração e gestão da base de dados, Fig. 4.15.

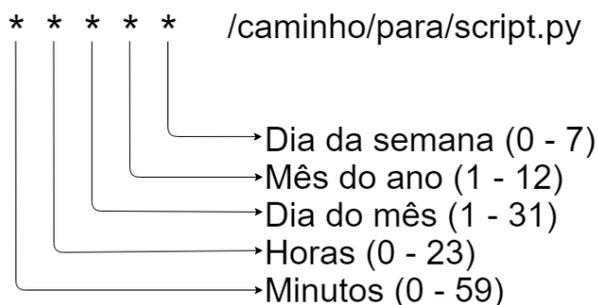


Figura 4.15 – Visão geral da ferramenta de administração de bases de dados MySQL, phpMyAdmin.

### 4.4.4 Serviços cron

O *Crontab* (*CRON TABLE*) é uma agenda de tarefas que contém o cronograma de entradas *cron* para serem executadas. O *crontab* permite que tarefas sejam executadas em segundo plano em intervalos regulares. Estas tarefas são normalmente designadas por “cron jobs” (Choice, 2018). Um cron job é um conjunto específico de instruções de execução especificando dia, hora e comando para executar. Os *script's* instalados no *crontab* seguem uma agenda de tarefas definidas pelo utilizador. Neste trabalho

foram estabelecidas, com base no software do sistema utilizado, os melhores *timings* para a execução de cada *script*. Para a instalação de *script's* no crontab é necessária a compreensão do seu funcionamento, onde existem regras para estabelecer o *timing* de execução. É ilustrado na Fig. 4.16, o procedimento a ter em conta para a instalação de um cron job.



**Figura 4.16** – Comandos básicos do crontab.

Neste trabalho foi necessário instalar alguns cron job's para que o sistema se tornasse autónomo a nível de software.

```
@reboot python /home/pi/Desktop/scripts_Finais/request.py #horas
```

Executa o *script* sempre que o sistema é inicializado.

```
@reboot sleep 60 && python /home/pi/Desktop/scripts_Finais/prototipo.py #txAq
```

Executa o *script* sempre que o sistema é inicializado com um delay de 60 segundos.

```
0 0 * * */7 python /home/pi/Desktop/scripts_Finais/deletedb.py #delete
```

Executa o *script* a cada 7 dias.

```
0 */2 * * * python /home/pi/Desktop/scripts_Finais/db2mysense.py #txSend
```

Executa o *script* de duas em duas horas.

```
0 */2 * * * python /home/pi/Desktop/scripts_Finais/cam2mysense.py #txCam
```

Executa o *script* de duas em duas horas.

### 4.4.5 Algoritmo principal

O algoritmo que rege o funcionamento do protótipo encontra-se ilustrado no fluxograma da Fig. 4.17. De uma forma resumida, o sistema opera segundo os pontos enumerados de seguida.

- O Raspberry é iniciado, sendo carregados todos os ficheiros necessários para que ele fique operacional;
- Pelo crontab são executadas tarefas, com os objetivos de fazer o *update* da data/hora e inicialização do programa de leitura dos sensores;
- A cada 15 minutos, os sensores são acordados e é efetuado o pedido para a inicialização das medições;
- A cada iteração as constantes de estudo são guardadas em variáveis para poderem ser enviadas para a base de dados local;
- Os dados são enviados para a base de dados local utilizando *query's*;
- A cada 2 horas é ativada uma tarefa que seleciona toda a informação existente na base de dados local (dados referentes a leitura dos sensores) e converte esses valores em formato JSON;
- Os dados já formatados são enviados para a nuvem *mySense*, juntamente com o ficheiro de imagem presente na base de dados.

O programa que dá início ao sistema, isto é o *script* que tem a particularidade de ativar os sensores para leituras e comunicação com a base de dados é executado automaticamente no arranque do Raspberry Pi. Primeiramente estabelece uma ligação à base de dados local para averiguar se houve alterações na constante de tempo de aquisição, comum a todos os sensores. Caso essa constante na base de dados não coincida com a que se encontra ativa, o *script* automaticamente altera a constante para o valor que se encontra na base de dados ficando assim ativa

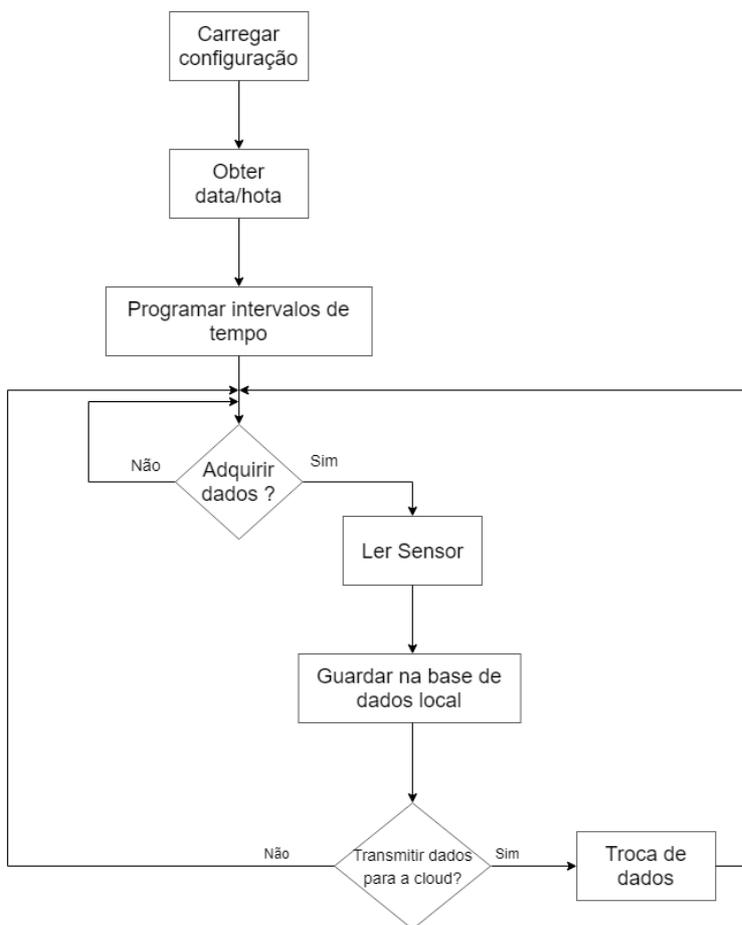


Figura 4.17 – Fluxograma relativo ao algoritmo geral de funcionamento do protótipo.

para a próxima leitura. Quando o valor dessa variável for atingida, os sensores são ativados e procede-se à leitura dos mesmos. Feita essa leitura os dados devem ser inseridos na base de dados local, então, são feitas as devidas ligações à base de dados phpmyadmin para conexão, envio de dados e o devido fecho da ligação à base de dados. Quando o último sensor fizer a devida iteração com a base de dados, o *script* fica a correr em “background” até que seja atingido o valor da variável tempo de aquisição. Quando tal acontecer o programa é iniciado todo novamente seguindo a mesma lógica.

Como referido, o crontab permite que sejam instaladas várias tarefas. Desta forma, foram instaladas novas tarefas que neste caso visa a ativação de um *script* escrito

em linguagem Python que de duas em duas horas faz um pedido à base de dados de toda a informação dos dados retirados dos sensores para que esses dados sejam convertidos em formato de aceitação, JSON, por parte do **mySense**. Após serem convertidos os dados para JSON, estes são enviados para o **mySense** através de um pedido HTTP. Quando enviados os dados o servidor retorna uma resposta. Caso essa resposta seja 200, significando que foi bem sucedido, é executada uma *query* para a base de dados local que muda o estado da flag *dataread* de 0 para 1. Ao fim de 7 dias esses dados procedidos corretamente são eliminados através de um *scrip* em python instalado no *corn*. Os códigos recebidos como resposta do servidor podem ser consultados em : [https://mysense.utad.pt/api.php#api\\_httpcodes](https://mysense.utad.pt/api.php#api_httpcodes).

Por fim, existe um *script* que está instalado no *cron* para que o dispositivo de imagem capte uma fotografia a cada intervalo de tempo de duas horas. Este *script* tem a particularidade de fazer o acesso à base de dados local, quando é efetuado o comando para capturar a fotografia e, posteriormente invocar um *script* em linguagem PHP que envia essa mesma fotografia para a plataforma **mySense**.



# 5

## Resultados obtidos e discussão

---

Neste capítulo são apresentadas as principais funcionalidades dos *scripts* implementados e alguns resultados obtidos com o sistema protótipo implementado, testado em laboratório.

### 5.1 Avaliação em laboratório

Para avaliação do protótipo, numa primeira fase em laboratório, ligaram-se um conjunto de sensores ao SBC e implementaram-se um conjunto de procedimentos de testes. A Fig. 5.1, ilustra o protótipo na bancada de ensaio.

O objetivo da avaliação em laboratório foi o de testar todos os procedimentos de software que gerem o funcionamento do protótipo.

Foram feitos 4 programas para as seguinte funcionalidades:

- Recolha de dados dos sensores DHT22, folha húmida, sensor de características do solo e pluviómetro - Foi implementado um *script* que periodicamente recolhe informação de todos os sensores e os guarda na base de dados.

