

Sistema de monitorização do fluxo de seiva em videira

Bárbara Filipa de Carvalho Góis

Orientação científica :

Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos

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
Regulamento Geral dos Ciclos de Estudo Conducentes ao Grau de Mestre na

UTAD

DR, 2.^a série – N.º 133 – Regulamento n.º 658/2016 de 13 de julho de 2016

Orientação Científica :

Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos

Professor Associado c/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
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

*”Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”*

(Marthin Luther King)

*”O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as
verdadeiras perguntas. | O caminho faz-se caminhando.”*

(Claude Lévi-Strauss)

À minha família, amigos e namorado

Sistema de monitorização de fluxo de seiva em videira

Bárbara Filipa de Carvalho Góis

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 — A utilização de equipamentos e metodologias capazes de estimar a utilização de água por parte de culturas agrícolas permite otimizar sistemas de rega, levando a uma melhor gestão deste recurso. Interessa assim desenvolver sensores que permitam avaliar as necessidades hídricas de uma planta. A determinação da transpiração das plantas, nomeadamente em videiras, consiste em medir fluxos de água no xilema e o desenvolvimento de métodos de medição de fluxo de seiva para a determinação da transpiração é crucial. Para avaliar a resposta da videira foi utilizada uma metodologia de medição direta na determinação do fluxo de seiva xilémica, onde foram utilizados sensores invasivos na região do tronco da planta, fazendo uso da técnica de dissipação térmica de Granier. Esta técnica empírica permite calcular a densidade de fluxo de seiva xilémica, expressa por unidade de superfície condutora, baseada na diferença de temperatura entre uma sonda aquecida continuamente a uma potência constante e uma sonda de referência (não-aquecida), corrigida por um coeficiente adimensional de proporcionalidade.

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema capaz de fornecer dados de gradientes de temperatura em diferentes regimes (com aquecimento ou sem aquecimento), ao longo do dia. Os ensaios foram realizados numa videira (casta Viosinho) durante períodos dos meses de junho, julho e agosto. Os resultados evidenciaram o comportamento do fluxo de seiva da videira ao longo dos diferentes períodos do dia e em condições ambientais díspares (temperaturas diárias diferentes). Foram também efetuados períodos de rega no final do mês de julho / início do mês de agosto para analisar eventuais variações nos gradientes de temperatura obtidos.

Palavras-Chave: agricultura de precisão; transpiração; fluxo de seiva; método de Granier.

Sap flow monitoring system on vines

Bárbara Filipa de Carvalho Góis

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 — The use of equipment and methodologies capable of estimating water use by crops optimizes irrigation systems leading to better management of this resource. It is in this way interest to develop sensors to assess the water needs of a plant. The determination of plant transpiration, specially in vines, is to measure water flows in the xylem and the development of sap flow measurement methods for the determination of transpiration is crucial. To assess the vine response, it was used a direct measurement methodology for determining the perspiration where there were used invasive sensors into the stem region and the vine perspiration was determined by using Granier’s thermal dissipation technique.

This empirical technique allows the calculation the sap flux xilemic density expressed per conductive unit surface, based on a temperature difference between a continuously heated probe at a constant power and a reference probe (non-heated) and a coefficient dimensionless proportionality.

This work describes the development of a system capable of providing temperature gradients sensor data in different schemes (with heating or without heating) throughout the day. Assays were performed in grapevine (Viosinho) during June, July and August. The results showed the behavior of grapevine transpiration over the different times of the day and in different environmental conditions (different daily temperatures). There were made watering periods at the end of July / beginning of August to analyze the variations in the obtained temperature differences.

Keywords: precision agriculture; transpiration; sap flow; Granier method.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Doutor Raul Morais dos Santos, do Departamento de Engenharias da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, pelo empenho, pelo tempo disponibilizado, pelo conhecimento transmitido e pelo incentivo transmitido.

Ao meu coorientador, Doutor Aureliano Malheiro, do Departamento de Agronomia das Escola de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade de Trás os Montes e Alto Douro, pelas ideias e pelo conhecimento transmitido nesta área.

Ao Nuno Miguel dos Santos Pinto da Silva, bolseiro de investigação, pelo apoio, pela paciência, pela disponibilidade, pelo incentivo e dedicação.

A todos os colegas, amigos e namorado que me acompanharam nesta fase da minha vida, pela ajuda, pela amizade e pelos momentos proporcionados ao longo do curso.

À minha família pelo caminho que permitiram que eu percorresse sem nunca desistir.

A todos, o meu muito obrigado.

Bárbara Filipa de Carvalho Góis

Índice geral

Resumo	vii
<i>Abstract</i>	ix
Agradecimentos	xi
Índice de tabelas	xv
Índice de figuras	xvii
Glossário, acrónimos e símbolos	xix
1 Introdução	1
1.1 Importância da água para as culturas e a sua gestão	1
1.2 Agricultura de precisão	4
1.3 Rega inteligente	7
1.4 Necessidades hídricas das plantas	10
1.5 Processo de evapotranspiração e sua estimação	11
1.6 Motivação e objetivos	14
1.7 Organização da dissertação	15
2 Métodos para medir o fluxo de seiva	17
2.1 Fluxo de seiva xilémica	17
2.1.1 Método de impulso de calor	27
2.1.2 Método de balanço de calor	28

2.1.3	Método de Granier	31
2.2	Análise comparativa	34
2.3	Sistemas de medida de fluxo de seiva	37
2.3.1	Tipos de sensores no mercado	37
2.3.2	Sonda Dynagage	38
2.3.3	Sonda de dissipação térmica	41
2.3.4	Medidor de fluxo de seiva SFM1	43
2.3.5	Constituição e instalação da sondas de Granier	45
3	Protótipo experimental	49
3.1	Arquitetura do sistema de medida	49
3.1.1	Acondicionamento do sinal	51
3.1.2	Módulo de processamento	53
3.1.3	Relógio em tempo real	54
3.1.4	Armazenamento de amostras	55
3.1.5	Alimentação elétrica	57
3.1.6	Funcionamento do protótipo	58
3.2	Ensaio no terreno	60
3.3	Discussão	63
4	Resultados experimentais	65
4.1	Resultados	65
4.2	Discussão	68
5	Conclusão e trabalho futuro	73
	Referências bibliográficas	77
A	Código <i>Arduino</i> para sistema de aquisição de dados	87

Índice de tabelas

1.1	Vantagens e desvantagens das diferentes técnicas de rega.	9
2.1	Avaliação dos métodos de medição do fluxo de seiva xilémica.	36
2.2	Principais características do Dynagage e Sonda TDP.	43

Índice de figuras

1.1	Ineficiência da utilização da água nos diferentes setores.	3
1.2	Tecnologia utilizada na agricultura de precisão.	5
1.3	Fases da agricultura de precisão.	6
1.4	Balanco hídrico no sistema solo-planta-atmosfera.	11
1.5	Estrutura do estoma.	12
2.1	Esquema do método de impulso de calor.	28
2.2	Esquema do método de balanço de calor.	29
2.3	Esquema do método de dissipação de calor	32
2.4	Dynagage	39
2.5	Dynagage Flow32-1K	40
2.6	EXO-Skin Dynagage	41
2.7	Sonda TDP	42
2.8	Sensor ECK-SF-20	43
2.9	Medidor de Fluxo de Seiva SFM1	44
2.10	Constituição da sonda de Granier.	46
2.11	Ilustração esquemática da sonda de Granier	47
3.1	Arquitetura do sistema de medida	50

3.2	Circuito integrado MAX31855.	51
3.3	Circuito elétrico da fonte de corrente.	52
3.4	Shield contendo o conversor A/D e a fonte de corrente.	53
3.5	Shield encaixado no Arduino UNO.	54
3.6	Relógio em tempo real DS3231.	55
3.7	Shield de cartão SD para ligação ao Arduino.	55
3.8	Fluxograma representativo do funcionamento macro do protótipo. . .	59
3.9	Videira Viosinho UTAD	60
3.10	Inserção da sonda Granier na videira.	61
3.11	Montagem do sistema de aquisição de dados.	61
3.12	Montagem do painel solar.	62
3.13	Ajuste da montagem do painel solar.	63
4.1	Resultados obtidos pelo sensor	67
4.2	Resultados comparativos obtidos	70
4.3	Resultados obtidos após adição de água à videira	72

Glossário, acrónimos e símbolos

Glossário de termos

Data Logger	Instrumento que permite registar e armazenar medições efetuadas em intervalos de tempo definidos, durante um período de tempo.
Evapotranspiração	Processo que engloba a evaporação do solo e a transpiração das plantas.
Estoma	Aberturas localizadas na epiderme das plantas que lhes permitem efetuar as trocas gasosas (dióxido de carbono, oxigénio e vapor de água).
Floema	Tecido responsável pelo transporte de substâncias orgânicas (seiva elaborada) pelo caule até à raiz e órgãos de reserva.
Gateway	Nó de rede que liga duas redes que usam protocolos diferentes.
Xilema	Tecido de transporte de água e sais minerais dissolvidos (seiva bruta) através do corpo das plantas (da raiz até às folhas).

Lista de acrónimos

Sigla	Expansão
ADC	<i>Analog to digital converter</i> (Conversor analógico digital)
AP	<i>Precision agriculture</i> (Agricultura de precisão)
BH	<i>Hydric balance</i> (Balanço hídrico)
CHPM	<i>Compensation heat pulse method</i> (Método da compensação do impulso de calor)
CSV	<i>Comma separated values</i> (Valores separados por vírgula)
GTN	<i>Natural thermal gradient</i> (Gradiente térmico natural)
HB	<i>Heat balance method</i> (Método do balanço de calor)
HD ou MDT	<i>Heat dissipation method</i> (Método da dissipação de calor)
HFD	<i>Heat field deformation method</i> (Método da deformação do campo de calor)
HP ou HPV	<i>Heat pulse method</i> (Método do impulso de calor)
HRM ou MRC	<i>Heat ratio method</i> (Método da relação de calor)
LED	<i>Light emitting diode</i> (Díodo emissor de luz)
PCB	<i>Printed circuit board</i> (Placa de circuito impresso)
RTC	<i>Real time clock</i> (Relógio em tempo real)
SD card	<i>Secure digital card</i> (Cartão SD)
SHB	<i>Stem heat balance method</i> (Balanço térmico com aquecimento externo)
TDR	<i>Time-Domain reflectometer</i> (Reflectometria no domínio dos tempos)
TDP	<i>Granier thermal dissipation probe</i> (Sonda de dissipação térmica de Granier)
THB	<i>Trunk heat balance</i> (Balanço térmico com aquecimento interno)
VP	<i>Precision viticulture</i> (Viticultura de precisão)

Lista de símbolos

Símbolo	Significado(s)	Unidade(s)
A_s	Área condutora de seiva bruta	m^2
a	Área do xilema	m^2
c	Calor específico da madeira	$J kg^{-1} K^{-1}$
c_s	Calor específico da seiva	$J kg^{-1} K^{-1}$
C_{vs}	Capacidade calorífica volumétrica da seiva bruta	$J m^{-3} ^\circ C^{-1}$
C_{vm}	Calor específico volumétrico da madeira húmida	$J m^{-3} ^\circ C^{-1}$
D	Diâmetro	m ou cm
dT ou ΔT	Gradiente térmico	$^\circ C$
d_x	Distância	m
ET	Evapotranspiração	$mm\ dia^{-1}$
ET_c	Evapotranspiração da cultura	$mm\ dia^{-1}$
ET_0	Evapotranspiração de referência	$mm\ dia^{-1}$
SF	Fluxo de seiva	$m^3\ s^{-1}$
k	Índice de fluxo (Método Granier)	
m	Humidade	$kg\ m^{-3}$
T	Temperatura	$^\circ C$ ou K
T_{max}	Temperatura máxima	$^\circ C$ ou K
ΔT_{max}	Variação da temperatura máxima	$^\circ C$ ou K
u	Densidade do fluxo de seiva	$m^3\ m^{-2}\ s^{-1}$
Q	Calor	J
P	Potência	W ou $J\ s^{-1}$
R	Resistência	Ω
ddp	Diferença de potencial	V
α	Condutividade térmica	$W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$

(continua na página seguinte)

(continuação)

Símbolo	Significado(s)	Unidade(s)
V	Volume	m^3
K_f	Coeficiente	$\text{W } ^\circ\text{C}^{-1}$
K_c	Coeficiente da cultura	$\text{W } ^\circ\text{C}^{-1}$
K_{lat}	Coeficiente de condução de calor do fluxímetro	$\text{W } ^\circ\text{C}^{-1}$
ρ	Densidade	g m L^{-1}



Introdução

O capítulo introdutório deste trabalho de dissertação enquadra a importância da água, ou mais especificamente, a irrigação no setor agrícola e a sua gestão. É feita, deste modo, uma abordagem à agricultura de precisão e, de seguida, é apresentada uma visão sobre a rega inteligente e o seu impacto nesta área. Discute-se a influência que a determinação das necessidades hídricas da planta tem no planeamento de rega. Neste contexto, são abordados os processos de evapotranspiração. Finalmente, é apresentada a motivação e os objetivos deste trabalho assim como a forma de organização deste documento.

1.1 Importância da água para as culturas e a sua gestão

Desde tempos primitivos que a água constitui um fator preponderante no desenvolvimento das civilizações, sendo muitas vezes motivo de disputas ou mesmo de guerras. O apogeu das civilizações está associado ao domínio de uma melhor gestão deste recurso. Em muitos casos, o declínio de sociedades e civilizações resultou da inabilidade desses povos em dominar a sua utilização, pelo que, a água, a sua utilização

e gestão, constituem uma preocupação constante e crescente (Instituto Nacional de Estatística, 2011).

Os povos primitivos tinham acesso à água através de métodos simples usados para recolher as águas das chuvas, dos rios e dos lagos. Com o decorrer do tempo, as necessidades humanas e o crescimento da população passaram a exigir quantidades cada vez maiores deste recurso e outras facilidades de acesso às fontes existentes. Ao mesmo tempo, eram procuradas novas fontes de suprimento, inclusive no subsolo.

No setor da agricultura, a utilização de água destina-se sobretudo à rega das culturas pelo que, o Homem, desde muito cedo teve de dominar técnicas para a sua utilização, dependendo da zona onde habitava. Assim, os povos primitivos emergiram às margens de grandes rios e desenvolveram-se com base na agricultura.

A rega é a atividade agrícola que consome a maior parte dos recursos hídricos disponíveis a nível mundial (Paço, 2003). Em Portugal, de acordo com o Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNEUA), a agricultura é responsável pela utilização de um volume de água correspondente a 37,5 % do seu total. Face aos outros setores, o agrícola apresenta a vantagem de devolver à atmosfera, pelo processo de evaporação, grande parte da água utilizada, sem a carga poluente patente nos outros usos. No que diz respeito à eficiência de utilização, esta regista também geralmente uma baixa eficiência (Instituto da Água, 2012), como mostram os gráficos da figura 1.1.

Segundo Postel (2001), a melhoria da produtividade agrícola pode ser conseguida através do aumento da eficiência e precisão na programação da rega, do uso de água reciclada ou mesmo, da introdução de variedades de plantas com menores necessidades hídricas. Com vista à otimização dos sistemas de rega, torna-se imprescindível medir e/ou estimar quais as necessidades hídricas de determinada cultura.

O conhecimento prévio dos consumos permite uma distribuição de recursos mais racional (Paço, 2003). Assim, o estudo da evapotranspiração das plantas torna-se essencial para se obterem resultados satisfatórios, com uma redução no consumo de

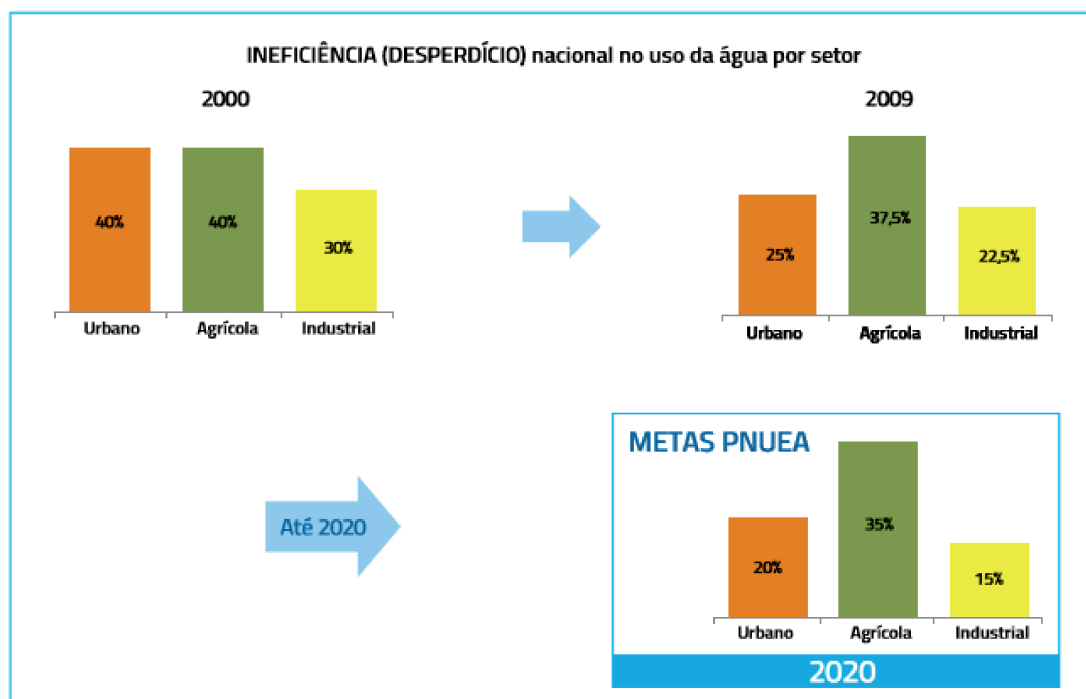


Figura 1.1 – Ineficiência da utilização da água nos diferentes setores (Instituto da Água, 2012).

água da rega das culturas. Conhecendo a variabilidade da capacidade de armazenamento de água no solo de determinado local e sabendo qual a necessidade da cultura aí instalada, torna-se possível que o processo de rega passasse a ser realizado de modo seletivo. Para tal, bastaria dispor de uma tecnologia de rega suficientemente flexível, que satisfizesse as necessidades, de acordo com a distribuição espacial da água e necessidades hídricas da planta.