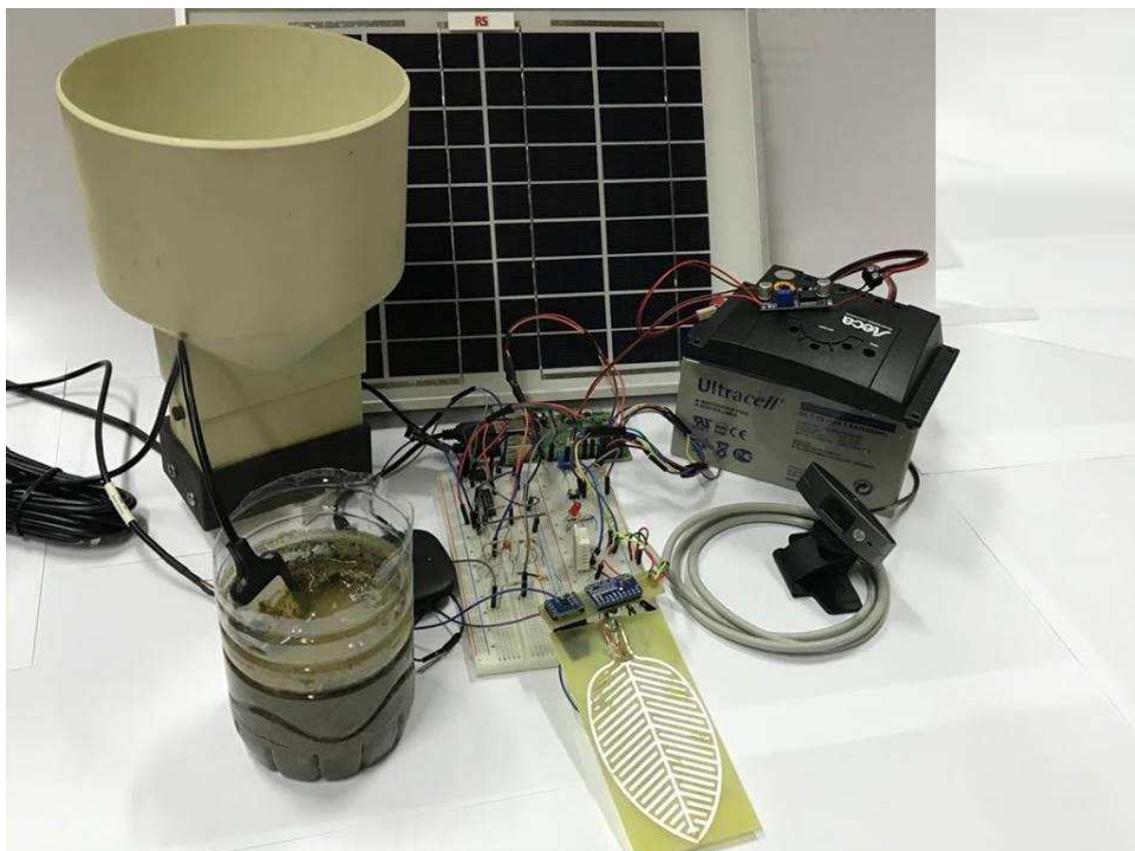


Figura 5.1 – Protótipo implementado, em bancada de laboratório.

- Integração com o barramento SDI-12 - Foi implementado um *script* que efetua a comunicação com o sensor 5TE, onde as temporizações foram alvo de cuidado adicional.
- Transferência de dados - Foi implementado um *script* que manda periodicamente dados para a nuvem mySense.
- Recolha de imagens - Foi implementado um *script* que tira fotos periodicamente e as guarda como ficheiros e os regista na base de dados.

Estes *scripts* são avaliados nas secções seguintes.

## 5.2 Plataforma mySense

A plataforma **mySense** é um ambiente de suporte à integração de dados desenvolvida na UTAD por um conjunto de investigadores com o objetivo de proporcionar uma ferramenta de integração, armazenamento e visualização de dados. A página principal está ilustrada na Fig. 5.2.



Figura 5.2 – Plataforma mySense.

Para que a integração dos dados do protótipo seja possível, é necessário especificá-lo no ambiente **mySense**. Cada dispositivo físico, isto é, um dispositivo que gera dados decorrente de sensores ligados aos seus canais, deve ser especificado como um objeto **mySense**, ao qual se adicionam canais.

Na Fig. 5.3 ilustra-se a página do objeto correspondente ao protótipo e onde se mostram os canais adicionados.

Como se pode ver, a cada um dos sensores corresponde um canal, sendo especificado o nome e o tipo. Por exemplo, o canal 1 corresponde à medida de temperatura efetuada pelo sensor DHT22. Já o canal 10, é um sensor de imagem. Só após a correta especificação da estrutura do protótipo no ambiente **mySense** é que é possível enviar os dados armazenados localmente.

mySENSE IoT+ Traduzir sítio Serviços Notícias Rui Pires

Grupo de objetos Porto de dados

## Integrador do objeto RPRasp

Bem vindo à página geral deste objeto, onde pode gerir todos os seus recursos

Canais: 10: 7 **731** Click para o Porto de Dados desde 2018-09-26 16:03:39

20 Channels: 1 **32** Click para a Galeria de Imagens since 2018-09-26 16:03:39

Este objeto tem 0 fotografias [Adicionar](#)

Este objeto tem 8 canais associados [Adicionar](#)

▲ Tem registado um total de 8 canais mySense como proprietário. O limite associado ao seu tipo de conta é de 10. Ainda disponíveis: 32

Nº Canal	Nome	Tipo	Identificador	Nº Triggers	Triggers	Privacidade	Transdutor	Ações
1	Temperatura	↻	opMjld0HXG2GDnS	0	<a href="#">Adicionar/Editar</a>	DA: Public	DHT22 (Temperature)	<a href="#">Ver</a> <a href="#">Excluir</a>
2	Humidade relativa	↻	QH0E4aw0y0tjkol	0	<a href="#">Adicionar/Editar</a>	DA: Public	DHT22 (Relative)	<a href="#">Ver</a> <a href="#">Excluir</a>
3	Pluviómetro	↻	0TZT5SX5508t0ui	0	<a href="#">Adicionar/Editar</a>	DA: Public	Irrigation meter ADCON	<a href="#">Ver</a> <a href="#">Excluir</a>
4	Folha Humida	↻	qwfyWk7Jv3kKJLZ	0	<a href="#">Adicionar/Editar</a>	DA: Public	A733WET Leaf Wetness ...	<a href="#">Ver</a> <a href="#">Excluir</a>
5	Conteúdo ...	↻	zTBMZ0uHTYQzTimP	0	<a href="#">Adicionar/Editar</a>	DA: Public	STE (Volumetric water ...	<a href="#">Ver</a> <a href="#">Excluir</a>
6	Condutividade ...	↻	GGG7vLc9eplohpF	0	<a href="#">Adicionar/Editar</a>	DA: Public	STE (Electrical ...	<a href="#">Ver</a> <a href="#">Excluir</a>
7	Temperatura do solo	↻	m5SUSvVR9LdqPFb	0	<a href="#">Adicionar/Editar</a>	DA: Public	STE (Temperature)	<a href="#">Ver</a> <a href="#">Excluir</a>
10	Camera	📷	FsuNVFK6zSH6x	N/A	N/A	DA: Private	Imaging device	<a href="#">Ver</a> <a href="#">Excluir</a>

A mostrar 1 a 8 de 8 registos

Figura 5.3 – Página geral do objeto da plataforma mySense e, canais existentes.

## 5.3 Implementação da base de dados local

Como referido no capítulo anterior, todos os dados adquiridos são armazenados localmente numa base de dados MySQL antes de serem enviados, periodicamente, para o mySense.

A Fig. 5.4 ilustra o conteúdo da tabela Dados na interface phpMyAdmin. Como se pode observar, a cada amostra está associada a data/hora a que foi adquirida, qual o sensor correspondente `Sensor_idSensor`, o seu valor e o campo `dataread` que indica o seu estado de transferência para o ambiente mySense. Sempre que está a zero, indica uma inserção. Passando a um, indica que foi transferida com sucesso para o mySense e que, por isso, pode ser eliminada.

O conteúdo da tabela Multimedia está ilustrada na Fig. 5.5.

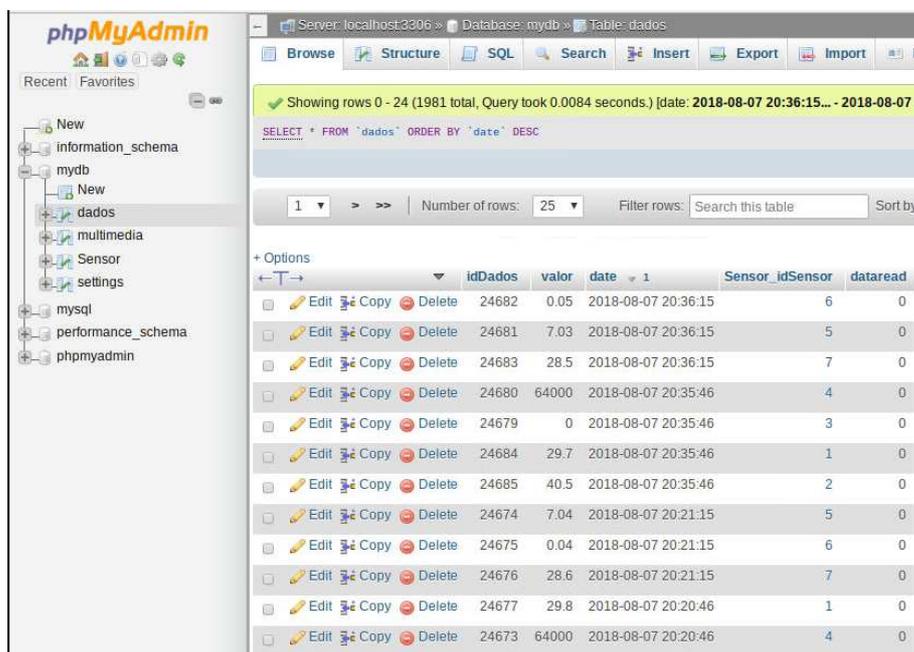


Figura 5.4 – Resultados de envio de dados para a base de dados local.

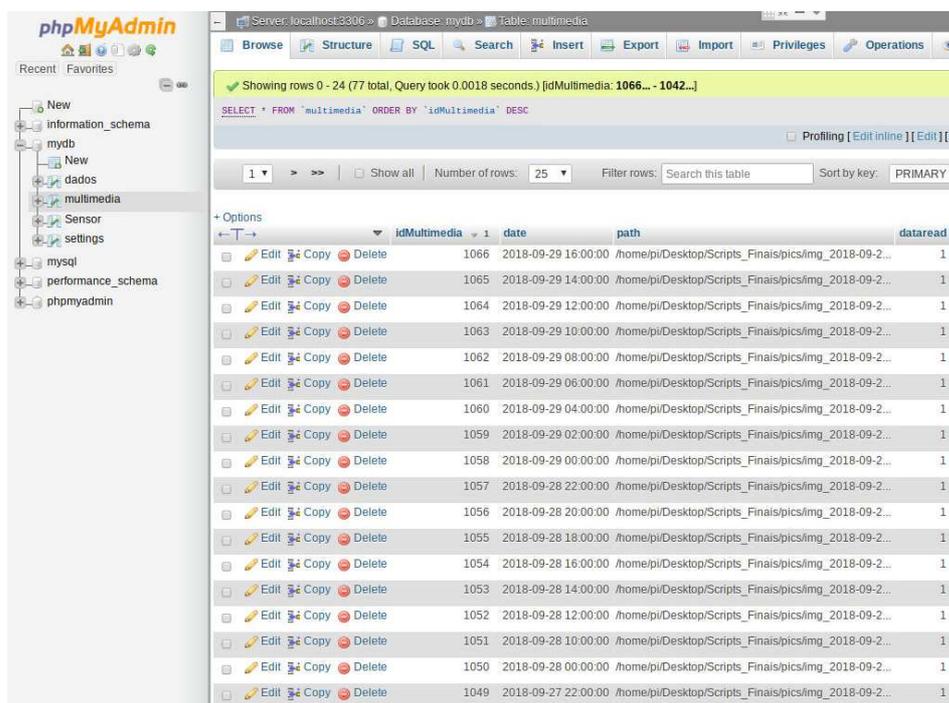


Figura 5.5 – Conjunto de resultados dos dados de multimédia na base de dados local.

## 5.4 Procedimento de software

### 5.4.1 Sensores de saída analógica

Os sensores de folha húmida e dendrómetro foram ligados à interface analógica ADS1015. Esta interface permite a conversão dos dados adquiridos pelos sensores analógicos para dados digitais. Para tal, foi elaborado um *script* que conta com as principais funcionalidades:

- É estabelecido um ganho de 8 na ADC  $GAIN\_EIGHT = 8$ , o que resulta num intervalo de  $+/- 0,512\text{ V}$ ,  $1\text{ bit} = 0,25\text{ mV}$ ;
- São adquiridos os dados analógicos e feitas as devidas conversões para cada um dos sensores. Por exemplo, a humidade a que o sensor está sujeito leva a uma alteração da resistência do sensor. Estando o mesmo polarizado (alimentado) e em série com um conjunto de resistências (duas, em que uma delas é variável para efeitos de calibração) a alteração da resistência do sensor traduz-se na alteração de uma tensão. Essa tensão pode ser medida usando um conversor A/D que através do valor obtido pela variável *value* e das conversões necessárias vão traduzir o nível de humidade a que o sensor está sujeito. A humidade a que o sensor está sujeito resulta numa tensão  $V_{\text{out}}$  ditada pela equação (5.1). Essa tensão equivale a uma resistência obtida pela expressão (5.2), no sensor que por sua vez indica que o sensor está sujeito a uma humidade.

$$V_{\text{out}} = \frac{\frac{value}{GAIN} \times 4,096}{2048} \quad (5.1)$$

$$Rs = 1000 \times \frac{3,3}{V_{\text{out}}} - 101000 \quad (5.2)$$

Numa determinada medição foi obtido um valor de tensão de 5 mV. Essa tensão representa uma resistência aos terminais do sensor de 500 K $\Omega$ . De

acordo com a calibração do sensor isso equivale a um nível de humidade baixa, ou seja, com o sensor ligeiramente molhado.

### 5.4.2 Sensores SDI-12

Para testar o sensor 5TE, foi necessário recorrer á utilização da porta serie do SBC e, configurá-la para o formato utilizado no SDI-12. Numa primeira fase, foi necessário compreender a lógica de sequência de temporizações e comandos utilizados por esta norma. Após um estudo sobre as particularidades da norma SDI-12, elaborou-se um *script* que envia comandos para o sensor e obtém as sua resposta. Os passos seguidos foram:

- Configuração das portas GPIO, utilizando o wiringpi;
- Configuração da porta serie para enviar/receber comandos com o formato baud = 1200, 7 data bits, 1 parity bit, 1 start e 1 stop bit;
- Inicialização do sensor, isto é, acordar o sensor SDI-12 ligado ao barramento;
- Envio do comando “1R0” para uma medição contínua;
- Receção de uma resposta do sensor e, verificação e correspondente validação.

### 5.4.3 Aquisição de imagem

Para o serviço de multimédia foi implementado um *script* que permite tirar uma fotografia e guardar a mesma no SBC como ficheiro JPG. As imagens recolhidas são guardadas com o caminho para a localização delas e o data/hora a que foram tiradas. Em paralelo a essa tarefa é executado em PHP um *script* que envia essa fotografia para a base de dados local.

#### 5.4.4 Procedimento de transferência de dados

O envio de dados para a base de dados local encontra-se no mesmo *script* da recolha de dados. No final dos sensores efetuarem as medições, estas são guardadas em variáveis e enviadas para a base de dados local com a respetiva hora e data de aquisição dos dados. O valor 0 é atribuído ao campo *dataread* quando os dados são guardados na base de dados local. Os passos a seguir foram:

- Inicialização da base de dados com respetivos parâmetros de entrada para a tabela correta;
- Elaborada a query de inserção para cada parâmetro recolhido pelos sensores;
- Envio dos dados para a base de dados local.

Posteriormente é efetuado o envio de dados para a plataforma *mySense*. Os dados onde a variável *dataread* = 0 são enviados para a plataforma e a variável é atualizada para 1.

- Elaborada a query de seleção de todos os valores inseridos na base de dados onde *dataread* = 0;
- Conversão dos dados para formato JSON, de acordo com o requerido pela plataforma de gestão;
- É efetuado um pedido HTTP, (PUT), com os respetivos cabeçalhos e *payload*.
- Após o envio e verificação do seu sucesso, é feito um update da variável *dataread* para 1, podendo assim serem eliminados da base de dados local.

## 5.5 Recolha de dados

O protótipo desenvolvido tem funcionado em modo contínuo nos últimos dois meses, em laboratório. Nas figuras seguintes, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, ilustram-se os gráficos de algumas das variáveis recolhidas.