A resposta fisiológica das plantas a perturbações externas é complexa e ocorre de forma variada para diferentes níveis do seu metabolismo. Trata-se de um fenómeno variável, pelo que são necessários processos de medida complexos para se conseguir extrair informações importantes que permitem avaliar e interpretar consequências dos fatores externos.

A conjugação de mecanismos indispensáveis à gestão de água de rega das culturas e as metodologias tecnológicas envolvidas na vinicultura, nomeadamente em regiões

como o Douro, região integralmente ligada à produção vinícola, torna necessário investir em pesquisa e metodologias que garantam uma melhor gestão deste recurso que passa igualmente pela recolha de dados em tempo real das necessidades hídricas das culturas.

Em países como Portugal, a adoção deste tipo de estratégias é difícil pois as tecnologias associadas são, quase sempre, complexas e caras. Para ser possível adotá-las é necessário que os benefícios económicos daí decorrentes sejam superiores ao investimento necessário à sua adoção.

1.2 Agricultura de precisão

Há milhares de anos atrás, a agricultura começou como uma atividade local. Os primeiros agricultores eram jardineiros que, cultivavam plantas individualmente e procuravam climas propícios e solos que as favorecessem. À medida que os agricultores adquiriam conhecimentos científicos, aumentaram as suas parcelas, utilizando abordagens padronizadas: lavrando o solo, espalhando o estrume animal como fertilizante, trocando as colheitas de ano para ano, tudo com vista a aumentar o rendimento das culturas. Ao longo dos anos, eles desenvolveram melhores métodos de preparar o solo e proteger as plantas (Lowenberg DeBoer, 2015).

O setor agrícola foi um precursor para o aumento da indústria e serviços em muitos países em desenvolvimento. Como atividade primária, a agricultura ainda constitui a “espinha dorsal” da economia em que, para promover o crescimento económico, novas estratégias devem ser firmemente ancoradas a este setor.

A agricultura apresenta hoje desenvolvimentos que utilizam um conjunto de metodologias e soluções que permitem um maior desenvolvimento desta atividade com maior qualidade dos produtos, maior quantidade, menores custos, menor impacto ambiental, objetivos que se enquadram no conceito de agricultura de precisão (AP).

Um dos aspectos cruciais neste conceito é o crescimento contínuo da tecnologia

utilizada, como ilustrado na figura 1.2.

A AP objetiva minimizar o impacto ambiental da agricultura, uma vez que reduz o desperdício e usa menos energia. Os seus efeitos estendem-se muito além da produção de culturas anuais, como trigo e milho, e apresenta o potencial de revolucionar a forma como os seres humanos monitorizam e fazem a gestão das vinhas, pomares e florestas (Lowenberg DeBoer, 2015).

Numa visão futurista, os agricultores dependerão de robôs para avaliar, fertilizar e regar cada planta individualmente, eliminando assim o trabalho penoso que caracterizou a agricultura desde o seu aparecimento.

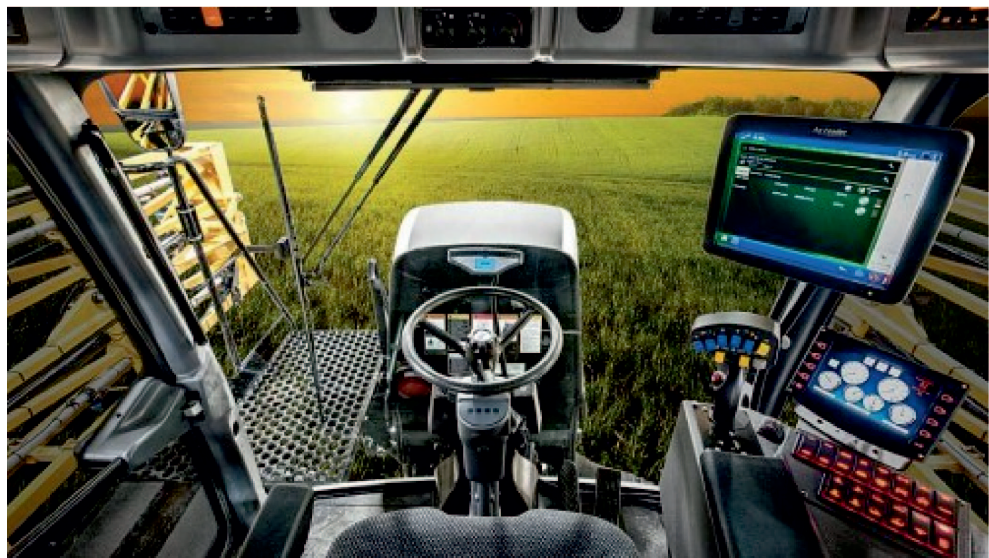


Figura 1.2 – Tecnologia utilizada na agricultura de precisão (Russo, 2016).

Com a utilização de equipamento de alta tecnologia (quer hardware, quer software) para avaliar, ou monitorizar, as condições numa determinada parte de terreno, existe uma alteração constante nas técnicas e recursos necessários para desenvolver uma determinada tarefa, levando a que seja possível cada vez mais controlar um determinado número de tarefas e garantir um sistema de gestão agrícola que se baseia

na variabilidade a nível espacial e temporal da unidade produtiva. Assim, promove-se o aumento do rendimento dos agricultores, alcançado por duas vias distintas, a redução dos custos de produção, o aumento da produtividade e, por vezes da qualidade das culturas (Tschiedel and Ferreira, 2002). Torna-se assim possível monitorizar diversas variáveis no campo, analisar os dados no computador e tomar decisões estratégicas de acordo com os objetivos de produção.

Segundo Sonka et al. (1997), a AP divide-se em três componentes, recolha de dados, análise dos dados (processamento de dados) e implementação de uma política de gestão, baseada nas informações e janelas de tempo adequadas, como ilustrado na figura 1.3.

Balastreire et al. (1998) define AP como “um conjunto de técnicas que permite a gestão localizada das culturas”; ou “uma estratégia de gestão que recorre à tecnologia da informação para obter dados de múltiplas fontes, a fim de auxiliarem nas decisões relacionadas à plantação”.

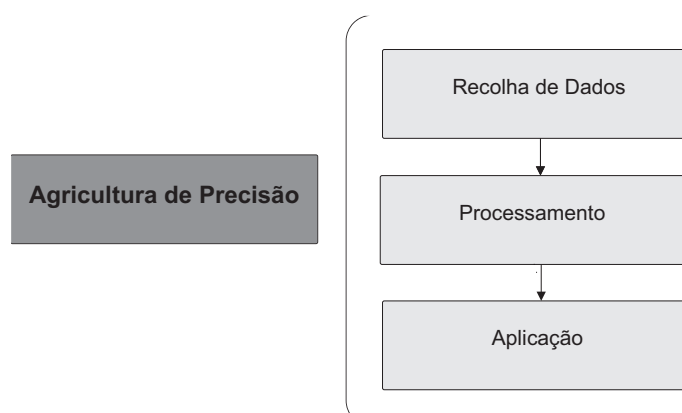


Figura 1.3 – Fases da agricultura de precisão (Adaptado de Sonka et al. (1997)).

A viticultura de precisão (VP) consiste em aplicar os mecanismos e métodos da agricultura de precisão a uma área específica, a viticultura. Os seus princípios são análogos à AP, tendo em vista a otimização da gestão agrícola na fileira de vinha. As tecnologias associadas ainda têm um grande caminho a percorrer e o futuro das práticas de AP assentarão nas técnicas e soluções que resultam do trabalho conjunto entre os engenheiros (eletrónica, computação, transmissão de dados, etc.)

e a agronomia. Isto só será alcançável se existirem pessoas na área da agricultura com conhecimentos suficientes para ajustar, desenvolver e utilizar estas tecnologias.

O futuro, apesar de tudo, apresenta-se mais promissor visto que existe uma diminuição dos custos de equipamentos de alta tecnologia, existe um maior investimento na educação de agricultores e existe um aumento de estruturas de apoio técnico na agricultura.

1.3 Rega inteligente

A agricultura tem crescido bastante e devido aos longos períodos de seca durante o ano, a tentativa de suprir a falta de chuva e garantir um produto de melhor qualidade tem feito com que o uso de métodos de rega sejam cada vez mais difundidos nos meios rurais, necessitando assim, de uma atenção especial nesse setor de desenvolvimento, pois grande quantidade de água pode ser desperdiçada se não houver um controle mais adequado (Santana, 2010).

Mais de metade da população do mundo em desenvolvimento (3,1 mil milhões de pessoas ou seja, 45 % de toda a humanidade) vive em áreas rurais. Destas, 2,5 mil milhões dependem da agricultura como meio de subsistência, segundo Food and Agriculture Organization of the United Nations (2014).

A água é um bem essencial e a rentabilização da sua utilização é crucial sobretudo na produção agrícola em regiões com escassez de água, as quais requerem uma investigação inovadora e sustentável e uma utilização adequada das tecnologias em prol de um melhoramento desta área.

Antigamente, o agricultor tinha que se apoiar na sua experiência para avaliar as necessidades das suas culturas. Muitas das vezes essa análise era feita com base no aspeto visual das plantas. Dependendo da cor e aparência da cultura ele sabia se necessitavam de ser regadas ou não.

A rega inteligente de culturas requer conhecimentos sobre a necessidade de água

por parte destas e respostas para rentabilizar o seu uso, condicionalismos específicos de cada método e equipamento de rega, a sensibilidade da cultura à salinidade quando a água de qualidade inferior é usada, as limitações relativas ao sistema de abastecimento de água e as implicações financeiras e económicas da prática da rega (Pereira et al., 2002).

No caso da viticultura, o crescimento da videira implica um consumo de água que está dependente de alguns requisitos como o estado de crescimento da planta, o seu tamanho, a quantidade de precipitação que ocorre nas diferentes estações e nas diferentes zonas durante o estado de crescimento da planta (Larry E. W., 2001). Ao longo dos anos foram realizados estudos que avaliam a necessidade hídrica das videiras, os quais revelaram variações nos resultados que podem estar relacionadas com implicações práticas utilizadas. Estes estudos relevaram que a quantidade de água na vinha varia consideravelmente podendo os dados parecer contraditórios, devido a diferenças causadas por diversos fatores, o que reforça a ideia que são necessários diversos pontos de medida.

Dependendo da quantidade de água que a cultura necessita, a sua utilização deve ser racional, ou seja, aplicada de forma uniforme e eficaz e somente quando é indispensável. Para se conseguir esta metodologia é fundamental estimar a quantidade de água que a planta necessita, efetuar uma calendarização precisa de rega e aplicá-la de forma variável.

O tipo de rega, a sua frequência e a quantidade de água a ser aplicada, dependerão da cultura, da região e do ano. Existem, basicamente, quatro métodos de aplicação de água, os quais caracterizam os sistemas de rega: aspersão, localizada (emissores que localizam a aplicação da água na área de interesse), de superfície e subterrânea. Existem vantagens e limitações na utilização de cada um dos métodos, as quais estão mencionadas na tabela 1.1.

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidas inúmeras tecnologias de rega inteligentes para aplicar a rega em diversas culturas.

Para se efetuar uma estimativa precisa da transpiração num conjunto selecionado

Tabela 1.1 – Vantagens e desvantagens das diferentes técnicas de rega.

Técnica de rega	Vantagens	Desvantagens
Por superfície	• Custos anuais de operação reduzidos • Simplicidade operacional • Adaptável a um grande número de tipo de solos e culturas • Capacidade para superar problemas operacionais (não dependem de assistência técnica) • Níveis satisfatórios de desempenho • Altamente eficiente: reutilização da água excedente no final das parcelas irrigadas. • Consumo energético reduzido (força da gravidade utilizada na distribuição de água)	• Dependência das condições topográficas • Técnica de cultivo adaptada ao sistema de rega (difícil ajustar o sistema de rega por superfície a culturas já instaladas) • Menos eficientes que os sistemas de rega por aspersão e localizada: aumento dos custos de operação e manutenção
Por aspersão	• Dispensa a preparação do terreno (sistematização) necessário ao método de rega por superfície • Taxa de aplicação de água e a quantidade de água aplicada podem ser facilmente aplicadas às exigências do projeto • Proporciona melhor uniformidade de distribuição de água • Permite economia de água • Minimiza o risco de erosão • Permite um melhor aproveitamento do terreno • Possibilita economia de mão-de-obra • Facilidade de operação e manutenção • Polivalência das instalações	• Elevados custos das instalações, operação e manutenção • Distribuição da água muito afetada pelo vento • Favorece o desenvolvimento de algumas doenças nas plantas • Selamento da Superfície de alguns solos • Imprópria para água com alto teor salino
Localizada	• Economia de água; • Favorece o crescimento e produção das plantas • Reduz o risco da salinidade para as culturas • Facilita a aplicação de fertilizantes e outros produtos no sistema • Limita o desenvolvimento de ervas daninhas • Reduzida exigência de mão-de-obra • Baixo consumo de energia; • Facilita as práticas culturais	• Problemas de obstrução de emissores • Inadequado movimento de água no solo e desenvolvimento radicular • Problemas com animais roedores • Limitações técnicas e económicas
Subterrânea	• Aplicação exata a uniforme de água e nutrientes diretamente na zona radicular • Diminuição de perdas de água e nutrientes pelo fracionamento das regas • Facilidade de adaptar as concentrações dos nutrientes de acordo com o estágio de desenvolvimento da cultura e das condições climatológicas • Possibilita que a superfície do solo (3 a 5 cm) permaneça seco diminuindo a incidência de plantas invasoras e de pragas e doenças.	• Falta da visualização do caminho da água para a cultura • Susceptibilidade ao entupimento dos emissores pelas raízes • Danos pelo ataque de roedores e passagem de implementos agrícolas às tubulações e emissores • Descarga e lavagem da tubulação após as regas para evitar a precipitação de materiais em suspensão e quando semeado podem ocorrer problemas na germinação de sementes.

de árvores, torna-se necessário definir um limite de rega e avaliar um conjunto de condições que permitam reduzir a transpiração para determinar e comparar as diferenças reais na transpiração e a quantidade de água utilizada.

1.4 Necessidades hídricas das plantas

A gestão da rega consiste em determinar o momento, a quantidade e o modo de aplicar a água sobre a superfície arável. De acordo com as necessidades hídricas das plantas, a gestão do processo de rega pode ser realizada de quatro formas: via planta, solo, clima, ou pela sua associação.

Existem métodos de avaliação via planta que permitem avaliar a necessidade de água por parte da mesma como: potencial hídrico das folhas, resistência estomática, temperatura da canópia, determinação do grau de turgescência das folhas, entre outros. Contudo, estes métodos são complexos, apresentam um custo elevado e necessitam de automação e cuidados especiais para que possam ser utilizados em grande escala, o que faz com que a sua utilização fique limitada apenas para fins de investigação. Devido às dificuldades envolvidas na manipulação via planta a utilização de água é manipulada via solo, clima ou pela associação de ambos (Pires et al., 1999).

Para a gestão de rega via solo existem vários métodos e instrumentos que permitem medir o teor de água no solo. Um dos métodos utilizados para esta avaliação é a análise gravimétrica. Contudo, são normalmente usados instrumentos no domínio da refletometria (TDR), tensiómetros, entre outros (Pires et al., 1999).

A gestão de rega via clima pode simplesmente repor a demanda atmosférica do dia ou de dias anteriores desde a última rega ou realizar o balanço hídrico (BH) da cultura. O BH, determinado pela equação 1.1, considera todos os fluxos de água que entram e saem do volume de solo que contém as raízes (Resende and de Albuquerque, 1998).

$$P + L = ET + R + D \quad (1.1)$$

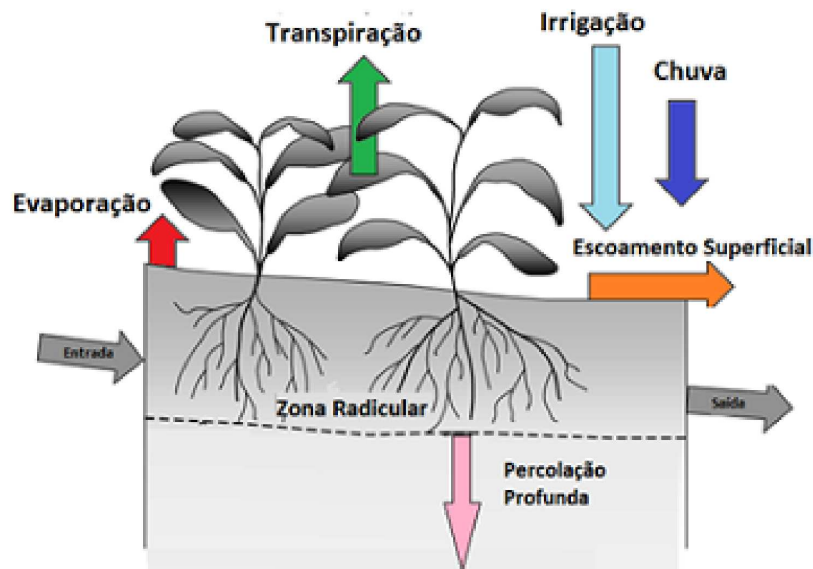


Figura 1.4 – Balanço hídrico no sistema solo-planta-atmosfera (Adaptado de Nascimento and Soares J. M. (2004)).

Este balanço tem como componentes de entrada a rega (L) e a precipitação (P) e de saída as perdas por percolação profunda (D), escoamento superficial (R) e consumo de água pelas plantas, evapotranspiração (ET). As perdas por escoamento superficial (R) ou percolação profunda (D) podem ser eliminadas com a gestão adequada. Assim, para fins de controlo do BH, restam a rega, a precipitação e a ET, de acordo com a figura 1.4.

1.5 Processo de evapotranspiração e sua estimação

A água é um componente abundante da videira, pelo que toma um papel ativo no transporte dos nutrientes absorvidos pela raiz e dos fotoassimilados a partir das folhas (Magalhães, 2008).

A utilização de água pelas culturas impõe a habilidade em estimar e avaliar a ET e os seus componentes. A combinação de dois processos separados, através dos quais a água é perdida pela superfície do solo, por evaporação e a partir da cultura por transpiração é referido como ET.

A evaporação é o processo pelo qual a água líquida é convertida em vapor de água e removida a partir da superfície sobre a forma de vapor (Allen et al., 2006).

A transpiração consiste na vaporização de água líquida contida nos tecidos das plantas e na remoção desse vapor para a atmosfera, através de estruturas denominadas estomas (pequenas aberturas nas folhas), ilustrados na figura 1.5.