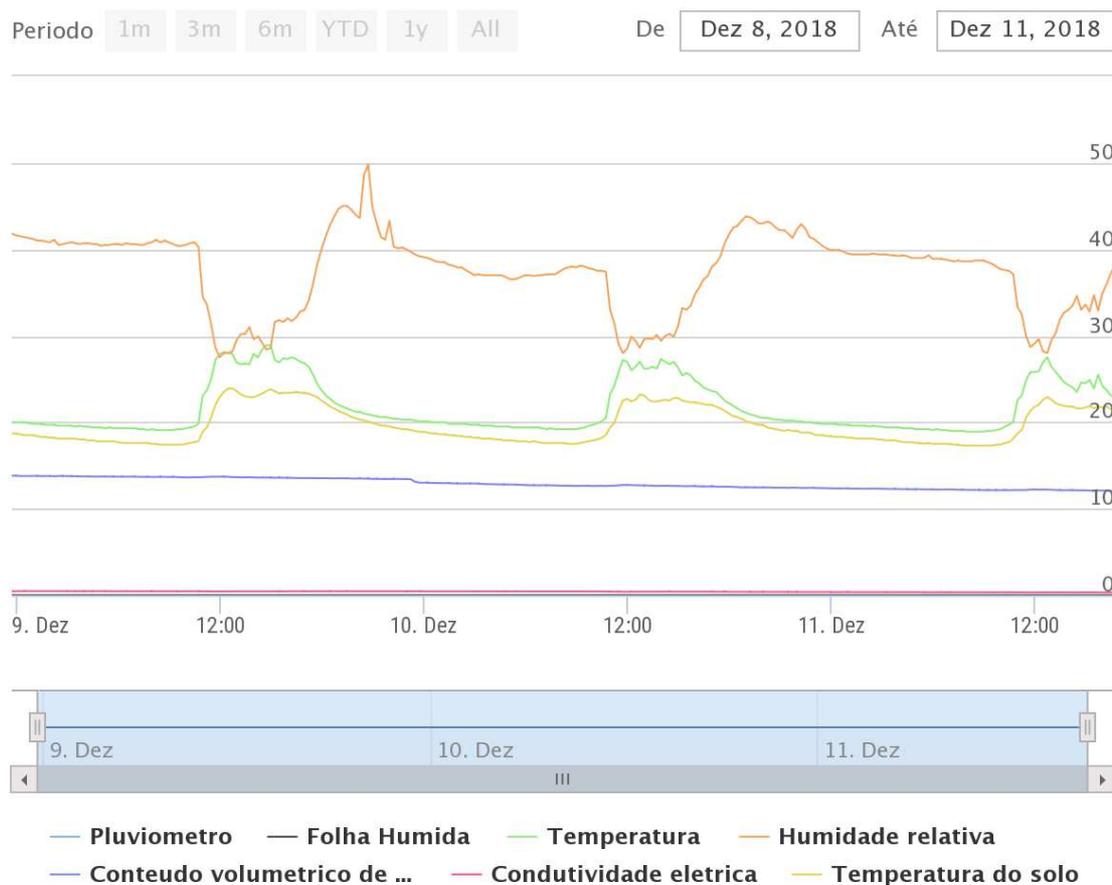


Figura 5.6 – Gráfico com os resultados obtidos através do mySense.

O gráfico da Fig. 5.7, ilustra a simulação obtida do sensor de folha húmida onde as alterações observadas ocorriam quando a resistência sofria uma alteração de valores. É importante referir a escala neste gráfico que de acordo com o fabricante de 0 a 4 a folha encontra-se com a sua superfície seca e de 5 a 10 com a sua superfície húmida, sendo que de 4 a 5 é considerado indefinido.



**Figura 5.7** – Gráfico ilustrativo aos resultados dos dados do sensor de folha húmida na plataforma mySense.

Numa breve análise ao gráfico da Fig. 5.8, verifica-se uma decadência do conteúdo volumétrico de água no solo, o qual foi repostado com uma simulação de “rega” no dia 28 de Novembro.

No gráfico da Fig. 5.9, é demonstrada a simulação de queda de chuva, onde a sua escala é apresentada em milímetros, ocorrida no dia 3 de Setembro.

Durante a realização dos testes em laboratório foi necessária a verificação se todos os processos de aquisição de dados se encontravam no seu correto funcionamento. Numa breve análise ao gráfico da Fig. 5.11, observa-se uma alteração do estado da condutividade elétrica do solo provocada pelo efeito de “regar” que neste caso foi simulado em laboratório adicionando água à amostra de solo em estudo.



Figura 5.8 – Gráfico ilustrativo aos resultados dos dados do sensor 5TE - conteúdo volumétrico de água no solo na plataforma mySense.



Figura 5.9 – Gráfico ilustrativo aos resultados dos dados do sensor pluviómetro na plataforma mySense.



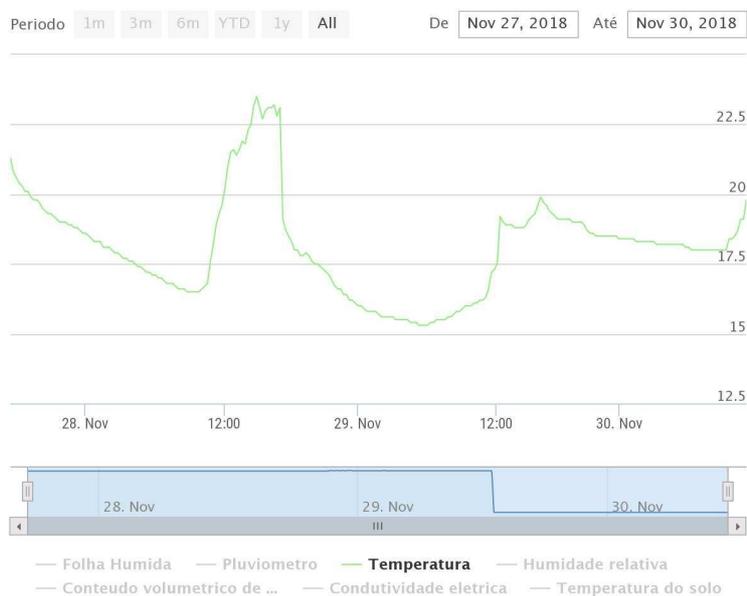
Figura 5.10 – Gráfico ilustrativo aos resultados dos dados do sensor 5TE - temperatura do solo na plataforma mySense.



Figura 5.11 – Gráfico ilustrativo aos resultados dos dados do sensor 5TE - condutividade elétrica do solo na plataforma mySense.



**Figura 5.12** – Gráfico ilustrativo aos resultados dos dados do sensor DHT22 - humidade relativa do ar na plataforma mySense.



**Figura 5.13** – Gráfico ilustrativo aos resultados dos dados do sensor DHT22 - temperatura do ar na plataforma mySense.

No que diz respeito à recolha de imagens estas foram transferidas para a plataforma mySense, Fig. 5.14.

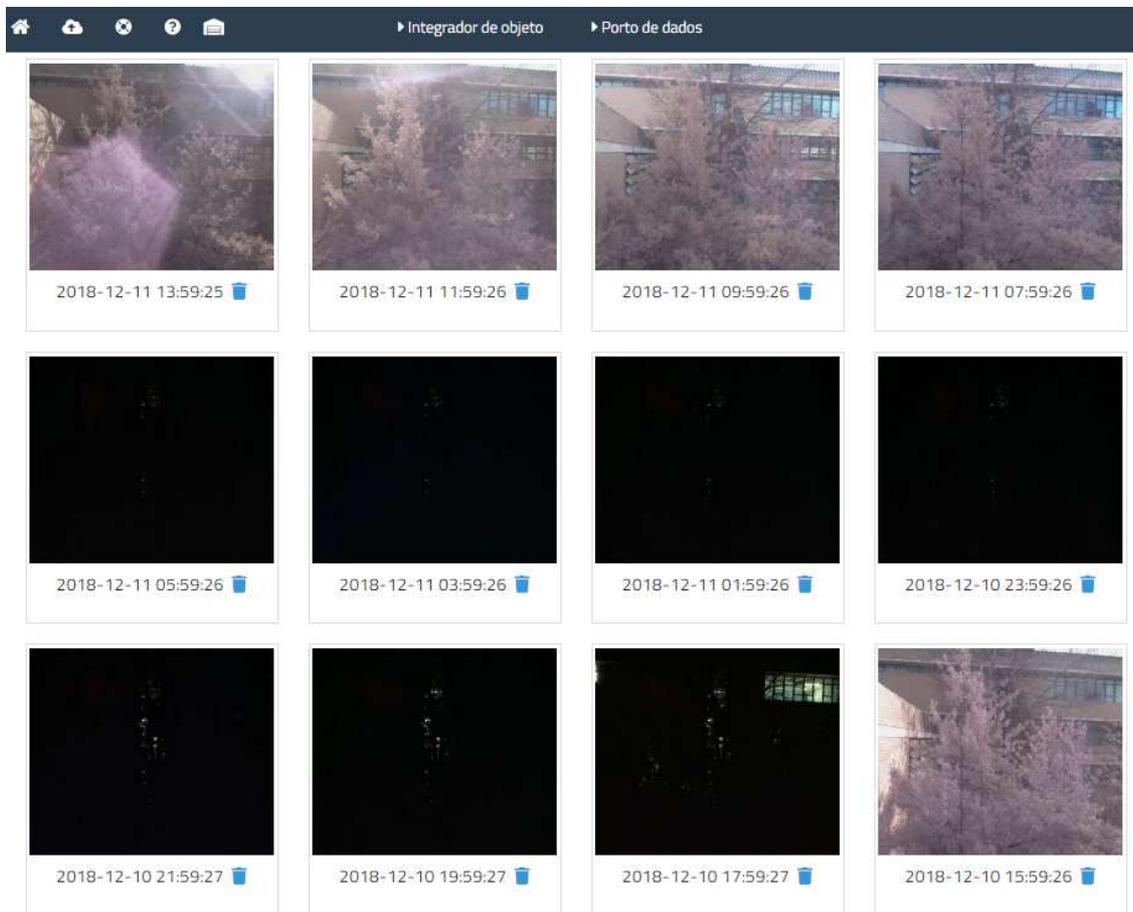


Figura 5.14 – Conjunto de resultados dos dados de multimédia na plataforma mySense.

## 5.6 Discussão

O protótipo desenvolvido provou ser um sistema eficaz em laboratório, como se verifica pelos resultados obtidos e ilustrados pelos gráficos.

Ao longo dos testes efetuados nestes últimos dois meses, foi tido sempre presente a preocupação de criar uma ferramenta capaz de auxiliar a monitorização de um sistema de rega. Os testes efetuados utilizando o sensor DHT22 permitiram obter a relação entre a humidade relativa do ar, Fig. 5.12, e a temperatura do ar Fig. 5.13. Já por sua vez os dados obtidos pelo sensor 5TE de características do solo permitiram observar a evolução da temperatura do solo Fig. 5.10, a condutividade elétrica do solo Fig. 5.11 e o conteúdo volumétrico de água presente no solo Fig. 5.8. O pluviómetro foi simulado de acordo com o circuito elétrico do RG2+M-6, onde se teve de simular o volume de precipitação durante os ensaios para obter resultados, Fig. 5.9. Por fim, o sensor de folha húmida numa fase de teste foi substituído por um potenciómetro onde simulava as diferenças de humidade presentes na folha, Fig. 5.7.

A avaliação continua ao longo dos dias de ensaio, e durante a escrita desta dissertação, mostrou viabilidade para ser testado em campo com condições ambientais reais.

O facto de não haver tempo suficiente na elaboração desta dissertação, inviabilizou a montagem de uma caixa apropriada para o sistema o que, por sua vez invalidou ensaios em campo, onde se poderia ter testado a robustez da solução escolhida para este trabalho.



# 6

## Conclusões e trabalho futuro

---

O objetivo subjacente ao presente trabalho passou pelo estudo de indicadores para gestão de rega na viticultura de precisão. Para tal, concebeu-se e validou-se um protótipo capaz de monitorizar um conjunto alargado de variáveis que pode potenciar aplicações de rega inteligente. A determinação de outros parâmetros como a evapotranspiração poderia ser determinada adicionando sondas de Granier e de dendrómetros com o envio dos respetivos dados para o mySense.

Neste capítulo apresenta-se uma revisão geral do trabalho, retirando as respetivas conclusões e ideias para trabalho futuro.

### 6.1 Conclusões

De modo a ser possível o cumprimento dos objetivos propostos foi necessário numa primeira fase efetuar um estudo sobre a área em estudo e sobre as necessidades hídricas das plantas. Assim, no capítulo 2 efetuou-se um levantamento dos principais elementos que condicionam as necessidades hídricas das plantas. Foram também abordados os métodos de estudo que melhor permitem observar e garantir as necessidades hídricas.

No capítulo 3 procedeu-se a um levantamento sobre o tipo de aplicações para gestão de rega na agricultura em geral, concluindo-se que cada vez mais a introdução de tecnologias tem vindo a aumentar. Após este estudo concluiu-se que apesar de ainda não ser com muito uso de IoT para controlo de rega na vinha, a sua demanda tem aumentado cada vez mais e mais, surgindo assim sistemas de rega inteligente.

O capítulo 4 descreve a implementação prática e os componentes que foram usados para a implementação de um protótipo para este tipo de práticas. Verificou-se que o protótipo funciona como o pretendido, permitindo monitorizar as variáveis pretendidas de modo eficaz e robusto. Dividindo o trabalho por módulos, optou-se por um SBC Raspberry Pi para efetuar o controlo do sistema de gestão. Entre todos os módulos acima descritos, o módulo SDI-12, foi uma mais valia para esta dissertação, sendo que, é utilizada uma norma que permite a ligação de vários sensores SDI-12 com diversas variáveis de estudo para o melhor interesse em questão. Numa primeira fase teve de ser entendida a forma de operação desta norma, um estudo detalhado sobre as especificações necessárias para o desenvolvimento deste protocolo de comunicação. Posto isto foi elaborado um algoritmo e respetiva implementação em que se garantisse a máxima fiabilidade e robustez.

Por fim, o capítulo 5 descreve os resultados obtidos do trabalho. Verificou-se que o protótipo funciona como pretendido, permitindo a monitorização desejada. O módulo de alimentação efetua uma boa sustentabilidade do sistema por completo.

## 6.2 Perspetivas de trabalho futuro

Após a conclusão do trabalho que conduziu à presente dissertação, verificou-se que existem diversos aspetos que podem ser melhorados e trabalhados de uma forma mais

sistemática, com o intuito de otimizar a solução proposta. Dessa forma, apresentam-se de seguida alguns pontos que podem ser alvo de trabalho futuro:

1. Desenvolvimento de uma placa de circuito impresso que permita conter toda a eletrónica testada durante os ensaios. Embora de conceção simples, esta não foi desenvolvida;
2. Incorporação de suporte a sondas de Granier, para uma estimativa da transpiração da videira. Para tal, o circuito de interface terá de comportar um conversor A/D capaz de quantificar as baixíssimas tensões produzidas pelo termopar instalado nas sondas. Também teria de ser equacionada a fonte de corrente que deve alimentar o elemento aquecedor usado no método de Granier.
3. Desenvolvimento de um algoritmo que com base nos dados armazenados na base de dados local permite conhecer as necessidades hídricas das plantas e assim indicar uma possível ação de rega.



## Referências bibliográficas

---

- Adafruit (2018). O sensor DHT22. Sítio de Internet. Consultado a 06 de Julho de 2018. URL - <https://learn.adafruit.com/dht>. 45, 46
- Agriexpo (2010). Tree dendrometer / stem / with data logger. Sítio de Internet. Consultado a 15 de Julho de 2018. URL - <http://www.agriexpo.online/prod/ecomatik/product-175066-16082.html>. 21
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., et al. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, 300(9):D05109. 11, 12
- Almeida, S. (2015). Transpiração (nas plantas). 11
- Carbonneau, A. (2002). Water management in the vineyard: theory and practice. *Progrès Agricole et Viticole (France)*. 16
- Carvalho, J. M. P. M. D. et al. (2016). *Importância económica da agricultura de regadio em Portugal. O caso da produção forrageira nos Aproveitamentos Hidroagrícolas associados da FENAREG para alimentação de bovinos*. PhD thesis, ISA-UL. 2

- Choice, A. (2018). Crontab quick reference. Sítio de Internet. Consultado a 10 de Julho de 2018. URL - <http://www.adminschoice.com/crontab-quick-reference>. 55
- Coppock, J. (2015). Development of a Raspberry Pi based, SDI-12 sensor environmental data logger. 41, 44
- Corporation, A. E. (2010). Manual band dendrometers. Sítio de Internet. Consultado a 15 de Julho de 2018. URL - <http://www.phytoqram.com/manualband.htm/>. 21
- Costello, L., Matheny, N., and Clark, J. (1992). Estimating water requirements of landscape plantings. *HortScience*, 27(12):1263–1263. 13
- Danielle, Dr. Patty Skinkis, V. E. S. . A. P. (2016). Monitoring for grapevine water stress mid-to-late summer. 17
- Daudet, F.-A., Améglio, T., Cochard, H., Archilla, O., and Lacoïnte, A. (2004). Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany*, 56(409):135–144. 20
- De Swaef, T., De Schepper, V., Vandegheuchte, M. W., and Steppe, K. (2015). Stem diameter variations as a versatile research tool in ecophysiology. *Tree Physiology*, 35(10):1047–1061. 20
- Decagon (2018). O sensor 5TE. Sítio de Internet. Consultado a 07 de Julho de 2018. URL - [http://www.ictinternational.com/content/uploads/2014/03/13509\\_5TE\\_Web.pdf](http://www.ictinternational.com/content/uploads/2014/03/13509_5TE_Web.pdf). 49
- Delgado-Rojas, J. S., Angelocci, L. R., Folegatti, M. V., and Coelho Filho, M. A. (2007). Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de lima ácida. *Engenharia Agrícola*, 27(2):404–413. 18, 19
- Delta-T. Environmental and meteorological sensors & systems. Sítio de Internet. Consultado a 12 de Julho de 2018. URL - <https://>

[www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/2017/05/Env-and-Met-Sensors-and-Systems-Specifications.pdf](http://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/05/Env-and-Met-Sensors-and-Systems-Specifications.pdf). 46

Doorenbos, J. and Pruitt, W. (1992). Calculation of crop water requirement. *Crop Water Requirement. Rome, Italy: FAO of the United Nations*, pages 1–65. 11, 12

Dursun, M. and Ozden, S. (2011). A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. *Scientific Research and Essays*, 6(7):1573–1582. xxiii, 27, 29

Ecomatik. Dendrometers. Sítio de Internet. Consultado a 12 de Julho de 2018. URL - [https://ecomatik.de/wp-content/uploads/2018/07/ECOMATIK\\_catalog\\_en\\_2018\\_Jul.pdf](https://ecomatik.de/wp-content/uploads/2018/07/ECOMATIK_catalog_en_2018_Jul.pdf). 47

Elektronik, S. Steca solsum. Sítio de Internet. Consultado a 11 de Julho de 2018. URL - <http://ultracell.net/datasheets/UL18-12.pdf>. 51

Fereres, E. and Goldhamer, D. (2003). Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 78(2):139–144. 20