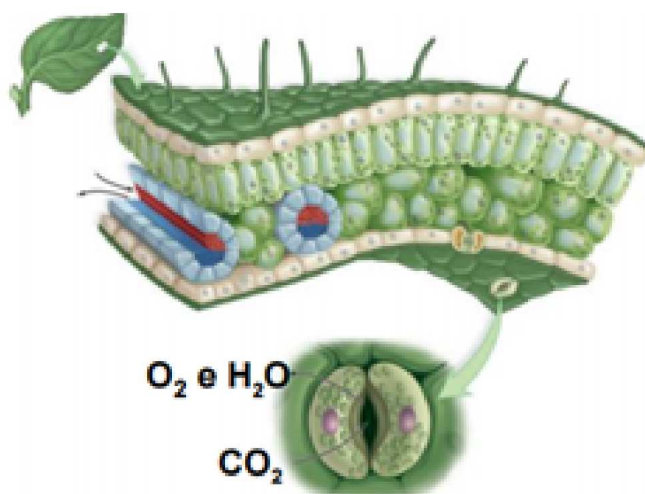


Figura 1.5 – Estrutura do estoma (Carrilho, 2012).

Os processos de evaporação e transpiração ocorrem simultaneamente pelo que se torna difícil distinguir os dois processos. Para além da disponibilidade de água na superfície do solo, a evaporação a partir de um solo cultivado é determinada principalmente pela fracção da radiação solar que atinge a superfície do solo. Quando a cultura é pequena, a água é perdida predominantemente por evaporação do solo, mas quando a cultura é bem desenvolvida e cobre completamente o solo, a transpiração torna-se, geralmente, o processo principal.

Variáveis meteorológicas (radiação, temperatura do ar, humidade relativa do ar e velocidade do vento), características da cultura (tipo de cultura, variedade e estado de desenvolvimento), gestão e aspetos ambientais são fatores que afetam a evaporação e transpiração.

O conceito da evapotranspiração de referência (ET_0) foi introduzido por Doorenbos and Pruitt (1977) para estudar o processo de evaporação para a atmosfera independentemente do tipo de cultura, do seu desenvolvimento e práticas de gestão. Como a água não é limitante na ET_0 , os fatores do solo não afetam a ET . Relacionando a ET de uma superfície específica que fornece uma referência ao qual a ET de outras superfícies pode ser relacionado, elimina-se a necessidade de definir um nível ET separado para cada cultura e estado de crescimento. Valores de ET_0 medidos ou calculados em diferentes locais ou em diferentes estações do ano são comparáveis, uma vez que se referem à ET da mesma superfície de referência.

Os únicos fatores que afetam a ET_0 são parâmetros climáticos. Consequentemente, a ET_0 é um parâmetro climático e pode ser calculado a partir de dados meteorológicos. ET_0 expressa o poder de evaporação para a atmosfera num local e época do ano específica e não considera características da cultura e os factores do solo (Allen et al., 2006).

No que diz respeito à estimativa da ET_0 , o método mais utilizado é o de Penman-Monteith, pois apresenta resultados satisfatórios (Monteith, 1965, 1985). Este método resultou de um aperfeiçoamento do método de Penman que permite calcular a evaporação de uma superfície livre de água, ou de um local onde não existe resistência de superfície, recorrendo à medição de variáveis climáticas (Penman, 1948).

A evapotranspiração da cultura (ET_c) pode ser medida diretamente por lisímetros que permitem determinar o teor de água no solo, dependendo do tipo de cultura e do acesso das raízes para se obter medições representativas (Paço, 2003). Estes dispositivos normalmente são utilizados para fins de investigação, pois envolvem um processo trabalhoso e caro. Por isso, na prática, para fins de dimensionamento e manutenção de sistemas de rega, calcula-se a ET_c através da estimativa da ET_0 e

dos coeficientes da cultura (K_c) (Allen et al., 2006).

Os métodos para estimar a evapotranspiração a partir de dados meteorológicos requerem vários parâmetros climatológicos e físicos. Alguns dos dados são medidos por estações meteorológicas. Outros parâmetros são relacionados com outros dados comumente medidos e podem ser derivados com a ajuda de relações diretas ou empíricas. O uso de coeficientes de cultivo, K_c , que se relacionam com a ET_o para calcular a ET_c são demasiado universais e não refletem globalmente a realidade (Allen et al., 2006).

Uma forma de determinar a transpiração de plantas, largamente usada nos últimos anos, consiste na medição do fluxo de seiva ("Sap Flow", SF). O conteúdo total de solutos da seiva xilémica é geralmente muito baixo, pelo que o SF medido é igual ao fluxo de água que posteriormente é transpirada. Os métodos mais utilizados baseiam-se no transporte de calor pela seiva. Contudo, existem outros métodos que não se baseiam neste parâmetro porém, não são muito usados pois são de aplicação difícil e as medições são feitas por períodos não muito prolongados.

Dentro dos métodos que têm como base o transporte de calor pela seiva, existem métodos de análise que recorrem a um aquecimento através de uma fonte de calor constante e pontual e outros que recorrem a uma aplicação de calor intermitente.

Uma forma de otimizar a quantidade de água em sistemas de rega consiste em utilizar métodos de medição de SF para determinar a transpiração da planta e, assim, determinar o transporte de calor através do fluxo de seiva xilémica da planta. Assim, consegue-se estimar a quantidade de água que a planta necessita sob condições específicas.

1.6 Motivação e objetivos

A agricultura no mundo atual é uma área em constante desenvolvimento com vista a aumentar a produtividade e diminuir custos. Desenvolver tecnologias que permitam

a recolha e tratamento de dados, o controlo de parâmetros de desenvolvimento das culturas de forma automática de modo a alterar as condições de produção, permitem ao agricultor controlar a sua produção de forma eficiente e em tempo real. Os sistemas de rega inteligente são uma ajuda imprescindível, já que permitem otimizar o consumo de água, recurso cada vez mais escasso. Sensores que permitam a monitorização das necessidades hídricas da planta são cruciais para esta tarefa e, sem dúvida, são elementos cuja concepção é desafiante quer a nível sistémico quer a nível de operação continuada. Estes terão interesse quando incorporarem uma rede de monitorização de necessidades hídricas de uma cultura.

Este trabalho objetiva o estudo, projeção e implementação de um sistema de gestão energética para a medição do fluxo de seiva xilémica numa videira, no Campus da UTAD, utilizando o método de Granier. Para tal, foi necessária a construção e teste de um sistema de monitorização integrando uma sonda de Granier que permitia recolher e guardar os dados de forma autónoma para posterior análise. Pretende-se assim, conceber um sistema de monitorização simples e de baixo custo, para a medição de SF, preferencialmente alimentado através de uma bateria recarregada por um painel solar.

1.7 Organização da dissertação

Esta dissertação foi estruturada em mais quatro capítulos após este, introdutório, onde se enquadra o tema e se apresentam os objetivos e motivação da mesma.

No capítulo 2 são abordados os métodos de medição do fluxo de seiva xilémica e referidos os sistemas convencionais que permitem a sua medição. É também feita uma abordagem à constituição e instalação dos sensores Granier.

No capítulo 3 são abordados os passos da construção do protótipo, a metodologia utilizada e a sua implementação.

No capítulo 4 são apresentados todos os testes experimentais feitos no terreno e os

resultados que daí advieram.

Por fim, no capítulo 5, são tiradas as conclusões resultantes da realização desta dissertação bem como feita uma perspetiva sobre possíveis trabalhos que no futuro permitam introduzir melhoramentos de forma a otimizar uma atividade tão importante como a agricultura.

2

Métodos para medir o fluxo de seiva

Como referido no enquadramento deste trabalho, a estimação da evapotranspiração é essencial para a determinação das necessidades hídricas das plantas. Este capítulo aborda os diferentes métodos desenvolvidos para estimar a evapotranspiração nas plantas utilizando o fluxo de seiva xilémica como referência. Posteriormente, é feita uma análise dos métodos mais importantes, referindo-se os princípios de cada um.

2.1 Fluxo de seiva xilémica

O processo de medição da evapotranspiração envolve duas componentes relevantes, a perda de água por parte das plantas e a evaporação direta de água para a atmosfera. Esta medição pode ser realizada por uma variedade de métodos dependendo da escala de tempo e o componente de interesse (Malheiro, 2005).

Em condições naturais métodos hidrológicos e micrometeorológicos permitem determinar esta componente. Os primeiros recorrem diretamente à equação de balanço hídrico, podendo ser utilizados lisímetros ou metodologias de determinação do teor de água no solo. Os segundos, permitem medir a ET através da quantificação de variáveis relacionadas com fluxos e podem ser aplicados a vários níveis (do ramo à

planta inteira).

A transpiração é um processo relevante que proporciona uma ligação fundamental entre o equilíbrio de água e a dinâmica da cultura. Uma forma de a determinar consiste em medir o fluxo de seiva xilémica em que este é equivalente ao fluxo de água que posteriormente a planta libertará, através do processo de transpiração. Existem várias técnicas para medir ou estimar o uso da água pelas plantas sendo uma delas a utilização de medidores de SF. Os métodos de medição do SF só permitem conhecer um dos componentes da ET, a transpiração, mas permitem acompanhar o comportamento hídrico da planta no seu meio natural e em condições não perturbadas durante longos períodos (dias ou meses).

Existem métodos que utilizam uma substância química ou radioativa de contraste contudo, são menos utilizados que os métodos baseados em transporte de calor pela seiva os quais, são mais fáceis de utilizar e permitem medições por períodos de tempo prolongados (Valancogne and Nasr, 1989).

Sistemas de estimativa do SF usam o calor aplicado como um marcador do movimento de seiva ao longo do tecido do xilema (Altozano et al., 2008). Neste domínio, os principais métodos desenvolvidos, cronologicamente, para a estimativa da transpiração através da utilização de métodos de fornecimento de calor ao tronco, como marcador do movimento da seiva ao longo do xilema são: Velocidade do impulso de calor (HPV); Balanço térmico com aquecimento interno (THB); Balanço Térmico com aquecimento externo (SHB); e Dissipação de Calor (HD).

Huber (1932) foi o pioneiro na utilização de métodos disponíveis para medir o SF, onde mediu a velocidade de calor através do tronco. A partir desta metodologia, foram surgindo diferentes métodos porém, somente os que se baseiam em termodinâmica são amplamente utilizados no terreno (florestas e pomares). No entanto, a medição do fluxo em si, representa apenas uma parte dos estudos associados ao SF pois, elementos adicionais têm que ser considerados como, por exemplo, a avaliação de erros, integração de dados medidos pelo sensor num certo tipo de tronco e a variação espacial do fluxo no interior da árvore (Cermák et al., 2004).

Marshall DC. (1958) foi o primeiro a ter uma abordagem a nível quantitativo deste método. Efetuou o melhoramento da técnica e quantificou as medições de velocidade de calor desenvolvendo equações matemáticas que correlacionam o calor com a velocidade do SF. Demonstrou analiticamente que a velocidade do impulso de calor se relaciona com o SF (Paço, 2003).

Swanson (1962), descreveu como medir a taxa de movimento da seiva que pode ser determinada, em parte, pelo método de transporte de calor, isto é, pela temporização da taxa de movimento de um impulso de calor de um ponto para outro numa planta e, em parte, por cálculo. Descreveu um instrumento portátil para detectar movimentos de seiva por este método ou seja, um temporizador, que permite obter dados que possibilitaram resolver uma equação que relaciona o tempo e a velocidade do impulso de calor. Este pode ser usado em qualquer tronco, ramo ou raiz de diâmetro superior a um meio ($\frac{1}{2}$) de polegada de diâmetro.

Swanson and Whitfield (1981) sugeriram um coeficiente de correção da velocidade do impulso térmico em relação ao efeito invasivo. Posteriormente, Robert H. Swanson (1994) definiu que a quantidade de seiva pode ser determinada a partir do tempo necessário para que a temperatura determinada por sensores dispersos assimetricamente em relação ao ponto onde o calor é aplicado por impulsos, se iguale. Esta utilização baseia-se num princípio de compensação ou seja, quando o impulso de calor é libertado o sensor localizado abaixo da fonte de calor, mais próximo, aquece mais rapidamente que o situado acima através do processo de condução. Por sua vez, o calor transportado por convecção pela seiva vai aquecer o sensor colocado acima igualando-se a temperatura nos dois sensores ao fim de um determinado período de tempo. Green et al. (2003); Caspari et al. (1993) alteraram este método com vista no seu melhoramento.

Cohen et al. (1981, 1985); Cohen (1994) tiveram uma nova abordagem para o cálculo da densidade de SF onde este é efetuado com base no intervalo de tempo necessário até que seja atingida uma temperatura máxima num sensor colocado a uma determinada distância no sentido de deslocação do fluxo após ser libertado um impulso de calor (Paço, 2003).

Cohen et al. (1981) desenvolveram um método que mede simultaneamente a onda de calor em várias profundidades no tronco utilizando uma sonda de seis termopares espaçados 8 mm de distância. A sonda é inserida a uma distância de 15 mm a jusante de um aquecedor de fonte de linha e registra o atraso de tempo para uma elevação de temperatura máxima na localização do sensor. Uma segunda sonda, com um único termopar, está localizada a uma distância de 20 mm ou mais a montante do aquecedor, onde a temperatura não é afetada pela onda de calor. Esta sonda é usada para compensar as mudanças de temperatura do tronco durante o dia.

Green and Clothier (1988) usaram este método para medir velocidades da seiva no tronco de árvores de kiwi e maçã. Na medição da velocidade de SF da árvore de kiwi foram tidos em conta espaçamentos diferentes do padrão pois, esta árvore apresenta elevados índices de fluxo. Seguindo o procedimento de Swanson and Whitfield (1981), foram aumentados estes espaçamentos e foram efetuadas ajustes nas correções para o bloqueio de fluxo pelas sondas. Nas macieiras, as medições do impulso de calor concordaram com as medições de fluxo independentes. Constatou assim que, na árvore de kiwis, os fluxos independentemente medidos foram consistentemente maiores do que os fluxos medidos com o método do impulso de calor (HP). Porém, poucos autores têm comparado os diferentes sistemas SF uns com os outros, e a maioria deles foram aplicados em árvores florestais, como é o caso dos estudos conduzidos por Bleby et al. (2004), Granier et al. (1996), Granier A. and Cermák (1998), Lundblad et al. (2001) e Tournebize and Boistard (1998).

Smith and Allen S.J. (1996) constataram que estes tipos de sistema exigem um diâmetro mínimo de cerca de 3 cm, uma vez que o tronco deve ser perfurado de modo a que as sondas possam ser inseridas. Em todos os casos é aconselhável a calibração, sendo esta um requisito obrigatório para os métodos invasivos, uma vez que a inserção das sondas altera as características do xilema (Fernández et al., 2013).

Outras técnicas de HPV foram desenvolvidas para acomodar uma variedade de condições de fluxo, entre as quais, o compensação do impulso de calor (CHPM) (Swanson, 1962), o método $T_{\max}$ (Cohen et al., 1981) e o método da relação de calor (HRM) (Burgess et al., 2001). O método da CHPM é um método em que,

a difusidade térmica não tem que ser determinada pois, não é capaz de estimar corretamente fluxos baixos e inversos e a sua calibração depende de características da árvore. Contrariamente, HRM pode medir fluxos baixos e inversos, mas tem um desempenho fraco em altas taxas de fluxo e aplica um protocolo impreciso para determinar a difusividade térmica necessária. O método $T_{\max}$ determina a difusividade térmica corretamente, mas é baseado numa única análise pontual e, portanto, é suscetível à dispersão.

Burgess et al. (2001) desenvolveram um método baseado em impulsos de calor capaz de medir com precisão taxas baixas de SF, HRM. Este método foi desenvolvido dada as limitações de medição de fluxos baixos nos métodos de Cohen et al. (1981). O seu princípio assenta na medição da razão entre o aumento da temperatura após a libertação de um impulso de calor entre pontos equidistantes a montante e a jusante do aquecedor. Tal método apresenta também coeficientes de correção de feridas. Este efeito leva a uma subestimação da velocidade de calor calculada que pode ser corrigida pela determinação de uma equação de correção de feridas baseada na modelagem termodinâmica do transporte de calor. O HRM tem várias vantagens importantes sobre o CHPM, incluindo melhor alcance de medição e resolução, protocolos para corrigir erros físicos e térmicos na implantação de sensores e uma função linear simples para descrever efeitos de feridas.

Fernández et al. (2001) apresentaram resultados que demonstram que a técnica do impulso de calor para medir o SF é uma ferramenta duplamente benéfica, uma vez que pode ser usada para a pesquisa do uso da água e do funcionamento hídrico das plantas. Além disso, pode ser usada na determinação de decisões relativas à necessidade e tempo de rega (Silva, 2008).

Green et al. (2003) fizeram uma revisão dos métodos de compensação e do impulso de calor $T_{\max}$ os quais, utilizam um aquecedor linear e sondas de temperatura inseridas radialmente no tronco da planta as quais, perturbam a corrente de seiva e alteram a homogeneidade térmica do tronco na vizinhança das sondas. O grau de perturbação depende do tamanho e geometria das sondas bem como da largura da ferida correspondente do tronco. Assim, utilizaram um modelo bidimensional de

fluxo de calor e água para derivar os fatores de correção apropriados de maneira a explicar a influência de ambas as propriedades térmicas da sonda e do bloqueio do fluxo. A largura da ferida tem uma grande influência nas medições de impulso de calor, enquanto o material do sensor parece ter pouca ou nenhuma influência.

A principal desvantagem do HPV são os danos provocados na instalação, pois a inserção de sondas com sensores no xilema da planta para medir as alterações de temperatura produzidas por um impulso de calor libertado por um aquecedor linear provoca uma perturbação das condições naturais do xilema e, conseqüentemente, o SF determinado por estas técnicas é subestimado. Um coeficiente para corrigir a velocidade de impulso térmico em relação ao efeito invasivo foi sugerido por Swanson R.H. and Whitfield (1981); Altozano et al. (1998); Cohen M. et al. (2001), entre outros.

Os métodos de balanço de calor (HB) recorrem também a um aquecimento contínuo, comparativamente a outro conjunto de métodos que foram desenvolvidos a partir da aplicação de calor de forma intermitente, sendo genericamente designados por HP.