Fernandes, M. A. (2017). Plataforma integrada de gestão de redes de sensores sem fios, em aplicações de agricultura de precisão. 3

Fernández, J., Palomo, M., Diaz-Espejo, A., Clothier, B., Green, S., Girón, I., and Moreno, F. (2001). Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management*, 51(2):99–123. 18, 19

Gálvez Pavez, R., Callejas Rodríguez, R., and Reginato Meza, G. (2011). Comparación de la cámara de presión tipo scholander modelo pump-up respecto a la cámara de presión tradicional en vides de mesa. *Idesia (Arica)*, 29(2):175–179. 17

García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M., Alarcón, J., Conejero, W., Ortuño, M., Nicolás, E., and Torrecillas, A. (2007). Preliminary assessment of the feasibility

- of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management*, 89(1-2):167–171. 20
- Gawali, Y. G. and Chaudhari, D. S. (2016). Wireless sensor network based monitoring for agricultural system. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 5(8). xxiv, 31, 32
- Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., and Fereres, E. (2014). Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. *Agricultural and forest meteorology*, 198:94–104. 15
- Granier, A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. In *Annales des Sciences forestières*, volume 42, pages 193–200. EDP Sciences. 18, 19
- Group, S.-. S. (2018). SDI12. Sítio de Internet. Consultado a 06 de Julho de 2018. URL - [http://www.sdi-12.org/current\\_specification/SDI-12\\_version-1\\_4-Dec-1-2017.pdf](http://www.sdi-12.org/current_specification/SDI-12_version-1_4-Dec-1-2017.pdf)". 40, 43, 44
- Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., and Porta-Gándara, M. Á. (2014). Automated irrigation system using a wireless sensor network and gprs module. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 63(1):166–176. 25, 26
- Idso, S. B., Jackson, R. D., and Reginato, R. J. (1977). Remote-sensing of crop yields. *Science*, 196(4285):19–25. 16
- Jackson, R. (1982). Canopy temperature and crop water stress. in “advances in irrigation”.(eds gs campbell, md jackson) pp. 43–85. 15
- Jayakumar, H., Lee, K., Lee, W. S., Raha, A., Kim, Y., and Raghunathan, V. (2014). Powering the internet of things. In *Proceedings of the 2014 international symposium on Low power electronics and design*, pages 375–380. ACM. 50

- Kalaivani, T., Allirani, A., and Priya, P. (2011). A survey on zigbee based wireless sensor networks in agriculture. In *Trendz in Information Sciences and Computing (TISC), 2011 3rd International Conference on*, pages 85–89. IEEE. 24
- Kim, Y., Evans, R. G., and Iversen, W. M. (2008). Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 57(7):1379–1387. xxiii, 3, 27, 28
- Kirkham, M. B. (2014). *Principles of soil and plant water relations*. Academic Press. 16
- Li, L. L., He, J. Y., Zhao, Y. P., and Yang, J. H. (2014). Design of microcontroller standard spi interface. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 618, pages 563–568. Trans Tech Publ. 44
- Lousada, A. M. M. (2015). Efeitos de estratégias de rega deficitária sobre os parâmetros ecofisiológicos da casta touriga franca na região do douro. 17
- Magalhães, L. S. (2016). Dendrómetro de baixo custo para a agricultura de precisão. Master's thesis. 1
- Magalhães, N. (2008). *Tratado de viticultura: a videira, a vinha eo terroir*. Chaves Ferreira. 16
- Magalhães, N. (2012). Rega da vinha, uma necessidade na região dos vinhos verdes. comportamento fisiológico da videira face à rega caso da região dos vinhos verdes. Pode ser consultado em [http://www.infovinho.pt/sites/default/files/Magalhaes\\_N\\_Videira\\_face\\_rega\\_reg\\_vv.pdf](http://www.infovinho.pt/sites/default/files/Magalhaes_N_Videira_face_rega_reg_vv.pdf), Acedido a 23 de Janeiro de 2018. 16
- Medeiros, A. T. (2002). Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de penman-monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas. *Paraipaba, Ce*, 103. 9

- Metergroup (2018a). 5TE Manuals. Sítio de Internet. Consultado a 07 de Julho de 2018. URL - [http://publications.metergroup.com/Manuals/20435\\_5TE\\_Manual\\_Web.pdf](http://publications.metergroup.com/Manuals/20435_5TE_Manual_Web.pdf). 49
- Metergroup (2018b). SDI-12: Everything you need to know to be successful. Sítio de Internet. Consultado a 06 de Julho de 2018. URL - <https://www.metergroup.com/environment/articles/sdi-12-everything-need-know-successful/>. 41, 42
- Moghaddam, M., Entekhabi, D., Goykhman, Y., Li, K., Liu, M., Mahajan, A., Nayyar, A., Shuman, D., and Teneketzis, D. (2010). A wireless soil moisture smart sensor web using physics-based optimal control: Concept and initial demonstrations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(4):522–535. xxiv, 30, 31
- Molz, F. J. and Klepper, B. (1973). On the mechanism of water-stress-induced stem deformation 1. *Agronomy Journal*, 65(2):304–306. 20
- Monteith, J. (1981). Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107(451):1–27. 11
- Morais, R., Matos, S. G., Fernandes, M. A., Valente, A. L., Soares, S. F., Ferreira, P., and Reis, M. (2008). Sun, wind and water flow as energy supply for small stationary data acquisition platforms. *Computers and electronics in agriculture*, 64(2):120–132. 3
- Nortes, P., Pérez-Pastor, A., Egea, G., Conejero, W., and Domingo, R. (2005). Comparison of changes in stem diameter and water potential values for detecting water stress in young almond trees. *Agricultural Water Management*, 77(1-3):296–307. 20
- Oliveira, A. d. (2007). Fundamentos de meteorologia e climatologia. *Cp XI: Precipitação Pluviométrica, NEAS-UFRB*. 10

- Ooi, S. K., Mareels, I., Cooley, N., Dunn, G., and Thoms, G. (2008). A systems engineering approach to viticulture on-farm irrigation. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2):9569–9574. [xxiii](#), [26](#), [27](#)
- Paço, M. (2003). *Modelação da evapotranspiração em cobertos descontínuos programação da rega em pomar de pessegueiro*. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. 2003. 251p. PhD thesis, Tese Doutorado. [19](#)
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 193(1032):120–145. [9](#), [12](#)
- Pereira, A. R., Nova, N. A. V., and Sediya, G. C. (1997). *Evapo (transpi) razão*, volume 183. fealq Piracicaba. [11](#)
- Pi, R. (2018). Raspberry pi 3 model b+. Sítio de Internet. Consultado a 06 de Julho de 2018. URL - <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry/-pi/-3/-model/-b/-plus//>. [40](#)
- Pupin, S., Hernandez, . F., Vanzela, L., Zocoler, J., and Feitosa, D. (2010). In *III WINOTEC - Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 08 a 11 de junho de 2010*. Fortaleza. [4](#)
- Remorini, D. and Massai, R. (2003). Comparison of water status indicators for young peach trees”, journal=irrigation science. 22(1):39–46. [5](#), [6](#)
- Richard G. Allen, Luis S. Pereira, D. R. M. S. (1998). Fundamentos de meteorologia e climatologia - capítulo xi. evaporação e transpiração. [10](#), [12](#)
- Richardson, M. and Wallace, S. (2013). Primeiros passos com o raspberry pi. *Primeira Edição*. Novatec Editora Ltda, page 20. [52](#)
- Sahu, C. K. and Behera, P. (2015). A low cost smart irrigation control system. In *Electronics and Communication Systems (ICECS), 2015 2nd International Conference on*, pages 1146–1152. IEEE. [xxiii](#), [29](#), [30](#)

- Sanmartín, J. and Acevedo, E. (2001). Temperatura de canopia, cwsí y rendimento en genotipos de trigo. *Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago de Chile*. 15
- Satyanarayana, G. and Mazaruddin, S. (2013). Wireless sensor based remote monitoring system for agriculture using zigbee and gps. In *Conference on Advances in Communication and Control Systems*, pages 110–114. xxiii, 24, 25
- Scholander, P. F., Hammel, H., Hemmingsen, E., and Bradstreet, E. (1964). Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 52(1):119–125. 16, 17
- Scientific, C. (2018a). 237-l leaf wetness sensor. Sítio de Internet. Consultado a 101 de Julho de 2018. URL - <https://www.campbellsci.com.au/237-l>. 47
- Scientific, C. (2018b). 237-L leaf wetness sensor. Sítio de Internet. Consultado a 11 de Julho de 2018. URL - <https://s.campbellsci.com/documents/au/manuals/237.pdf>. 47, 48
- Silva, M. A., da Costa, J., de Andrade, V. M., Ferreira, W., Sans, L. M., and de Oliveira, E. C. (2008). Desempenho do método de Penman-Monteith para estimativa do fluxo de vapor, em base horária, para a fase reprodutiva em uma cultura de milho. 11, 12
- Sparkfun (2018). Sensor DHT22. Sítio de Internet. Consultado a 06 de Julho de 2018. URL - <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>. 46
- Survey, U. G. (2016). The water cycle - usgs water science school. Sítio de Internet. Consultado a 15 de Julho de 2018. URL - <https://water.usgs.gov/edu/watercycleevaporation.html>. 11
- Taghvaeian, S., Chávez, J. L., and Hansen, N. C. (2012). Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in northeastern colorado. *Remote Sensing*, 4(11):3619–3637. 15

- Tanner, C. (1960). Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Soil Science Society of America Journal*, 24(1):1–9. 15
- Tatarinov, F. A., Kučera, J., and Cienciala, E. (2005). The analysis of physical background of tree sap flow measurement based on thermal methods. *Measurement Science and Technology*, 16(5):1157. 18, 19
- Taylor, J. and Whelan, B. (2005). A general introduction to precision agriculture. *Australian Center for Precision Agriculture*. 3
- Testezlaf, R. (2010). Manejo de irrigação. Pode ser consultado em <https://www.ggte.unicamp.br/ocw/sites/ocw/files/cursos/CienciasExatas/FA876/apostilas/> Acedido a 18 de Janeiro de 2018. 4
- Ultracell (2018). UL18-12. Sítio de Internet. Consultado a 11 de Julho de 2018. URL - <http://ultracell.net/datasheets/UL18-12.pdf>. 51
- Wall, R. W. (2001). Sprinklers and power lines. *IEEE Computer Applications in Power*, 14(2):25–29. 3
- Xunzel (2014-2016). The eletric revolution. Sítio de Internet. Consultado a 010 de Julho de 2018. URL - <http://www.xunzel.com/assets/web-solarpower-xunzel-eng-tz2.pdf>. 51





## Código do protótipo

---

### A.1 Script para recolha de dados

---

```
#!/usr/bin/env python
#-*- coding: utf-8-*-

#####

import threading

from threading import Thread

import time

import RPi.GPIO as GPIO, time

import MySQLdb

import Adafruit_DHT

import datetime

import Adafruit_ADS1x15

##Required Libraries to SDF-12

import sys
```

```
import wiringpi
from time import sleep
from array import array
import sdi12
from sdi12 import setState
import os
import sys
```

```
#SDI-12
```

```
_txEnable = 24
_txDataPin = 17
_rxEnable = 25
_rxDataPin = 23
_parityError = None
```

```
#PLUVIOMETRO
```

```
count=0
var1 =1
ppm = 0
```

```
#DHT22
```

```
sensor = 22
pin = 4
```

```
#ADS1015
```

```
adc = Adafruit_ADS1x15.ADS1015()
GAIN = 8
adc.start_adc(3, gain=GAIN)
```

```
date = ""

startVar = True

#constante a mudar
txAq = 60

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(13, GPIO.OUT)
GPIO.setup(18, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_DOWN)

#VERIFICACAO DO CRONTAB
print 'loading....'
f = open("verificar_cron.txt", 'a')
f.write("loading....")
f.close()

def update_txAq():

    f = open("verificar_cron.txt", 'a')
    f.write("inicio")
    f.close()

    global txAq
    threading.Timer(20, update_txAq).start()

    db = MySQLdb.connect(host="localhost",
```

```
user="root", passwd="root", db="mydb")
    cursor=db.cursor()
    query = "SELECT value FROM settings WHERE
            idsettings = 1"

    f = open("verificar_cron.txt", 'a')
    f.write("antes de executar a query")
    f.close()

    cursor.execute(query)

    f = open("verificar_cron.txt", 'a')
    f.write("depois de executar a query")
    f.close()

    for row in cursor:
        row = row[0]
        txAq = row * 60

    f = open("verificar_cron.txt", 'a')
    f.write("depois de atualizar o txAq")
    f.close()

    db.close()
    cursor.close()
```

```
f = open("verificar_cron.txt", 'a')
f.write("final")
f.close()

#####
#####          PLUVIOMETRO          #####
#####          #####
#####          #####
#####

def my_callback(channel):

    print("Button pressed")

    global count

    count=count+1

    print count

GPIO.add_event_detect(18, GPIO.RISING, callback=my_callback,
    bouncetime=200)

def counter():

    global txAq

    print "-----"

    threading.Timer(txAq, counter).start()

    global count

    global ppm

    global date

    ppm = count

    print "cliquei", ppm, "vezes no botao"

    count = 0
```

```
    unix = int(time.time())
    date = str(datetime.datetime.fromtimestamp(unix)
               .strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))
```

```
    if startVar is not True:
        db = MySQLdb.connect(host="localhost",
                               user="root", passwd="root", db="mydb")
        cursor=db.cursor()

        query = "INSERT INTO dados (valor, date,
Sensor_idSensor)
VALUES ('"+str(ppm, )+"', '" + date + "', '3')"
```

```
        cursor.execute(query)

        db.commit()

        db.close()
        cursor.close()
```

```
#####
#####          DHT-22          #####
#####          #####
#####          #####
#####
```

```
def readDHT():
```

```
    global startVar
```

```
global txAq

print "-----"

threading.Timer(txAq, readDHT).start()

humidity, temperature = Adafruit_DHT.read_retry
(sensor, pin)

    if humidity is not None and temperature
is not None:

        print('Temperature={0:0.1f}°C
Humidity={1:0.1f}\%'.format(temperature,
humidity))

    else:

        print('Failed to get reading. Try again!')
            sys.exit(1)

if startVar is not True:

    db = MySQLdb.connect(host="localhost",
user="root", passwd="root", db="mydb" )

    cursor=db.cursor()

    query = "INSERT INTO dados (valor, date,
Sensor_idSensor) VALUES ('"+str(round(temperature,1))+
"', '" + date + "', '1'),
('"+str(round(humidity,1))+ "', '" + date + "', '2')
cursor.execute(query)

db.commit()

db.close()
```



```
        if startVar is not True:
            db = MySQLdb.connect(host="localhost",
user="root", passwd="root", db="mydb" )
            cursor=db.cursor()

            query = "INSERT INTO dados (valor,
date, Sensor_idSensor) VALUES ('"+str(round(rs,3))+
"', '" + date + "', '4')"
            cursor.execute(query)

            db.commit()

            db.close()

            cursor.close()

#####
#####          SDF-12          #####
#####          #####
#####          #####
#####

def sdi():
    global txAq
    global startVar
    threading.Timer(txAq, sdi).start()
    sleep(10)
    if startVar is not True:
        os.system("python /home/pi/Desktop/uart.py")
```

```
elif startVar is True:  
    startVar = False
```

```
update_txAq()
```

```
counter()
```

```
ADS()
```

```
readDHT()
```

```
sdi()
```

```
print "Started"
```

---

### A.1.1 Script para uso da norma SDI-12

---

```
import serial
from time import sleep
import wiringpi
import datetime
import time
import MySQLdb

wiringpi.wiringPiSetupGpio ()
TransistorENABLE = 21
TxENABLE = 25

wiringpi.pinMode(TransistorENABLE, 1)
wiringpi.pinMode(TxENABLE, 1)

# Configurar porto serie para o formato utilizado no SDI-12
# baud = 1200, bytesize = 7, parity even
ser = serial.Serial("/dev/ttyAMA0", 1200,
bytesize=serial.SEVENBITS, parity=serial.PARITY_EVEN)

print "SDI-12"
execute = 1

def start_measurement():
    tenta = 0
    while tenta <=5:
        tenta += 1
        print "Medicao: n" + str(tenta)

# Sequencia para o Wake-up do sensor
```

```
wiringpi.digitalWrite(TransistorENABLE, 0)
sleep(0.05)
wiringpi.digitalWrite(TransistorENABLE, 1)
wiringpi.digitalWrite(TxENABLE, 1)
sleep(0.014)
wiringpi.digitalWrite(TransistorENABLE, 0)
sleep(0.010)
wiringpi.digitalWrite(TransistorENABLE, 0)
sleep(0.001)
```

*# Envio do comando*

```
ser.write("1R0!")
sleep(0.04)      # 0.04 para 1D0! 0.025 para 1M!
```

e 1I! 0.02 para 1!

```
wiringpi.digitalWrite(TxENABLE, 0)
wiringpi.digitalWrite(TransistorENABLE, 1)
sleep(2)
```

*# Ler resposta*

```
dados = ser.read()
sleep(0.03)
data_left = ser.inWaiting()
dados += ser.read(data_left)
#print(dados)
```

```
if (len(dados)>17 and len(dados)<=20):
```

```
    #print(dados)
    #print " depois leitura"
    buffer = dados
```

```
a,b,c,d = buffer.split("+")
```

```
wvc = float(str(b))
ec = float(str(c))
tempe = float(str(d))

print "VWC: " + str(wvc)
print "EC: " + str(ec)
print "Temp: " + str(tempe)

unix = int(time.time())
date = str(datetime.datetime.fromtimestamp
(unix).strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))
print "Data: " + date

db = MySQLdb.connect(host="localhost",
user="root", passwd="root", db="mydb" )
cursor=db.cursor()

query = "INSERT INTO dados (valor, date,
Sensor_idSensor)VALUES ('"+str(round(wvc,2))+
"', '" + date + "', '5'),('"+str(round(ec,2))+
"', '" + date + "', '6'), ('"+str(round(tempe,2))+
"', '" + date + "', '7')"
```

```
cursor.execute(query)

db.commit()

db.close()
cursor.close()

break
```

```
    else:
        sendFail2db()
        print "Fail!"
        execute = 0

def sendFail2db():
    fail = -1

    unix = int(time.time())
    date = str(datetime.datetime.fromtimestamp(unix).
strptime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))

    db = MySQLdb.connect(host="localhost", user="root",
passwd="root", db="mydb" )
    cursor=db.cursor()

    query = "INSERT INTO dados (valor, date,
Sensor_idSensor) VALUES ('"+str(round(fail,2))+
"', '" + date + "', '5'), ('"+str(round(fail,2))+
"', '" + date + "', '6'), ('"+str(round(fail,2))+
"', '" + date + "', '7')"
```

```
    cursor.execute(query)

    db.commit()

    db.close()
    cursor.close()
    print "envio do fail feito"
```