Duas vertentes de medida de SF pelo método de HB têm sido utilizadas, nomeadamente, THB (balanço térmico com aquecimento interno) e SHB (balanço térmico com aquecimento externo).

A primeira foi utilizada por Čermák et al. (1973, 1976) Kučera et al. (1977) onde a aplicação do calor é efetuada num setor interno do tronco. Este calor é fornecido por elétrodos de aço inoxidável inseridos no xilema. Čermák et al. (1973, 1976) manteve uma diferença de temperatura constante entre os sensores localizados acima e abaixo do segmento aquecido, mediante a variação da potência aplicada ao conjunto dissipador de calor (Paço, 2003). Posteriormente, a precisão deste método, em condições de campo foi demonstrada por Schulze et al. (1985); Kjølgaard et al. (1997); Grime et al. (1995).

Kučera et al. (1977) sugeriram que a manutenção de gradientes estáveis de temperatura, mediante a variação da potência aplicada, requer aparelhos eletrónicos sofisticados e o controle individual para cada sensor.

A segunda forma do método foi primeiramente descrita por Sakuratani (1981, 1984) no Japão. Este nos seus estudos aplicou uma quantidade de calor conhecida a um caule e calculou a partir de medições de gradientes de temperatura, as trocas de calor por convecção ao longo desse caule e com a atmosfera (Silva, 2008).

Baseados no trabalho descrito Baker and Van Bavel (1987) utilizaram este método no desenvolvimento de um medidor de SF. A aplicação deste método em lenhosas começou nos Estados Unidos (Baker and Van Bavel, 1987; Steinberg et al., 1989; Heilman and Ham, 1990) e na França (Valancogne and Nasr, 1989). A partir de então, tem sido usado em inúmeros trabalhos em herbáceas e lenhosas, seja com objetivos de aplicabilidade, seja na análise e aperfeiçoamento do próprio método. Tal como citado por Baker and Van Bavel (1987), estes autores ainda baseados no mesmo estudo, desenvolveram um medidor de SF modificando o projeto original de modo a ultrapassar determinadas dificuldades. Esta melhoria e aperfeiçoamento do método permitiram a aquisição e armazenamento de dados em tempo real através de um sistema de aquisição de dados (Silva, 2008).

Steinberg et al. (1989) utilizaram este método em arbustos. No entanto, em 1990, melhoraram o método e aumentaram a precisão da medida.

Valancogne and Nasr (1989); Valancogne et al. (1993) utilizaram este método em árvores de porte pequeno e médio. Adaptaram o sistema com a utilização de termopares inseridos radialmente no xilema com o intuito de avaliar os gradientes de temperatura longitudinais e considerarem o armazenamento de calor na zona aquecida, estimado por uma medição adicional nesta zona (Silva, 2008).

Kenneth et al. ao estudarem possíveis fontes de erro na estimação de fluxos de seiva pelo HB em plantas lenhosas no campo, detetaram a ocorrência de valores muito pequenos e até negativos entre a temperatura da superfície do caule acima e abaixo da fonte aquecedora, o que conduz a uma superestimativa dos fluxos e a obtenção de fluxos negativos em condições de corrente transpiratória alta, erros esses atribuídos à influência direta das condições ambientais nos sinais do sensor.

Weibel and de Vos (1994) efetuaram medidas numa macieira utilizando um sensor

comercial e encontraram erros superiores a 20% na estimativa de SF diário decorrentes da falta de bom contato entre o sensor e o tronco, desuniformidade da distribuição espacial do SF e retardamento da resposta do sensor quando ocorreram variações bruscas da transpiração, principalmente pela falta de estimativa do calor armazenado pelo caule. Estes problemas foram detectados posteriormente e minimizados através da medida de armazenamento de calor e da instalação assimétrica das sondas de temperatura, para medidas do gradiente térmico nos limites superior e inferior do segmento aquecido de caule (Trejo Chandia and Angelocci).

Mais tarde, Remorini and Massai (2003) mediram vários indicadores fisiológicos e físicos e compararam com o fluxo de seiva xilémica medido pelo balanço de calor, para identificar o indicador de estado hídrico da planta mais sensível e confiável, tendo verificado que o SF e a flutuação no diâmetro do tronco foram os melhores indicadores (Silva, 2008).

Sistemas que utilizam o método de HB medem o fluxo de calor, o qual pode ser facilmente convertido em fluxo de massa volumétrica. Assim, calculam a quantidade de calor dissipado a partir de um determinado setor do tronco a jusante, enquanto uma quantidade constante de calor é aplicado. Um método alternativo consiste em determinar o calor que é necessário à entrada para manter a diferença numa temperatura constante. Esta metodologia requer mais energia (calor) pelo que, a sua aplicação só é viável para troncos com diâmetros inferiores a 4 cm. Em caso de diâmetros superiores, é necessária a medição da temperatura interna (Valancogne and Nasr, 1989).

O método de Granier (1985) (HD) recorre a uma fonte de calor constante e pontual para determinar a densidade de SF num tronco, obtendo-se uma estimativa do seu valor.

O HD, inicialmente desenvolvido por Granier (1985) para determinar o SF em espécies florestais, consiste na utilização de duas sondas curtas, ambas com um sensor de temperatura do tipo termopar, inseridas radialmente no tronco e separadas

cerca de 10 cm entre si (Altozano et al., 2008). Granier (1985) relacionou assim a velocidade de dissipação de calor aplicado num determinado ponto do tronco com o SF ao longo desse mesmo tronco. O método consistiu em fornecer uma pequena quantidade de calor constante através de uma sonda de dissipação térmica que foi inserida num ponto do tronco. A variação ao longo do tempo da diferença de temperatura entre esse ponto e um ponto abaixo do mesmo é proporcionada pelo transporte de calor por convecção da seiva.

Granier calibrou este método em laboratório inicialmente com três espécies de plantas lenhosas e, posteriormente com seis verificando que uma única equação de calibração pode ser utilizada em todas elas. Em função disto, propôs que esta equação poderia ser utilizada em qualquer planta lenhosa com diâmetro de caule superior a 4 cm (Rojas, 2003).

Diversos autores já testaram este método em condições naturais de campo e em diferentes espécies de plantas. Ferreira and Zitscher (1996) detetaram que uma das principais fontes de erro deste método poderia ser o gradiente de temperatura natural (GTN) do tronco principalmente quando o sensor é colocado muito próximo do solo (Rojas, 2003). Outros autores verificaram este propósito entre os quais, Granier and Loustau (1994) que se aperceberam da existência deste gradiente. O GTN é o efeito que a radiação, a temperatura do ar e do solo tem no tronco. Este parâmetro influencia o valor da medição térmica do sensor, acabando por afetar também a estimativa do SF.

A calibração empírica do método de Granier (1985, 1987) foi reavaliada por Clearwater et al. (1999), analisando a variação da velocidade da seiva. Determinados autores apontam que o SF pode ser subestimado se as sondas inseridas no caule estiverem em contacto com porções do xilema inativo ou com o córtex mas, poderá realizar-se a correção caso a porção inativa seja conhecida. O SF também poderá ser subestimado se o gradiente da velocidade da seiva for diferente ao longo do comprimento da sonda, sendo este erro minimizado pelo uso de sondas mais curtas e pela inserção de múltiplas sondas (Rojas, 2003).

DO and Rocheteau (2002) estudaram a influência do gradiente de temperatura ambiente nas medições feitas de SF pelo HD, concluindo que, quando se utiliza sondas de dissipação térmica com aquecimento contínuo, é importante considerar os efeitos do gradiente de temperatura ambiente. Os erros, nas medições associados ao gradiente de temperatura, foram aumentando quando existiam maiores diferenças entre as temperaturas do dia e da noite, baixas razões de SF e em culturas espaçadas ou com alta radiação solar. Os autores apresentam como alternativa a utilização de um sistema de dissipação térmica descontínua, considerando-a uma solução atrativa, pois conserva a simplicidade do método de Granier e aparentemente elimina a sensibilidade do sensor ao gradiente de temperatura ambiente (Silva, 2008).

Dauzat et al. (2001) utilizaram o método de SF descrito por Granier para simular a transpiração, feita por um modelo de plantas virtuais proposto pelos autores e, ainda, usaram-se desse método para avaliar a variação circunferencial e radial da densidade de SF no xilema de troncos de mangueira (Silva, 2008).

Lu (1997), afirmou que este sistema não precisava de calibração para diferentes espécies de árvores mas, Smith and Allen S.J. (1996) efetuaram outros estudos que determinaram a necessidade de calibração.

Os gradientes de temperatura naturais nos ramos das árvores que crescem em céu aberto dão origem a erros de medição do SF pelo método de dissipação térmica contínua. Porém, a partir de medições no terreno constatou-se que, um sistema de dissipação térmica não-contínuo pode evitar esses erros (DO and Rocheteau, 2002).

Nos últimos anos, tem havido um interesse renovado nas técnicas de medição do SF devido a melhorias dos equipamentos na área da eletrônica e instrumentação. Atualmente, existem três grupos de sistemas de calor para determinar o SF: HP, HB e HD.

Uma abordagem mais pormenorizada deste conjunto de métodos é crucial no processo de otimização da utilização de água e, embora existam diversos métodos para a medição da transpiração em condições naturais divergentes, é necessário estudá-los e perceber a forma como são utilizados na estimativa da transpiração, numa série de

escalas temporais. Estes métodos baseiam-se nas propriedades de dissipação do calor pelo movimento da água e admitem que a água do xilema tem maior contribuição para a resposta dos sensores do que a do floema (Dragoni et al., 2005). Contudo, para a implementação prevista do sensor, somente o HD é posto em prática e toda a análise é centrada na sua utilização visto ser a tecnologia disponível e envolver custos menores de utilização.

2.1.1 Método de impulso de calor

O princípio básico da utilização deste método, também conhecido por *Heat Pulse*, é efetuar um aquecimento da seiva num determinado ponto e acompanhar o comportamento do calor induzido ao longo do percurso efetuado pela seiva, utilizando sensores de temperatura. Assim, o SF é medido através da determinação da velocidade do impulso de calor (Silva, 2008).

As sondas de aquecimento e os sensores de temperatura são inseridos no tronco onde, a combinação utilizada para os sensores de temperatura pode ser diferente: com apenas um sensor introduzido acima da sonda de aquecimento, com dois sensores equidistantes ($x = y$), sendo um acima e outro abaixo da sonda de aquecimento, e aquele em que as duas sondas são inseridas a distâncias dissemelhantes à sonda de aquecimento ($x \neq y$), como ilustrado na figura 2.1.

Marshall DC. (1958) propôs a equação (2.1) com base na análise da difusão de calor por meio da circulação da seiva:

$$\text{Fluxo de seiva} = a \cdot u = \frac{\rho \cdot c}{\rho_s \cdot c_s} \cdot V = \rho_b \cdot (m_c + 0,33) \cdot V \quad (2.1)$$

onde a é a área do xilema (cm^2), u a velocidade da seiva (cm h^{-1}), ρ a densidade da madeira (g m L^{-1}), c o calor específico da madeira ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), ρ_s a densidade da seiva (g m L^{-1}), c_s o calor específico da seiva ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), ρ_b a densidade básica da madeira (g m L^{-1}), m_c a humidade da madeira (decimal) e V a velocidade do impulso de calor (cm h^{-1}).

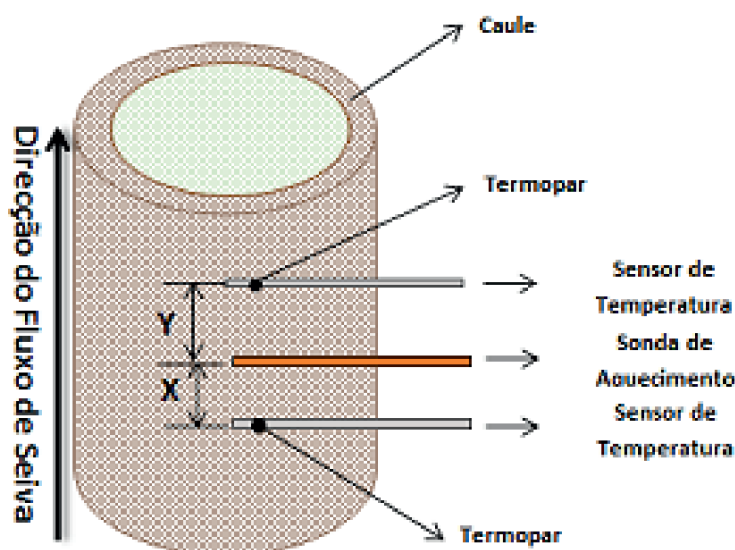


Figura 2.1 – Esquema do método de impulso de calor (Adaptado de Silva (2008)).

2.1.2 Método de balanço de calor

O princípio básico da utilização deste método, também conhecido por *Heat Balance*, é a aplicação de um pequeno fluxo constante de calor (P) em torno do caule através de uma fonte de calor. A distribuição desse calor é quantificada nos fluxos condutivos axiais (Q_c e Q_b), radiais (Q_l) e na variação de armazenamento (Q_a) no volume que corresponde ao segmento aquecido. O calor que é dissipado através do mecanismo de convecção pela seiva (Q_s) é calculado pelo princípio de conversão de energia, como termo residual do balanço de calor, sendo Q_s associado ao fluxo volumétrico da seiva, como ilustra a figura 2.2. A equação geral do balanço de calor do segmento é definida pela equação (2.2).

$$P = Q_b + Q_c + Q_l + Q_s + Q_a \quad (2.2)$$

De acordo com Dayau (1993), pode ser feito um pequeno ajuste na tensão do fio de aquecimento de maneira a se obter a potência P com base na relação empírica da

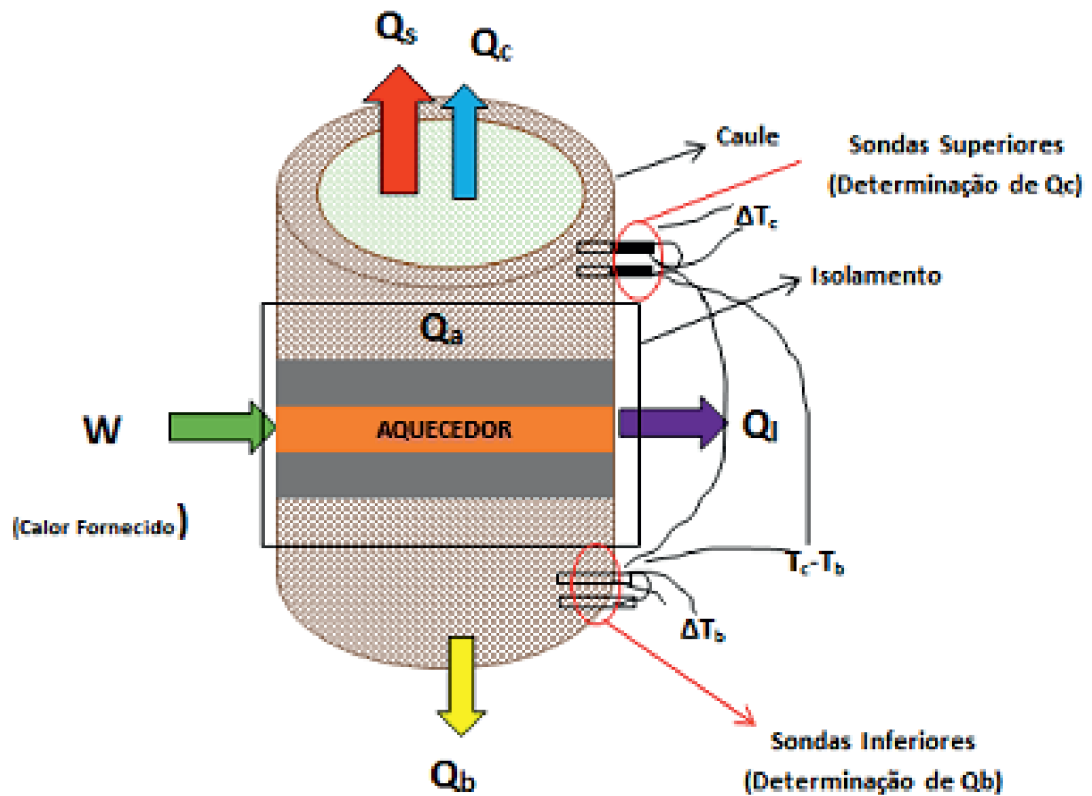


Figura 2.2 – Esquema do método de balanço de calor (Adaptado de Silva (2008)).

equação (2.3), a qual está dependente do diâmetro do ramo (D).

$$P = 2,1 \cdot \frac{D^2}{81} \quad (2.3)$$

Assim, a resistência total do invólucro térmico (R)(Ω) é calculada pela equação (2.4).

$$R = \frac{(ddp)^2}{P} \quad (2.4)$$

onde ddp corresponde à diferença de potencial (V) que deve ser aplicada.

O calor que é dissipado pela seiva (Q_s) pode ser associado ao fluxo de seiva através da equação (2.5).

$$Q_s = C_{vs} \cdot SF \cdot (T_C - T_B) \quad (2.5)$$

onde C_{vs} é a capacidade calorífica volumétrica da seiva bruta ($4,18 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), T_c e T_b são as temperaturas médias das secções transversais no limite superior e inferior do volume amostrado e SF o fluxo de seiva. Substituindo-se a equação (2.5) na equação (2.2) e isolando-se o SF :

$$SF = \frac{[P - Q_c - Q_b - Q_l - Q_a]}{C_{vs} \cdot (T_c - T_b)} \quad (2.6)$$

Q_c e Q_b são estimados pela aplicação da lei de transporte de calor de Fourier, segundo Valancogne and Granier (1994) através de:

$$Q_b = -\alpha \cdot A_b \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)_b \quad (2.7)$$

$$Q_c = -\alpha \cdot A_c \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)_c \quad (2.8)$$

onde α é a condutividade térmica do tronco ($0,4$ a $0,6 \text{ (W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$), A_b e A_c são superfícies das secções transversais dos extremos superior e inferior do cilindro considerado, dT são gradientes térmicos nos limites especificados e dx é a distância entre as sondas colocadas.

A variação de armazenamento de calor no segmento é definida pela equação (2.9)

$$Q_a = C_{vm} \cdot V \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.9)$$

onde C_{vm} é o calor específico volumétrico da madeira húmida ($2,8 \text{ J m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), V é o volume do segmento considerado (m^3) e $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ é a variação da temperatura média do segmento.

O fluxo lateral Q_l é determinado, por um fluxímetro, pela medida da força electromotriz gerada através da lâmina do material de construção do fluxímetro o qual depende da temperatura entre os lados da lâmina e da condutância térmica dessa lâmina, pela equação (2.10):

$$Q_l = -K_f \cdot \Delta T_l \quad (2.10)$$

Existem dificuldades em calcular o valor de K_f (em $W \text{ } ^\circ C^{-1}$) pelo que, utilizando-se o método de Valancogne and Nasr (1989), que admite que o fluxo de seiva no final da madrugada é nulo, pode-se determinar o coeficiente de condução de calor do fluxímetro (K_{lat} , em $W \text{ } ^\circ C^{-1}$), admitindo que este é constante quando o transporte por convecção é nulo, através da equação (2.11).

$$K_{lat} = \frac{[P - Q_c - Q_b - Q_a]}{\Delta T_l} \quad (2.11)$$

Como o valor da potência (P) aplicada é conhecido, Q_c , Q_b e Q_a podem ser determinados pelas equações anteriores 2.7, 2.8 e 2.9 e ΔT_l é um valor obtido na medição do fluxímetro.

2.1.3 Método de Granier

O princípio básico da utilização deste método, também conhecido como *Granier Thermal Dissipation Method*, é relacionar a densidade do transporte por convecção da seiva através da secção transversal do tronco e a velocidade da dissipação de calor devida a esse transporte. Em condições hídricas normais da planta, esta variação acompanha as condições atmosféricas do meio ambiente, em função da radiação solar, temperatura, vento, humidade do ar, entre outros fatores.

Este método utiliza duas sondas cilíndricas inseridas radialmente no tronco da planta, permitindo determinar a diferença de temperatura entre ambas. A sonda superior contém um elemento aquecedor e um termopar. A inferior possui apenas um

termopar sendo colocado no mesmo plano vertical que a primeira e à temperatura de referência, ou seja, à temperatura natural dos tecidos do tronco. Estas duas sondas estão devidamente espaçadas entre si, como ilustra a figura 2.3. Esta separação evita que o calor aplicado influencie a medição da temperatura de referência (sonda inferior).

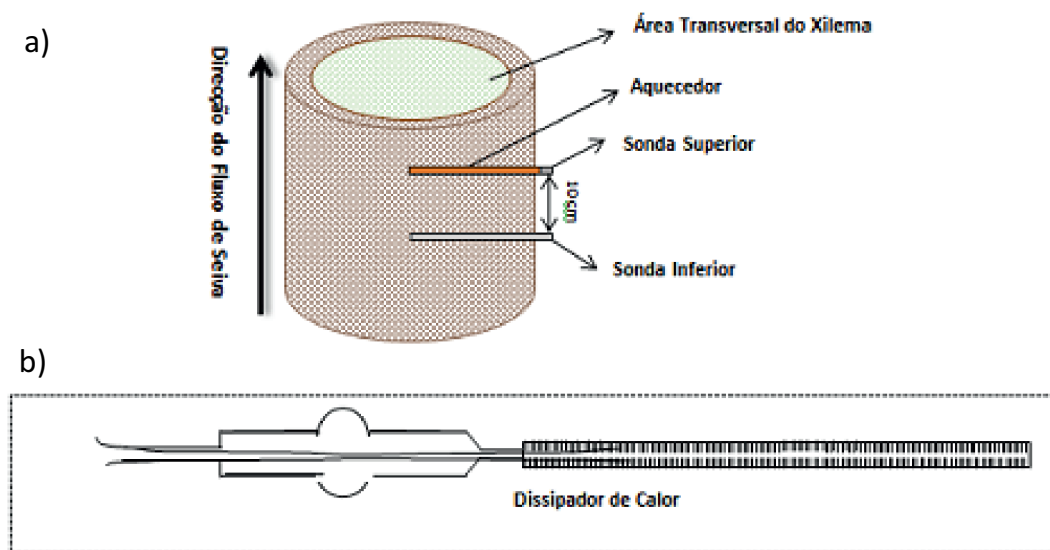


Figura 2.3 – a) Esquema do método de dissipação de calor (Adaptado de Silva (2008)), b) Sonda de dissipação térmica (Granier).

Uma corrente constante percorre o elemento aquecedor e a diferença de temperatura entre as duas sondas (ΔT) é dependente da quantidade do fluxo de seiva, que ascende pelos vasos do xilema. Com o aumento de fluxo, o calor é dissipado mais rapidamente e, portanto, ΔT decresce. Quando não há fluxo de seiva a diferença de temperatura entre as sondas atinge o valor máximo $\Delta T_{\max}$. Por meio dessa relação estima-se a transpiração da planta, de acordo com a equação (2.12).

No período noturno existe um pequeno fluxo de seiva bruta através do tronco para contrapor a deficiência hídrica na parte superior da planta que ocorre devido à transpiração durante o período do dia. Este período torna-se mínimo ou nulo no fim da noite, sob condições hídricas favoráveis do solo (Rojas, 2003).

Granier propôs uma relação entre a densidade de fluxo de seiva " u " e um fator

" k " (índice de fluxo), característico a cada espécie vegetal, para a determinação do fluxo de seiva:

$$k = \left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right) = 0,0206 \cdot u^{0,8124} \quad (2.12)$$

onde $\Delta T_{\max}$ é a diferença máxima de temperatura ($^{\circ}C$) entre dois pontos (ocorre quando o fluxo é nulo), ΔT é a diferença de temperatura atual ($^{\circ}C$) entre a sonda aquecida e a que não é aquecida. O SF é determinado a partir do valor de k , baseando-se em calibrações para determinação dos parâmetros da equação 2.13, segundo Granier et al. (1990); Valancogne and Granier (1997).

$$u = \frac{1}{\alpha} \cdot k^{\beta} \quad (2.13)$$

Esta determinação conduzirá a uma relação independente da espécie. Assim, o SF para qualquer espécie, de acordo com Granier (1987) é dado por:

$$SF = u \cdot A_S \quad (2.14)$$

$$SF = 118,99 \times 10^{-6} \cdot k^{1,231} \cdot A_S \quad (2.15)$$

onde A_S é a área condutora de seiva bruta (normalmente a área ocupada pelo xilema)(m^2), k é calculado pela equação (2.12).

Num período longo de tempo, o valor de $T_{\max}$ pode variar devido a alterações das propriedades térmicas do xilema pelo que, este valor deve ser verificado diariamente (Tavares, 1993).

Este conjunto de métodos, tem vindo a ser dos mais utilizados pelos mais diversos autores pelo que, apresentam características próprias bem como benefícios e inconvenientes que advêm da sua utilização pelo que, torna-se necessária fazer a sua análise comparativa.

2.2 Análise comparativa

O processo de determinação de SF para avaliar as necessidades hídricas das plantas não é um estudo recente, tendo sido desenvolvido por diferentes autores ao longo do tempo. De entre os métodos existentes, os autores comparam os que medem a taxa de SF, determinando o fluxo total de seiva no tronco e os que medem a densidade do SF, avaliando a quantidade de seiva que flui através de uma certa superfície. Os primeiros estimam o uso total de água pela planta mas, contudo, são inapropriados para estimar a variação do SF no interior da planta (por exemplo, perfis radiais do SF). Os segundos detetam diferenças na densidade de SF no interior da planta permitindo uma análise mais detalhada das características hídricas da planta fornecendo dados mais precisos. Destes, destacam-se os métodos contínuos de medição da densidade de SF como o HD e o HP (Vandegehuchte and Kathy, 2013).

Dependendo do método utilizado, são feitas medições do SF no tronco onde se localizam os sensores. Alguns métodos integram o SF em todo o tronco enquanto que, outros, fornecem dados para calcular o SF em diferentes profundidades. Alguns métodos são apropriados para troncos de pequeno diâmetro enquanto outros podem ser usados em árvores de grande porte. Independentemente do método, a calibração é aconselhada e conveniente para os métodos invasivos uma vez que a inserção da sonda no tronco altera as características do xilema. As medições de alguns métodos são feitas de forma contínua, enquanto que noutros são feitas de forma descontínua. Alguns métodos não permitem efetuar medições abaixo de um determinado limiar de velocidade de calor enquanto que outros são úteis para medir valores de SF muito baixos. Ao ser aplicado um determinado método, deve-se conhecer o seu potencial e limitações antes de selecionar o mais adequado.

O HP utiliza o princípio da dissipação de calor após a aplicação de um impulso o que faz com que, a medida não possa ser efetuada de forma contínua já que, depende do intervalo de tempo necessário para atingir o equilíbrio térmico novamente,

após aplicação do impulso de calor. Este método assenta na diferença de temperatura ao longo do tempo na mesma posição de medição, ao contrário dos métodos contínuos que aplicam diferenças de temperatura espaciais entre posições diferentes e são menos susceptíveis a GTN. Os métodos de impulso de calor parecem superar os contínuos na parte de não requererem uma calibração específica e devido ao facto de serem menos susceptíveis aos GTN. Apresentam melhoramentos nas correções que devem ser efetuadas devido a característica invasiva do sensor. Este método exige o espaçamento exato das sondas no tronco e a homogeneidade térmica do tronco. Exige uma menor potência, comparativamente ao aquecimento constante requerido por outras técnicas. Como qualquer método invasivo tem o inconveniente das perfurações necessárias à instalação das sondas.

O HB possui duas variantes, SHB e THB. No SHB os sensores são rígidos e de tamanho fixo não permitindo o crescimento do tronco. Por esta razão, para grandes árvores, a banda de aquecimento e os requisitos de energia são grandes e o cálculo do calor armazenado torna-se difícil motivo pelo qual, está limitado a troncos com diâmetro inferior a 10/12 cm sendo que apresenta problemas na determinação do perfil do fluxo radial. O THB calcula taxas de SF com base num balanço energético num volume específico do tronco. A sua instalação, não invasiva, é efetuada em árvores com diâmetros superiores a 12 cm. Os sensores devem estar instalados a mais de 0,5 m do solo para evitar GTN. A compensação de GTN é efetuada pela instalação de agulhas de detecção adicionais no tronco.

O HD é um método contínuo simples, fácil de utilizar e de baixo custo, o que permite estimar baixas, médias e altas densidades de SF. O consumo de energia é previsível e permite calcular a densidade de fluxo de seiva independentemente das características da anatomia do tronco. Este método possui um fator de correção que advém do posicionamento das sondas. Contudo, os gradientes de temperatura naturais interferem nas medições e o facto de ser invasivo, pode causar obstrução do fluxo o que interfere com a medida. Na análise dos dados deve-se ter em conta a variabilidade nas taxas de fluxo ao longo do comprimento do sensor inserido no tecido não condutor o que pode comprometer a sua correta interpretação. Neste

Tabela 2.1 – Avaliação dos métodos de medição do fluxo de seiva xilémica.

Método	Classificação	Equação	Correção	Vantagens	Desvantagens
Impulso de calor	Aplicação de impulsos de calor	$SF = a \cdot u = \frac{\rho \cdot c}{\rho_s \cdot c_s} \cdot V = \rho_b \cdot (m_c + 0,33) \cdot V$			Dificuldade em medições de baixo fluxo de seiva.
Balanço de calor		$W = Q_b + Q_c + Q_l + Q_s + Q_a$		Simples; Suficientemente exato; Sem calibração; Facilidade de Instalação; Portabilidade dos equipamentos; Facilidade no uso do sistema de aquisição de dados; Baixo custo	Limitado para árvores de caules regulares; Medição de certas variáveis complexas; Resposta inadequada em períodos de baixo fluxo.
Dissipação térmica (Granier)	Contínuo	$F = 118,99 \cdot 10^{-6} \cdot k^{1,231} \cdot AS$	Correção devida à existência de gradientes naturais: $\Delta T_{corr} = \Delta T - \Delta T_0$	Simples; De fácil confecção; Facilidade na instalação do sensor; Utilização fácil; Custo Reduzido; Necessidade de um menor número de canais diferenciais para medição; Aquisição de uma ampla variedade de dados no campo.	Avaliação da precisão do método não é suficientemente documentada.

método, o espaçamento exato das sondas é menos importante do que nos outros, desde que a sonda de referência não seja influenciada pela sonda de aquecimento. Nos outros métodos o espaçamento é crucial para se obter resultados precisos (Heidi and S., 2012).

Nenhum dos métodos abordados pode considerar a isenção de erros. Embora cada sistema de monitorização de SF tenha as suas limitações, desde que as considerações apropriadas sejam levadas em conta, esses sistemas podem produzir resultados válidos e valiosos. A tabela 2.1 resume as características, vantagens e desvantagens de cada método em estudo.

2.3 Sistemas de medida de fluxo de seiva

Devido à dificuldade de quantificar o consumo individual de água nas plantas, têm surgido uma série de técnicas de medida de SF que estão diretamente relacionadas com a transpiração da planta.

Nas últimas décadas, foram testadas algumas técnicas conhecidas como “métodos térmicos” que, apesar da complexidade envolvida, têm vindo a apresentar bons resultados na estimação da transpiração. Esses métodos utilizam o fornecimento de calor ao tronco, como “marcador” da seiva, o qual pode ser correlacionado com a densidade de SF e, conseqüentemente, com a transpiração.

Entre eles, o método denominado sonda de dissipação térmica ou sonda de Granier, tem sido utilizado por diversos autores, demonstrando ser uma alternativa promissora em processos de medição da transpiração das plantas (Andrade, 2010). Para tal, o presente estudo é efetuado usando este método dada a sua simplicidade na utilização de princípios físicos e a sua aplicabilidade, sem alterar as condições fisiológicas e microclimáticas da planta.

Nas últimas duas décadas, os avanços científicos e em particular da instrumentação eletrônica e equipamentos de medida permitiram o desenvolvimento de sensores para a monitorização da resposta fisiológica das plantas quer local, quer remotamente. Existem diversos sensores no mercado que diferem no modo de utilização e de aplicabilidade pelo que se torna relevante conhecê-los e perceber de que forma são utilizados.

2.3.1 Tipos de sensores no mercado

A medição direta do SF é um requisito fundamental na compreensão da utilização de água pelas plantas pelo que, tecnologias mais recentes para a medição do SF, incluem métodos para avaliar o consumo de água. Para este tipo de medições têm sido usados Dynagages e sondas TDP, sendo a seleção entre eles determinada principalmente pelo

diâmetro do caule ou tronco onde se pretende realizar a medida.

Marcas como a Delta-T (Reino Unido), a Dynamax (EUA) e a Greenspan (Nova Zelândia) são bem conhecidas no meio como fornecedores de sensores SHB (balanço de calor), HD (dissipação de calor) e HPV (impulso de calor), respectivamente. As secções seguintes descrevem resumidamente cada um dos tipos de sensores existentes.

2.3.2 Sonda Dynagage

Os princípios do método do balanço de calor foram cientificamente comprovados ao longo dos anos e existem referências para grandes culturas e espécies de árvores tais como pimentão, algodão, batata-doce, videiras, e outros. Este tipo de sensores são a tecnologia mais recente para a medição do SF e, portanto, o consumo de água das plantas. São micro-sensores não invasivos utilizados para o mais ínfimo tipo de caules (2 a 125 mm de diâmetro) sendo responsáveis por medir a quantidade de calor transportado pela seiva o qual, é convertido em SF em tempo real. Estes sensores não são prejudiciais às plantas pois estas são tipicamente aquecidas até temperaturas entre 1 e 5° C. Os Dynagages, como os ilustrados na figura 2.4, não necessitam de calibração uma vez que, o SF é determinado diretamente pelo balanço de energia e as taxas de convecção de calor pelo SF.

Esta nova tecnologia é excelente, pois é uma forma acessível e prática de medir o uso da água pelas plantas de importância agrícola, económico e ecológico. Permite facilmente a sua aplicação em plantas de estufa, viveiros ou ambientes naturais.

Para a instalação do sensor é necessário uma porção razoável de tronco em linha reta. Este possui um elemento aquecedor que se encontra preso à volta do caule da planta e isolado das condições ambientais. Os termopares inseridos no medidor permitem a medição do calor transportado pelo SF, sendo esta medida absoluta.

A Dynamax introduziu os primeiros protótipos de sensores de SF em 1988. Atualmente a sua aplicabilidade destina-se a sensores de 2 mm até 150 mm. Para a sua utilização existem tecnologias que auxiliam a medição da transpiração das plantas



Figura 2.4 – Dynagage (Dynamax, 2017).

como por exemplo o Dynagage Flow32-1K, figura 2.5 que, auxiliado por um software específico, permite a determinação dos dados de forma eficiente e rápida.

Este sistema é fácil de utilizar, preciso e confiável, revelando-se essencial no que diz respeito à gestão da água, à avaliação das relações hídricas de plantas e na produção de biomassa. As taxas de fluxo e de transpiração permitem determinar horários mais precisos de rega, melhores pontos de ajuste na rega e nas medições da evapotranspiração uma vez que, através do SF se consegue extrair dados fundamentais para modelar as taxas anuais de crescimento da cultura e realizar projeções de recuperação ambiental. Afinal, a planta é um "ponto-chave" para avaliar a quantidade de água que é consumida sob condições variáveis.

O sensor EXO-Skin Dynagage (Dynamax, 2017), figura 2.6, foi desenvolvido com base no método de balanço de calor com o intuito de dar resposta a alguns problemas recorrentes com o Dynagage. É um sensor de baixo custo, com a mesma precisão, de fácil manutenção, flexível e de fácil instalação. O seu revestimento, que constitui a parte de isolamento do sensor, é uma construção simples e de baixo custo. O exoesqueleto consiste na parte eletrónica do aquecedor e no sensor térmico, em camadas.



Figura 2.5 – Dynagage Flow32-1K (Dynamax, 2017).

Estes sensores são mais flexíveis e fáceis de instalar, especialmente em troncos não uniformes. Na sua fabricação, a EXO-Skin utiliza um acondicionamento flexível de velcro, com uma bainha reflexiva flexível para fixar o corpo à planta reduzindo problemas de manutenção e instalação necessários para acomodar o crescimento. Esta é necessária para bloquear o calor radiante, que pode causar erros em aplicações de sensores de SF. Inclui uma membrana impermeável que envolve o isolamento do sensor em torno da eletrônica e do exo-esqueleto do aquecedor. A membrana é permeável ao vapor de água mas impermeável à água e gotas o que maximiza a extração de vapor de água do tronco e do sensor o que vai permitir efetuar medições a longo prazo nas plantas.