*#codigo principal*

```
while execute == 1:  
    start_measurement()  
    execute = 0
```

---

## A.2 Script para recolha de imagens

---

```
#!/usr/bin/python

import os
import datetime
import MySQLdb

date = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H:%M")

path = "/home/pi/Desktop/Scripts_Finais/pics/img-"+date

camera = "fswebcam --no-banner "+path+".jpg"
print camera

comand = camera
os.popen(comand, 'w')

#####
#####          INSERIR CAMINHO/DATA          #####
#####          LOCAL          #####
#####
```

```
db = MySQLdb.connect(host="localhost", user="root",
passwd="root", db="mydb")
cursor=db.cursor()

query = "INSERT INTO multimedia (date, path)
VALUES ('" + date + "','"+ path+".jpg"'"')"
```

```
cursor.execute(query)
db.commit()

db.close()
cursor.close()
```

```
#####
#####          COMANDO PARA ENVIAR          #####
#####          PARA MYSENSE(php)            #####
#####
```

```
os.system("php /home/pi/Desktop/Scripts-Finais
/send_image_raspberry_test.php")
```

```
#####
#####          VERIFICACAO DE ENVIO          #####
#####          PARA MYSENSE                    #####
#####
```

```
db = MySQLdb.connect(host="localhost", user="root",
```

```
passwd="root", db="mydb")
cursor=db.cursor()

query = "UPDATE multimedia SET dataread = 1
WHERE dataread = 0 ORDER BY date"

cursor.execute(query)
db.commit()

db.close()
cursor.close()
```

---

---

## A.3 Script para envio de dados para o mySense

---

```
#!/usr/bin/env python
#-*- coding: utf-8 -*-

import MySQLdb
from array import *
from array import array
import json
import os
import requests
import sys
from crontab import CronTab

db = MySQLdb.connect(host="localhost", user="root",
passwd="root", db = "mydb")
cursor=db.cursor()

query = "SELECT Sensor_idSensor, valor, date FROM dados
WHERE dataread = 0 ORDER BY idDados LIMIT 350"

cursor.execute(query)

data = []
```



```

        pass

    if x!=0 and (data[x][0] != data[x-1][0]):
        json_str += "}],{"ts\":\"" +str(data[x][0])+
"\",\"tsarray\":[{\"ch\":\"" + str(data[x][1]) +
"\",\"value\":\"" + str(data[x][2]) + "\"}]"

        try:
            if data[x][0] == data[x+1][0]:
                json_str += ","

        except:
            pass

    json_str += "]]]"

print json_str

db.close()
cursor.close()
url = "http://mysense.utad.pt/api/datain/
DqAAag40WNoJyYPz.json"

headers = {
'X-APIkey': "7Hke4YZTalqegIhjiByN0pr00VWkUJeN",
'Content-Type': "application/x-www-form-urlencoded",
'Cache-Control': "no-cache"
}

r = requests.request("PUT", url, headers = headers,
data = json_str)

print r.text
print r.status_code

```

```
if r.status_code == 262:
    db = MySQLdb.connect(host="localhost", user="root",
        passwd="root", db = "mydb")
    cursor=db.cursor()

    query = "UPDATE dados SET dataread = 1 WHERE dataread = 0
ORDER BY idDados LIMIT 350"

    cursor.execute(query)
    db.commit()

    db.close()
    cursor.close()

if r.status_code == 480:
    db = MySQLdb.connect(host="localhost", user="root",
        passwd="root", db = "mydb")
    cursor=db.cursor()

    query="SELECT idDados, date, Sensor_idSensor,
COUNT(*) FROM dados GROUP BY date, Sensor_idSensor
HAVING COUNT(*) > 1"

    cursor.execute(query)
    db.commit()

for row in cursor:
```

```
        resposta = row[0]
        print resposta
        query="DELETE FROM dados WHERE idDados ='"+
str(resposta)+"'"
            print query
        cursor.execute(query)
        db.commit()
        print 'DADOS REPLICADOS APAGADOS'

db.close()
cursor.close()
```

```
#####
#####          RESPOSTA DO          #####
#####          MYSENSE              #####
#####
```

```
if 'cmdpayload' in r.text:

    my_str = r.text
    start =('cmdpayload:')
    end =('}}')
    result = my_str[my_str.find(start)+
len(start):my_str.find(end)].split('\n')

    print result
```

```
try:
    for resultLine in result:
        print "Modificação no Script —> Script de aquisição"
        time=str(resultLine).split('=')[1].replace(" ", "")
        .replace("\\n", "")
        text=str(resultLine).split('=')[0].replace(" ", "")

        print text
        print time

    db = MySQLdb.connect(host="localhost", user="root",
        passwd="root", db = "mydb")

    cursor=db.cursor()

    query = "UPDATE settings SET value = "+ time +
" WHERE type = '" + text + "'"

    cursor.execute(query)
    db.commit()

    db.close()
    cursor.close()

    if 'txCam' in text or 'txSend' in text:
        my_cron = CronTab(user='pi')
        for job in my_cron:
            if job.comment == text:
                print job
                job.clear()
                print job
```

```
time= int(time)
print time
if time<=59:
    time = int(time)
    job.minute.every(time)
    elif time>59:
time = int(time)
    horas=time/60
    minutos = time%60
    job.minute.every(minutos)
    job.hour.every(horas)
print 'crontab alterado com sucesso'
my_cron.write()
print job
except:
print "insira comando valido: txAq, txCam, tSend"
```

---

## A.4 Script para apagar dados da base de dados local

---

```
#!/usr/bin/env python
#-*- coding: utf-8 -*-

import MySQLdb

db = MySQLdb.connect(host="localhost", user="root",
passwd="root", db="mydb")

cursor=db.cursor()

query = "DELETE FROM dados WHERE dataread = 1"
query2 = "DELETE FROM multimedia WHERE dataread=1"

cursor.execute(query)
cursor.execute(query2)

db.commit()

db.close()
cursor.close()
```

---

## A.5 Script PHP para o envio de imagens

```
<?php

//-----
// Acesso a base de dados local
//-----

$servidor = 'localhost';
$usuario = 'root';
$senha = 'root';
$db = 'mydb';

$connect = mysqli_connect($servidor, $usuario, $senha, $db);

if (!$connect){
    echo "ERRO";
}

//-----
// Select a base de dados local
//-----

$sql_SELECT = "SELECT date, path FROM multimedia WHERE
dataread=0 ORDER BY date";

$resultado = mysqli_query($connect, $sql_SELECT);

if (!$resultado){
    echo mysqli_errno($connect);
} else{
    $numero = mysqli_num_rows($resultado);

    $i= 0;
```

```
while($dados = mysqli_fetch_array($resultado)){
    $caminho[$i] = $dados['path'];
    $data[$i] = $dados['date'];
    $i++;
}

}

for ($j= 0; $j<$numero; $j++){

//-----
// Credenciais para uso da API para o envio de imagens
// para o mySENSE
//-----

$apikey = '7Hke4YZTalqegIhjiByN0pr00VwkUJeN';
$imgch = 10;
$objectfeed = 'DqAAag40WNoJyYPz';

//-----
// Nome do ficheiro da imagem a enviar
//-----

$imgfile = $caminho[$j];

//-----
// Path para a API mySENSE
//-----

$apipath = 'http://mysense.utad.pt/api/imagein/';

//-----
```

```
// Nome do ficheiro da imagem a enviar
//-----

$handle = fopen($imgfile, "r");
$data = fread($handle, filesize($imgfile));
$post_data = array('file' => base64_encode($data));

$header_X_APIKEY = 'X-APIKEY:␣'.$apikey;
$header_X_IMGCH = 'X-IMGCH:␣'.$imgch;

$curl = curl_init();
curl_setopt($curl, CURLOPT_HTTPHEADER,
    array( $header_X_APIKEY, $header_X_IMGCH ));
curl_setopt($curl, CURLOPT_URL, $apipath.$objectfeed);
curl_setopt($curl, CURLOPT_TIMEOUT, 30);
curl_setopt($curl, CURLOPT_POST, 1);

curl_setopt($curl, CURLOPT_POSTFIELDS, $post_data);
curl_setopt($curl, CURLOPT_RETURNTRANSFER, $post_data);
$response = curl_exec($curl);
$response_info = curl_getinfo($curl);
curl_close ($curl);

        echo "HTTP␣Server␣Response␣body:␣<br>";
        echo "<pre>";
        print_r($response);
        echo "</pre>";

}

?>
```