De modo a facilitar o processo de medida no terreno, estes sensores podem ser ligados em rede através do sistema SapIP, o qual pode ser usado para medir o consumo de água da planta em tempo real e sem calibração. O *gateway* SapIP pode monitorar até 25 nós SapIP com 2 sensores de SF cada. Os nós podem ser localizados até 5.000 pés de distância do módulo de *gateway*. Os dados são recolhidos e analisados previamente, o que torna a monitorização e a recolha de dados mais fácil.



Figura 2.6 – EXO-Skin Dynagage (Dynamax, 2017).

2.3.3 Sonda de dissipação térmica

A sonda de dissipação térmica de Granier, ou TDP, figura 2.7, é usada em caules ou troncos com diâmetros que variam de 70 mm a mais de 200 mm de diâmetro. Para os troncos com diâmetros inferiores é necessária uma sonda por planta. A velocidade de SF pode variar em torno da circunferência de uma árvore, de modo que, para árvores superiores a 125 mm de diâmetro, são aconselháveis duas sondas e para árvores maiores do que 200 mm são aconselháveis quatro sondas. No entanto, para árvores uniformes numa canópis fechada, é apenas necessária uma sonda por árvore. A sonda TDP é instalada no interior de furos feitos no corpo da planta. A escolha do comprimento da sonda é determinada pela espessura do tronco.

A sonda TDP é um dispositivo simples que é constituída por agulhas e utiliza a técnica de Granier. Cada sonda tem duas agulhas com termopares no seu interior, as quais são inseridas no tronco. A agulha colocada superiormente possui um aquecedor elétrico enquanto que a colocada inferiormente encontra-se à temperatura ambiente. As agulhas medem a diferença de temperatura (ΔT) entre a agulha aquecida (superior) e a agulha de referência (inferior). A variável (ΔT) e a (ΔT_{max}), com



Figura 2.7 – Sonda TDP (Dynamax, 2017).

o SF nulo, fornecem uma conversão direta e calibrada para a velocidade de seiva.

Esta sonda é facilmente inserida e removida, logo pode ser reutilizada. Utiliza um método de medição contínua, de dissipação térmica, a calor constante ou seja, não há períodos de espera, sem impulsos de calor. As agulhas são de aço inoxidável e os termopares (tipo T), são compatíveis com a maioria dos *data loggers*.

A figura 2.8 ilustra o sensor ECK-SF-20, cujo modelo foi desenvolvido por Granier (1985). As medições efetuadas são indiretas e retomam valores em milivolts e o SF é expresso em densidade. A utilização deste tipo de sensores é benéfica em processos de medição do SF, como a instalação em várias culturas desde que, estas tenham mais de 2 cm de diâmetro.

As utilizações desta sonda difere em diversos aspectos da utilização do Dynagage pelo que, devem ser tidos em conta determinados aspetos como os mencionados na tabela 2.2, na seleção do tipo de sondas a utilizar.



Figura 2.8 – Sensor ECK-SF-20 (Tecnal, 2017).

Dynagage (2-125 mm)	Sonda TDP (70 - >200 mm)
Permitem medir o fluxo de massa absoluta - sem calibração necessária	Mede Velocidade de Seiva, volume ou fluxo de massa
O sensor é colocado numa cinta em torno do tronco ou caule a medir	Agulhas duplas de aço inoxidável revestido com teflon
Não Invasivo	Técnica empírica de dissipação térmica
Inofensivo	Reutilizáveis pois as agulhas são facilmente inseridas e removida
Está de acordo com o tamanho da planta	

Tabela 2.2 – Principais caraterísticas do Dynagage e Sonda TDP.

2.3.4 Medidor de fluxo de seiva SFM1

Este sensor, ilustrado na figura 2.9, permite estimar o SF ou transpiração em plantas de forma independente e autónoma utilizando o Método de Razão de Calor (MRC ou HRM). Com este tipo de dispositivo é possível medir fluxos altos e baixos em galhos, troncos e raízes de plantas com tamanhos variados. Conseguem-se medir fluxos nulos e taxas de fluxo inverso, tornando-o um instrumento poderoso e flexível, no que diz respeito a medições diretas da utilização de água pelas culturas.

A sonda do MRC consiste em três agulhas de 35 mm. A sonda superior e inferior



Figura 2.9 – Medidor de Fluxo de Seiva SFM1 (Agroads).

contém termopares calibrados e de alta precisão localizados a 7,5 mm e 22,5 mm a partir da ponta de cada sonda. A terceira agulha, centralmente localizada entre as outras duas, é um aquecedor que permite a libertação uniforme de um impulso de calor através do xilema.

Todos os aspectos de operação do instrumento e cálculos são controlados por um microprocessador que converte automaticamente todos os sinais analógicos, em microVolt, para dados calibrados.

As variáveis de programação como o intervalo do impulso de calor, uso de energia, espaçamento entre sondas e frequência de medidas são mantidas pela memória não volátil.

Este sensor mostra também informações tais como o estado da bateria externa, número de série, versão **firmware**, estado do cartão SD, opção de registo de dados e fatores de correção. O **software** utilitário faz com que o medidor de SF possa ser usado manualmente. Isto permite avaliar a eficácia do intervalo dos impulsos de medida através da visualização dos dados de temperatura no ecrã. Registos subsequentes podem ser visualizados e mostram, em detalhe, a duração do impulso de calor necessário para libertar uma determinada quantidade de energia em Joule, o aumento temperatura após o impulso de calor, a razão das temperaturas entre os pontos de medida e a velocidade de seiva.

2.3.5 Constituição e instalação da sondas de Granier

Neste trabalho pretende-se avaliar o uso de sondas de Granier para perceber a importância da transpiração das plantas na determinação das suas necessidades hídricas. Para se ter uma melhor percepção do seu modo de funcionamento, é necessário avaliar os mecanismos que utilizam para a extração de resultados experimentais. A medição do SF é uma técnica fundamental na compreensão das relações hídricas de uma planta bem como da sua regulação.

A principal variável de resposta é a transpiração das videiras. Esta será estimada através de medidas de SF. Para efetuar estas medições foi utilizada a metodologia da dissipação térmica desenvolvida por Granier (1985), em detrimento de outros métodos, dado o baixo custo dos sensores e do menor número de canais diferenciais necessários para a realização das medidas.

Uma sonda Granier (figuras 2.10 e 2.11) é constituída por um par de sondas cilíndricas distanciadas entre si na mesma linha vertical (em direção ao eixo do tronco) as quais, são inseridas perpendicularmente no tronco distanciadas verticalmente cerca de dez centímetros. Cada sensor é composto por duas agulhas de medição com termopares de Cobre-Constantan (tipo T) posicionado ao longo do comprimento das agulhas e um fio de aquecimento especial.

Ambos os termopares são ligados de tal forma, que o sinal corresponde diretamente à diferença de temperatura de ambos os elementos do sensor. As duas agulhas estão instaladas com uma determinada distância entre si, mas numa posição tal que, uma fica acima da outra no tronco.

A agulha superior é aquecida através da circulação de uma corrente constante no elemento aquecedor e o termopar nela inserido mede o aquecimento resultante. A variação da diferença de temperatura entre a sonda aquecida (superior) e a não aquecida (inferior) em cada instante é determinada pelo transporte de calor por convecção, através da seiva. Desta forma, a diferença máxima entre as duas sondas num período, significava que, o SF foi mínimo ou nulo, enquanto que a mínima

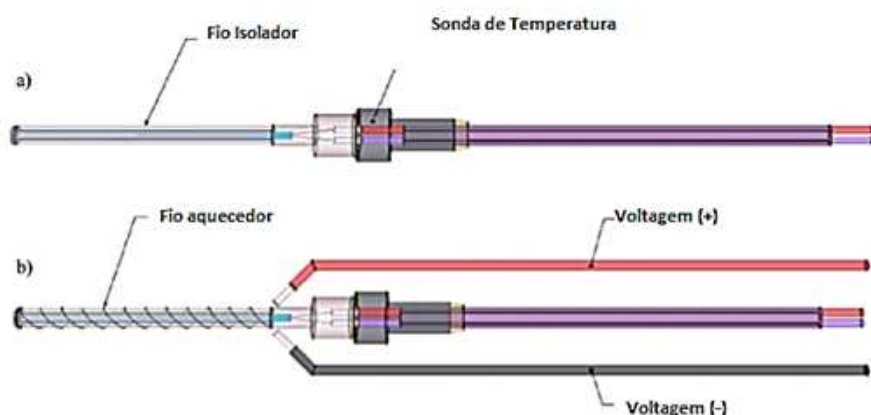


Figura 2.10 – Constituição da sonda de Granier (Adaptado de Davis et al. (2012)).

diferença, significava uma taxa máxima de SF, através dessa área de transporte, segundo Granier (1987).

Em diversos dispositivos que utilizam estas sondas para a medição do SF, as extremidades das sondas são estendidas através de um fio de cobre-padrão para um sistema de aquisição de dados (*data logger*), responsável por medir a diferença de temperaturas registrada entre os dois termopares instalados no tronco em que estão a ser realizadas as medições. Esta medição é efetuada por intervalos de tempo e por períodos de tempo definidos.

À medida que o SF aumenta, o calor da fonte de aquecimento dissipa-se mais rapidamente razão pela qual, a diferença de temperatura entre as agulhas diminui. Se não existir SF, a diferença de temperatura entre as agulhas será a maior possível. Granier, determinou uma relação empírica utilizada para calcular a densidade de SF pelo que, são recomendadas calibrações específicas para a cultura de interesse, aumentando sensivelmente a precisão da medida.

O GTN no tronco, para não influenciar na resposta do medidor de SF, deve ser reduzido através da colocação de proteção térmica ao longo da sua extensão (isolamento térmico do tronco).

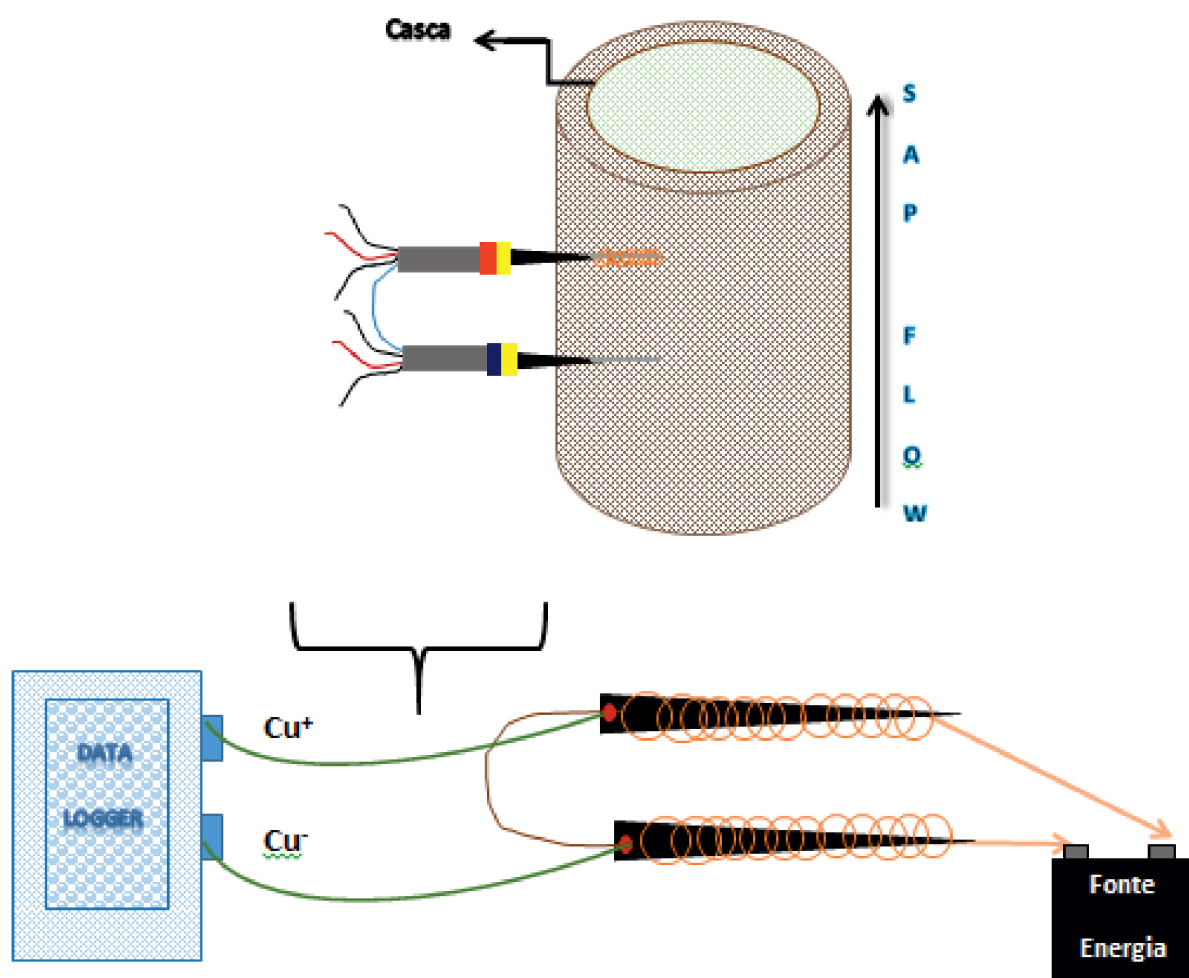


Figura 2.11 – Ilustração esquemática da sonda de Granier. Adaptado de (Malheiro, 2005).

3

Protótipo experimental

Dado o relevo do desenvolvimento vinícola na região do Douro e após a pesquisa efetuada e o princípio proposto, foi construído um sistema de medição do SF numa videira. Neste capítulo descrevem-se todas as etapas do desenvolvimento do protótipo de medição do SF, seguindo a metodologia proposta por Granier. Este sistema foi, depois de alguns ensaios preliminares realizados em laboratório, aplicado a uma videira no Campus da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

3.1 Arquitetura do sistema de medida

Inicialmente foi construído um protótipo de sistema de medida, com a finalidade de substituir os *data loggers* que são utilizados para este tipo de medições. Assim, consegue-se minimizar a utilização de cabos e de outros equipamentos no campo e tornar este tipo de medições o mais fácil e eficiente possível. O propósito da construção do protótipo é o de permitir um registo de dados no campo, combatendo algumas fragilidades associadas a equipamentos de maior volume e constrangimentos à sua utilização.

Na figura [3.1](#) ilustra-se a arquitetura proposta para o sistema de medida. Cada

sonda de Granier é composta por um termopar do tipo K inserido numa agulha de 1 mm de diâmetro e 35 mm de comprimento e por um elemento aquecedor ($R = 82 \, \Omega$) inserido na outra agulha. O elemento aquecedor será alimentado por uma bateria de 12 V, enquanto que o termopar será lido através de um conversor analógico-digital apropriado e as respetivas leituras adquiridas por um microcontrolador. As características da sonda ditaram o tipo de solução adotada no que diz respeito ao acondicionamento do sinal proveniente do termopar.

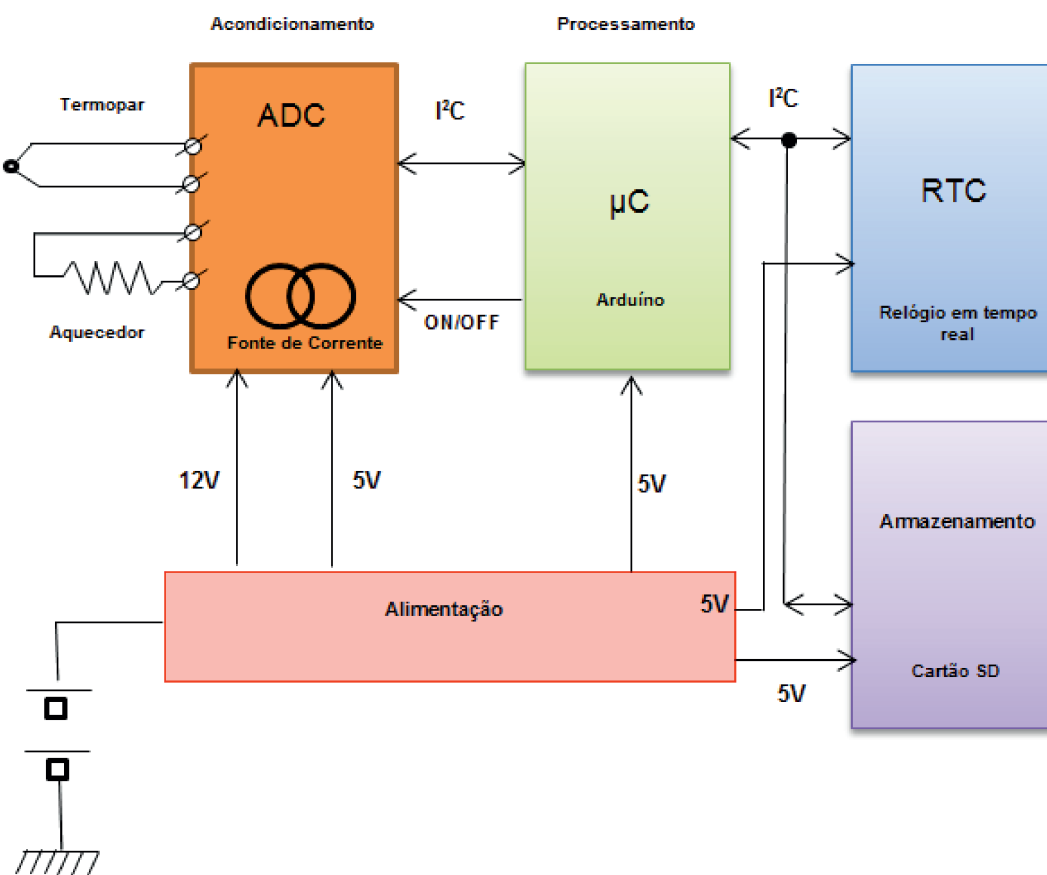


Figura 3.1 – Arquitetura do sistema de medida.

Além do subsistema de acondicionamento de sinal, o protótipo é ainda composto pelo: subsistema de processamento, responsável pela gestão de todo o protótipo; subsistema de relógio em tempo real, responsável por gerir as temporizações; subsistema de armazenamento de dados e; subsistema de alimentação elétrica. Estes

subsistemas são descritos de seguida.

3.1.1 Acondicionamento do sinal

A medida de sinais com reduzida amplitude provenientes de um termopar, na ordem dos microvolts (μV), necessita de um conversor analógico digital (ADC) com características especiais. Para tal função, utilizou-se um circuito completo para este fim; o circuito integrado MAX31855 (Maxim Integrated Products, USA) que digitaliza um sinal proveniente de termopares de vários tipos com uma resolução de 14 bit e possui a capacidade de efetuar a compensação da junção fria. O circuito utilizado para o efeito está representado na figura 3.2.

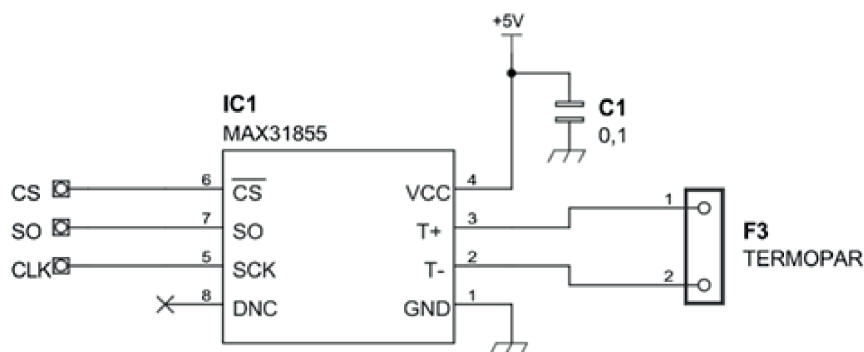


Figura 3.2 – Circuito integrado MAX31855.

Basicamente, este circuito integrado já contém tudo o que é necessário para realizar a aquisição de sinais de amplitude muito reduzida, provenientes de termopares. Uma característica importante é também integrar um sensor de temperatura de referência, necessário para que o circuito realize a compensação da junção fria.

A junção fria do termopar é a extremidade em aberto deste a qual, tem de ser mantida a 0 °C para que a diferença de temperaturas obtida entre as duas extremidades do termopar seja exata. É fundamental encontrar uma forma de evitar possíveis erros na medição de temperaturas, com o intuito de reduzir erros provenientes de gradientes de temperatura introduzidos no termopar. A compensação da junção

fria é importante pois, qualquer erro na medição da temperatura da junção fria irá ocasionar igualmente erros na medição da temperatura na extremidade do termopar.

O módulo de acondicionamento contém uma fonte de corrente que presta um papel fundamental já que, um valor preciso de corrente que circulará no elemento aquecedor regulará o calor dissipado na agulha do aquecedor. Assim, o elemento aquecedor é excitado por uma fonte de corrente alimentada por uma tensão externa de 12 V sendo possível ligá-la e desligá-la através de um sinal de controlo. O circuito elétrico está ilustrado na figura 3.3.

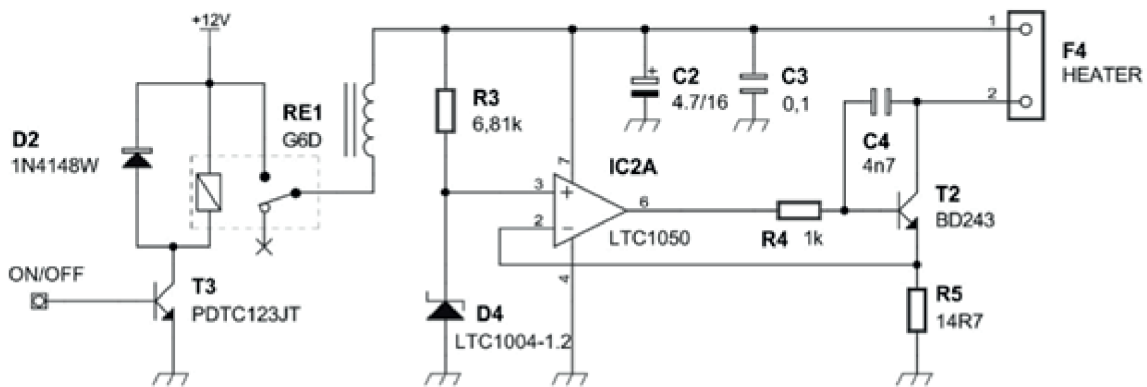


Figura 3.3 – Circuito elétrico da fonte de corrente.

O circuito da fonte de corrente é controlado através de um relé, comandado por um sinal digital proveniente do Arduino (Arduino, 2017). Desta forma, sempre que se pretende ligar o elemento aquecedor, basta ligar o relé que por sua vez liga a fonte de corrente. O circuito da fonte de corrente é composto por uma referência de tensão de precisão (LTC1004-1.2, Linear Technology, USA), cuja tensão de 1,2 V é comparada com a queda de tensão na resistência sensora de corrente (R_5). A regulação desta corrente fica a cargo do amplificador operacional (LTC1050, Linear Technology, USA) que, mediante a diferença entre ambas as tensões, aplica a ação corretiva através do transístor T_2 . A fonte de corrente foi programada para fazer passar pelo elemento aquecedor uma corrente de 81,6 mA, equação (3.1).

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_{\text{LTC1004}}}{R_5} = \frac{1,2}{14,7} = 81,6 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 81,6 \text{ mA} \quad (3.1)$$

O que corresponderá à potência dissipada no elemento aquecedor de:

$$P = R \cdot I^2 = 14,7 \cdot (0,0816)^2 = 0,098 \text{ W} = 98 \text{ mW} \quad (3.2)$$

Quer o circuito de conversão analógico-digital, quer a fonte de corrente foram desenhados na mesma placa de circuito impresso (PCB) com o formato de Shield de Arduino, como ilustra a figura 3.4.

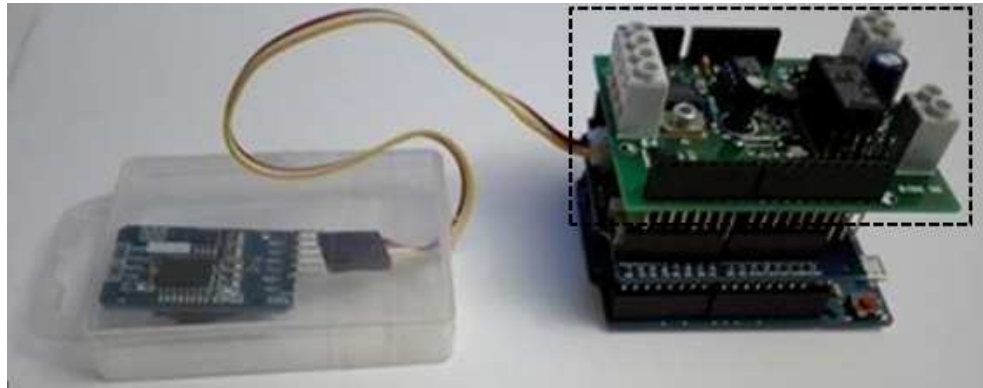


Figura 3.4 – Shield contendo o conversor A/D e a fonte de corrente.

3.1.2 Módulo de processamento

A plataforma de hardware e software aberto que o Arduino providencia tem, sem dúvida, potenciado e acelerado o desenvolvimento de soluções de instrumentação e aquisição de dados nas mais variadas aplicações. O protótipo desenvolvido baseia-se num Arduino modelo UNO que controla todo o processo de aquisição de dados e a fonte de corrente.

A figura 3.5 ilustra o Arduino utilizado com o Shield desenvolvido encaixado. A interface com o circuito integrado MAX31855 é realizada através de um barramento

série SPI. A fonte de corrente é controlada através do pino A3 do Arduino, configurado para funcionar como saída digital.

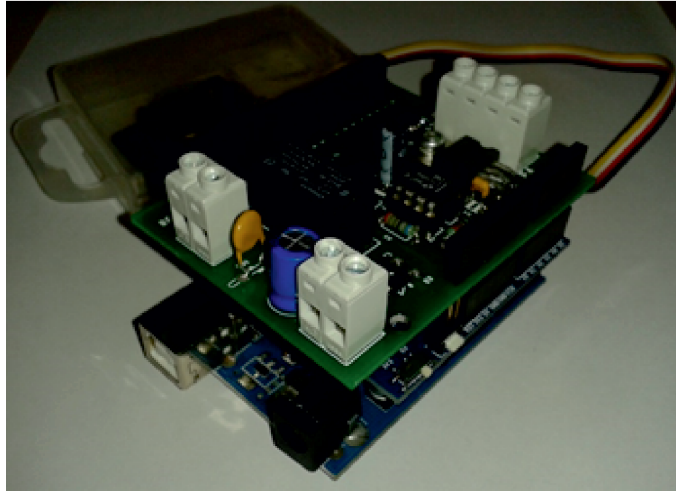


Figura 3.5 – Shield encaixado no Arduino UNO.

3.1.3 Relógio em tempo real

De modo a existir uma base de tempos de referência para determinar os momentos de aquisição torna-se necessário um relógio. Para este fim utilizou-se um relógio em tempo real (RTC – *Real Time Clock*) DS3231 (Maxim Integrated, USA), ilustrado na figura 3.6.

Nesta aplicação específica, o RTC tem duas funções. A primeira é a de fornecer informação horária (ano, mês, dia, horas, minutos e segundos) a que as amostras são obtidas. A segunda é a de permitir controlar a frequência com que as amostras são obtidas sendo isto alcançado através da função de alarme disponibilizada. O alarme foi configurado para disparar a cada minuto sendo este o período de amostragem, ou seja, uma amostra por minuto. A comunicação com este integrado é feita através do barramento I²C.

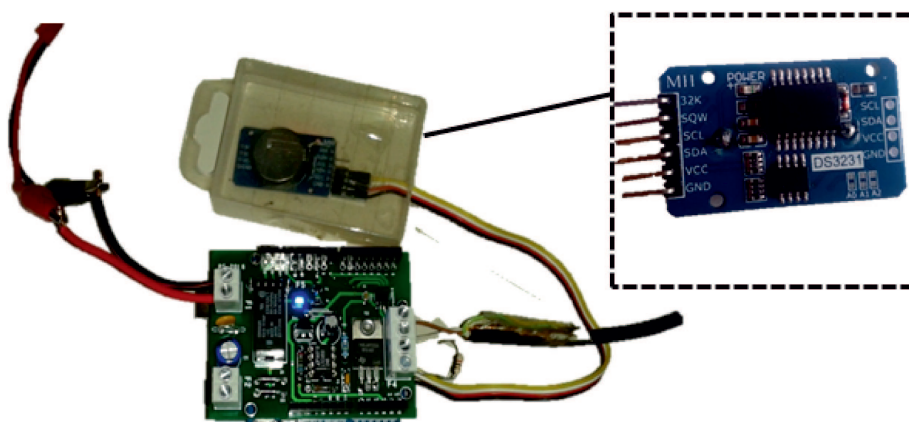


Figura 3.6 – Relógio em tempo real DS3231.

3.1.4 Armazenamento de amostras

Dada a natureza experimental do trabalho numa duração limitada, o envio de dados através de uma ligação de dados sem fios revelou-se secundária neste primeiro protótipo, pelo que se optou por incorporar um módulo de cartões SD para se proceder ao registo das amostras recolhidas. O dispositivo usado foi um SD Card Shield 3.0, ilustrado na figura 3.7.

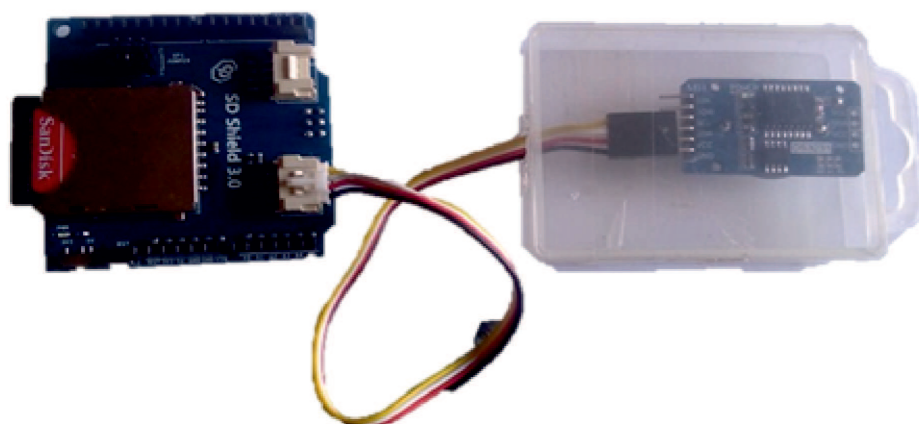


Figura 3.7 – Shield de cartão SD para ligação ao Arduino.

Este shield utiliza uma interface SPI para comunicar com o Arduino, permitindo

o envio de dados para que estes possam ser armazenados no cartão num formato pré-definido, neste caso em formato CSV (*Comma Separated Values*). Assim, os dados são guardados para posterior análise tornando-se somente necessário retirar o cartão e passá-los para o computador de forma a poderem ser visualizados. Um exemplo de dados guardados está ilustrado na listagem [3.1](#).

Listing 3.1: Formato do ficheiro CSV utilizado para gravar os dados.

Date	HS	Diff	t_MAX31855	t_RTC
15/06/2016 17:39	0	0,078	17,813	16,75
15/06/2016 17:40	0	0,063	17,938	16,75
15/06/2016 17:41	0	0,016	18,000	16,75
15/06/2016 17:42	0	0,078	18,063	16,75
15/06/2016 17:43	0	0,156	18,125	16,75
15/06/2016 17:44	0	0,078	18,188	16,75
15/06/2016 17:45	0	0,063	18,313	17,00
15/06/2016 17:46	0	0,156	18,375	17,00
15/06/2016 17:47	0	0,031	18,438	17,00
15/06/2016 17:48	0	0,063	18,563	17,00
15/06/2016 17:49	0	0,156	18,625	17,00
15/06/2016 17:50	0	0,094	18,750	17,00
15/06/2016 17:51	1	4,594	19,188	17,25
15/06/2016 17:52	1	4,969	20,063	17,25
15/06/2016 17:53	1	5,469	21,000	17,25
15/06/2016 17:54	1	5,609	21,938	17,25
15/06/2016 17:55	1	5,750	22,813	17,50
15/06/2016 17:56	1	5,813	23,438	17,50
15/06/2016 17:57	1	5,047	24,188	17,50
15/06/2016 17:58	1	5,766	24,750	17,50
15/06/2016 17:59	1	6,484	25,250	17,50

No ficheiro CSV, o campo HS representa o estado do aquecedor (0: desligado, 1: ligado), o campo Diff representa a diferença entre a temperatura medida (campo t_MAX31855) e a temperatura de referência interna. O campo t_RTC reflete o valor da temperatura no circuito integrado do relógio em tempo real, podendo servir como base de comparação.

3.1.5 Alimentação elétrica

A alimentação eléctrica de sistemas que operam em ambientes hostis, como é o caso do campo agrícola aberto, é algo que deve ser ponderado e equacionado apropriadamente. Além das dificuldades naturais em ter disponível uma fonte de energia sem interrupções, as exigências energéticas do elemento aquecedor levam a dificuldades

acrescidas. Para o protótipo experimental utilizou-se um sistema a energia solar com um carregador e uma bateria de automóvel 12 V/60 Ah embora, numa primeira fase só se utilizasse a bateria, previamente carregada, dada a duração limitada deste trabalho e a indisponibilidade de um painel solar e carregador. Como o fundamental era prover o protótipo de uma fonte de alimentação, esta foi julgada a melhor opção para o curto-prazo. Contudo, a recolha de dados durante um período prolongado de tempo foi realizada já com o sistema de alimentação da bateria a energia solar implementado.

3.1.6 Funcionamento do protótipo

Nesta secção descreve-se o algoritmo descrito para controlo de todos os subsistemas e armazenamento das amostras recolhidas. O fluxograma da figura 3.8 descreve os passos básicos seguidos pelo programa residente no Arduino.

Na sua essência, o programa é responsável por ligar o elemento aquecedor da sonda de Granier a cada 15 minutos (15 minutos ligado/15 minutos desligado). No final de cada período de 1 minuto, o programa faz uma aquisição de dados e guarda-os no cartão SD instalado. Os dados de temperatura obtidos são valores da diferença de temperatura resultantes da determinação a cada minuto de 6 leituras de temperatura pela sonda destas, é determinado o valor máximo e mínimo os quais, são eliminados e posteriormente é efetuada a média desses 4 valores. À temperatura de referência é retirado o valor obtido da média de temperaturas e assim obtém-se o valor diferencial medido pelo sensor a cada minuto de amostragem, seja este de aquecimento ou de arrefecimento.

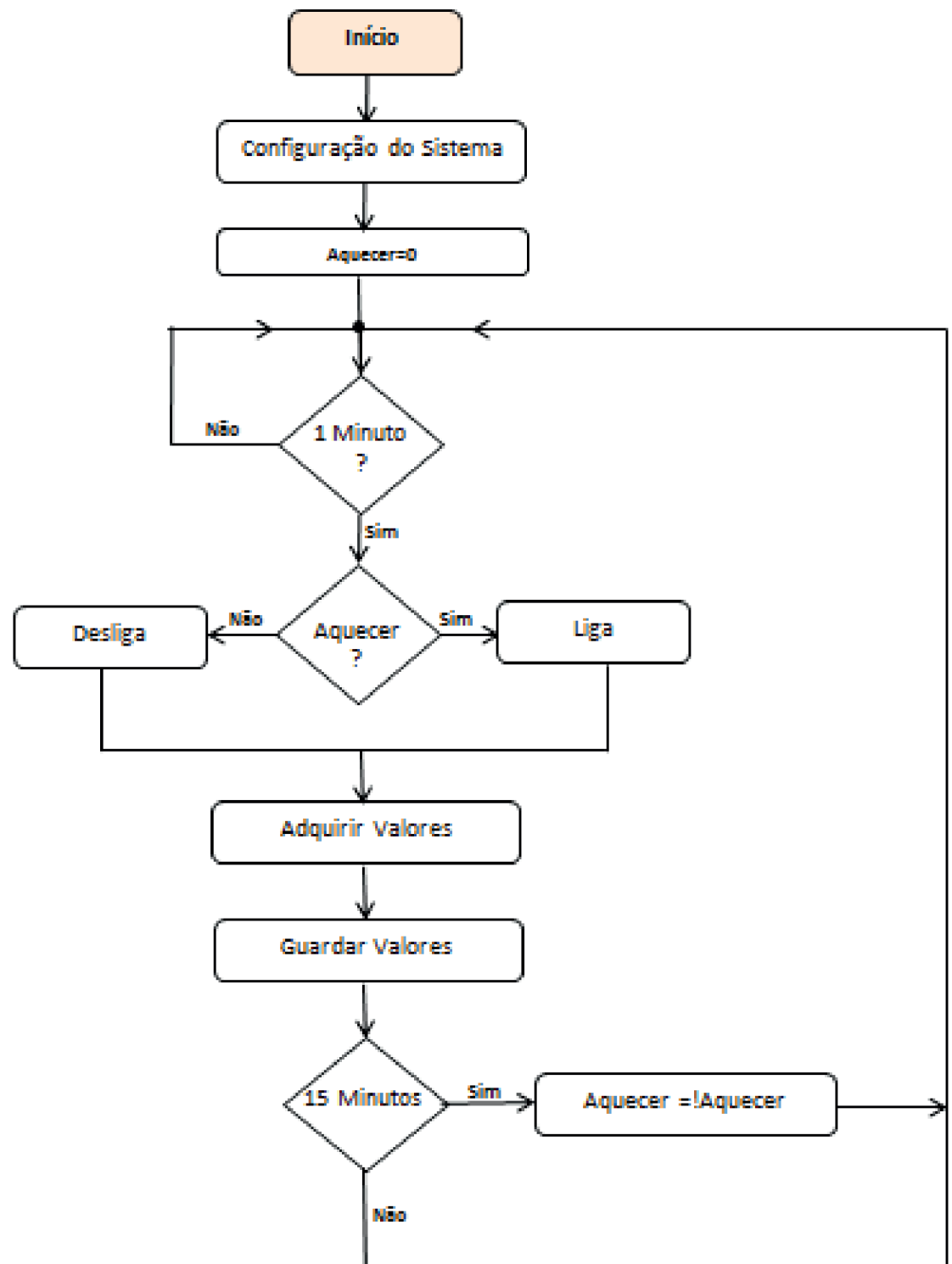


Figura 3.8 – Fluxograma representativo do funcionamento macro do protótipo.

3.2 Ensaios no terreno

Após a construção do sistema de monitorização e alimentação anteriormente descrito, seguiu-se o teste e respetiva validação no terreno. A videira foi selecionada de acordo com as condições necessárias à implementação do sensor ou seja, um local desprovido de grandes movimentações de pessoas, animais e máquinas agrícolas para não comprometer o seu pleno funcionamento. Assim, foi selecionada uma videira da casta branca, “Viosinho”, situada nos Campus da UTAD, figura 3.9.



Figura 3.9 – Fotografia da videira de casta Viosinho

O processo de colocação da sonda de Granier é descrito da seguinte forma: parte da casca superficial do tronco da videira foi removida e medido o perímetro do tronco (perímetro = 15,4 cm) através do qual se obteve um diâmetro de 4,9 cm. No tronco, foram escolhidos dois pontos distanciados entre si numa linha recta e vertical de 10 cm. Assim, com um berbequim elétrico e uma broca muito fina, foram realizados dois furos na árvore onde foram colocadas as duas sondas, sendo que na parte superior ficou a agulha de aquecimento e na parte inferior a agulha sem aquecimento. Antes da sua colocação, as agulhas foram embebidas numa massa condutora de calor para facilitar a sua colocação e fornecer um bom contacto térmico,

como ilustra a figura 3.10.

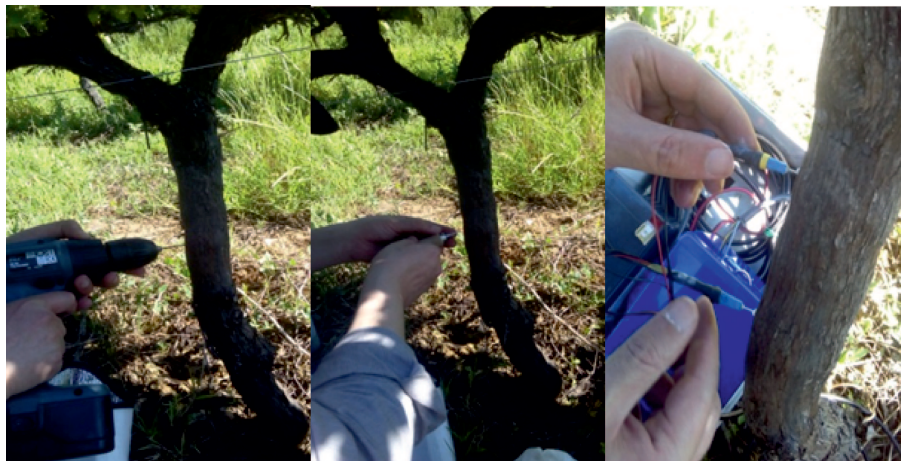


Figura 3.10 – Inserção da sonda Granier na videira.

Após a colocação da sonda de Granier, o tronco foi revestido com uma esponja e papel refractário para isolá-lo das condições metereológicas. Com o intuito de facilitar o processo contínuo de aquisição de dados e de verificação do sistema, toda a eletrónica do sistema foi inserida numa caixa de ferramentas com cadeado o que permitiu maior segurança, protegendo-se o sistema de condições de temperatura adversas, de insectos ou de outros factores que pudessem comprometer o seu funcionamento, como ilustra a figura 3.11.



Figura 3.11 – Montagem do sistema de aquisição de dados.

O sensor foi ligado e começou a armazenar dados no cartão de memória durante um período de dois dias para testar o seu funcionamento, dado que este estava alimentado por uma bateria de 12 V e o tempo de duração da carga da bateria era curto.

Por esta razão foi instalado um painel solar, que permitiu o carregamento contínuo e duradouro da bateria onde os dados foram registados durante o mês de julho/agosto. O sistema de alimentação permitiu a recolha de dados por um período mais extenso e sob diversas temperaturas ambientais. A figura 3.12 ilustra o painel solar montado no terreno numa posição escolhida de forma a não atrapalhar os trabalhos na vinha, como por exemplo a passagem de tratores. A orientação do painel solar também é importante uma vez que nele deve incidir radiação solar por um período de tempo suficiente para carregar a bateria.



Figura 3.12 – Montagem do painel solar.

Com o crescimento das folhas da videira o painel solar deixou de coletar energia suficiente para carregar a bateria de forma eficiente/suficiente. Para corrigir o problema

o painel solar teve que ser montado num dos postes de suporte às vinhas como pode ser visto na figura 3.13. Esta solução não foi utilizada inicialmente porque se tentou reduzir ao máximo o impacto do sistema na vinha, como seja a passagem de cabos.



Figura 3.13 – Ajuste da montagem do painel solar.

3.3 Discussão

Após testes laboratoriais do modo de funcionamento do sistema de medida, a parte da validação do terreno, inicialmente mostrou valores muito elevados pelo que foi comprovado que o sistema não estava a fazer a diferença das temperaturas mas sim a dar temperaturas absolutas pelo que, este problema foi contornado pela verificação do código transferido para o Arduino e a alteração da equação que determinava a diferença de temperaturas.

Os dados guardados no cartão SD mostram os valores de diferenças de temperatura, do MAX31855 e do RTC sendo que, nos primeiros ensaios foram obtidos valores muito elevados. Os elementos do circuito estavam sujeitos a temperaturas ambientais elevadas pelo que, tiveram que ser isolados. Assim, foi utilizada uma caixa onde o sistema ficou protegido de animais e de condições atmosféricas mais adversas.

Dado o elemento aquecedor exigir um consumo energético elevado pois, a bateria usada não durava mais do que um dia, foi instalado um painel solar para carregar a bateria do sistema possibilitando a recolha de dados por um período mais extenso.

Nesta fase foi necessário perceber qual a posição e orientação mais adequadas para não interferir com os trabalhos na vinha e para poder recolher energia suficiente para carregar a bateria devidamente.

4

Resultados experimentais

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos após os ensaios efetuados no terreno, assim como a sua discussão.

4.1 Resultados

A implementação do sistema protótipo na videira decorreu em períodos dos meses de junho, julho e agosto. Os dados foram recolhidos de minuto a minuto, alternando-se períodos de 15 minutos de aquecimento e arrefecimento. A última fase de testes consistiu em regar a planta, e deixar o sensor a recolher dados por um período de 15 dias, com o intuito de analisar o seu comportamento.

Os dados foram guardados no cartão de memória, em formato CSV, para poderem ser abertos num programa de folha de cálculo, como por exemplo o Excel TM (Microsoft, EUA). Estes apresentam a data e a hora a que o sensor efetua a leitura, o estado do aquecedor — desligado (0) ou ligado (1) —, a diferença de temperatura (ΔT) lida pelo sensor, a temperatura do termopar e a temperatura interna do sistema. Assim, conseguem-se avaliar as condições de temperatura a que o sensor está sujeito.

A metodologia escolhida para tratamento de dados foi implementada para os diferentes dias dos meses porém, somente se apresentam os valores de 20 de julho tratados no programa Origin Pro[®] 2016 (OriginPro Version 9.0) pois, o padrão apresentado graficamente em termos absolutos não diferia de dia para dia ou seja, o comportamento era similar para os diferentes dias analisados. O procedimento inicial consistiu em retirar as 3 primeiras e as 3 últimas diferenças de temperatura registradas em cada 15 minutos. Os dados foram separados de acordo com o estado do aquecedor.

Visto as medições serem efetuadas a cada 15 minutos no estado arrefecido e aquecido alternadamente, o tempo foi convertido numa escala de 0 a 24 e dividido por 60, de forma a escala ser em minutos. Uma vez divididos os dados dos dois estados do sensor, foram obtidas as figuras que descrevem a variação da temperatura ao longo do dia no período de arrefecimento e aquecimento, figura 4.1 a) e b).

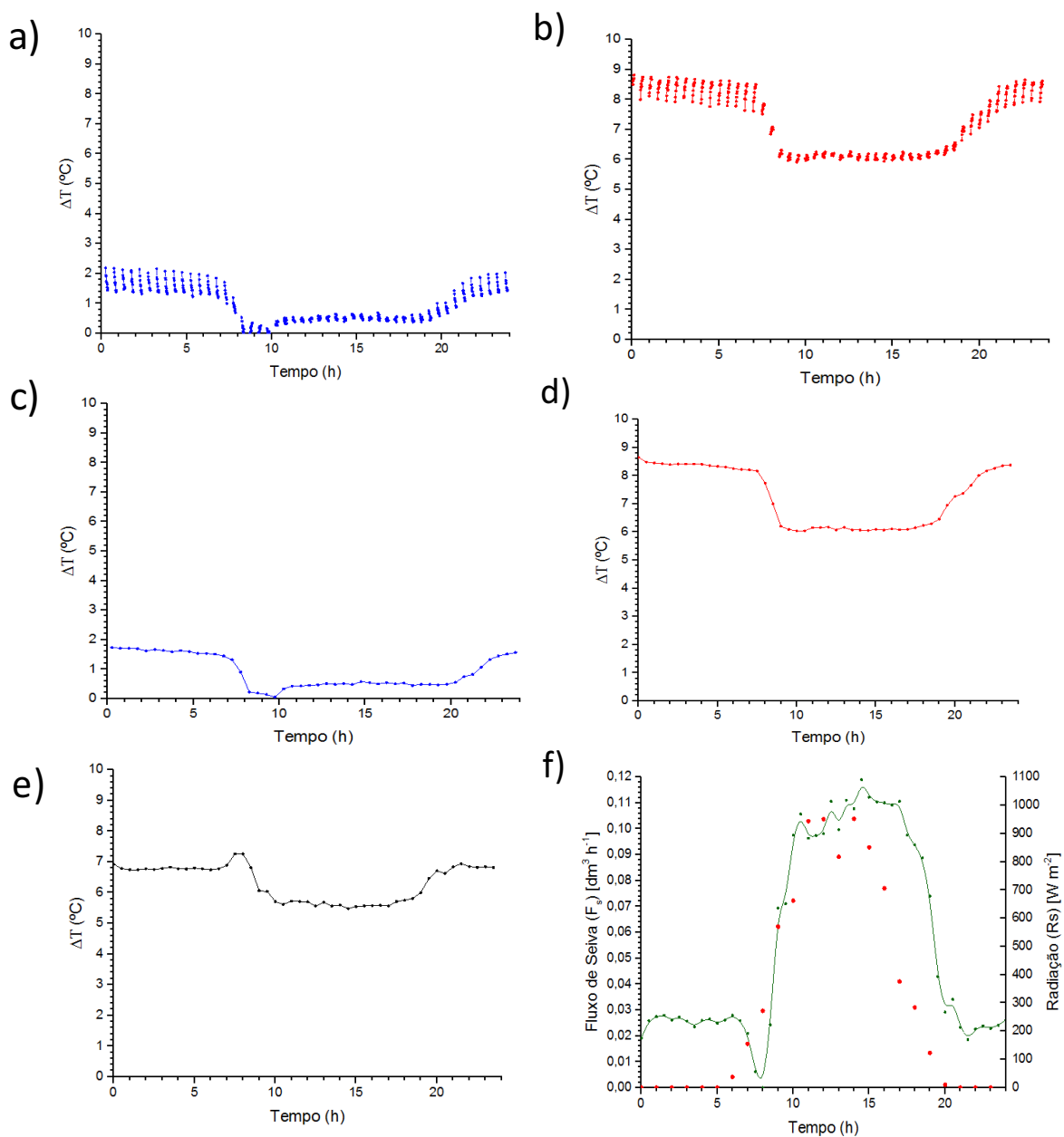


Figura 4.1 – a) Valores de ΔT obtidos pelo sensor durante o período de arrefecimento, b) Valores de ΔT obtidos pelo sensor durante o período de aquecimento, c) Média dos conjuntos de valores de ΔT a cada 30 minutos durante o arrefecimento, d) Média dos conjuntos de valores de ΔT a cada 30 minutos durante o aquecimento, e) Diferença dos conjuntos de valores de ΔT aquecido e arrefecido, f) Fluxo de seiva (F_s) e radiação solar (R_s). Dados obtidos a 18 de julho de 2016.

De seguida, efetuou-se a média de cada conjunto de valores registados a cada 15 minutos tendo-se assim obtido um valor de ΔT para cada 30 minutos aquecido e arrefecido, respectivamente, figura 4.1 c) e d).

A correção foi efetuada através da subtração dos períodos de aquecimento aos períodos de arrefecimento, figura 4.1 e).

Com os valores obtidos pela diferença de ΔT aquecido e arrefecido, respectivamente foi possível obter os valores de SF através das equações (2.12), (2.14) e (2.15), apresentadas no capítulo 2.

Em primeiro lugar, foi obtido o máximo das diferenças de ΔT (gradientes de temperatura) de três dias consecutivos, nas diferentes condições. Posteriormente esse valor é utilizado para o cálculo do SF da planta ao longo do dia. A radiação solar ao longo do dia permite uma maior percepção do comportamento da planta. Assim, foi obtida a figura 4.1 f) que mostra a variação do SF da planta e a evolução da radiação solar ao longo do dia.

As taxas de SF atingiram mínimos de cerca de $0,03 \text{ dm}^3\text{h}^{-1}$ no início da noite (00h00) que se manteve praticamente inalterado até ao início da manhã (07h00) quando começaram a elevar-se para valores até atingirem um máximo aproximadamente de $0,11 \text{ dm}^3\text{h}^{-1}$ às 10h00. O SF máximo de $0,12 \text{ dm}^3\text{h}^{-1}$ ocorre por volta das 14h30.

Neste mesmo dia, a intensidade de radiação solar exibiu uma forma de sino com um valor de pico de quase 1000 Wm^{-2} próximo das 14h00, meia hora antes de o SF ser máximo.

4.2 Discussão

Os resultados obtidos graficamente depois da implementação do protótipo do sensor de medição do FS, após o respetivo tratamento, evidenciam o comportamento da videira ao longo do dia. A atividade fisiológica da videira é avaliada por um período de um dia, apesar de terem sido recolhidos e analisados um maior número de dados

ao longo de vários dias, sendo recolhidos dados de minuto a minuto alternando-se com períodos de 15 minutos de arrefecimento e aquecimento. Esta análise revelou um comportamento sem alterações evidentes na curva exibida daí somente um gráfico de um único dia ser exibido e sujeito a análise.

Após o tratamento adequado dos dados e pela determinação dos valores de SF ao longo de um dia, a curva exibida mostra um comportamento em forma de sino onde se nota a evolução ao longo do dia em que a videira durante a noite apresenta valores de SF inferiores aos valores diurnos que são mais elevados.

O comportamento da curva de SF acompanha o comportamento da curva dos valores de radiação para esse mesmo dia onde, são inferiores durante a noite (valores nulos uma vez que em períodos noturnos não existe radiação). Aquando do nascer do dia, os valores de radiação começam a aumentar até atingir o máximo por volta das 14h00. O SF é máximo meia hora após o valor de radiação ser máximo (14h30). A partir desta hora, o fluxo tende a diminuir com o decorrer do tempo atingindo valores próximos de $0,01 \text{ dm}^3\text{h}^{-1}$ no final da noite, onde os valores de radiação são nulos.

Com o intuito de entender a validação do sensor no terreno e a respetiva análise de dados foi necessário uma comparação com estudos já realizados. Um conjunto de dados, retirados de Malheiro et al. (2011), foram utilizados e sujeitos ao mesmo tratamento usado na análise anteriormente dos dados recolhidos pelo sensor construído. Estes foram recolhidos no mês de Agosto de 2008, numa região característica do Douro, Granja (Alijó), numa casta designada Moscatel-Galego-Branco. A metodologia utilizada na recolha de dados baseou-se na introdução, de igual modo, de sensores Granier em duas videiras com a agulha aquecedora localizada superiormente e a agulha não-aquecida inferiormente. O sistema foi devidamente alimentado por uma bateria e a recolha de dados efetuada por um `data logger` Campbell Scientific CR10X (Campbell Scientific). Os dados foram registados em cada videira por um período de 20 em 20 minutos. Contudo, uma das videiras estava sujeita somente a períodos de aquecimento enquanto que a outra, a períodos de arrefecimento (agulha aquecedora desligada). A recolha de dados foi efetuada por vários dias do mês de

Agosto sob as mesmas estratégias de registo de dados. Somente um dia deste mês foi tido em conta para a análise comparativa onde, os resultados são evidenciados na 4.2

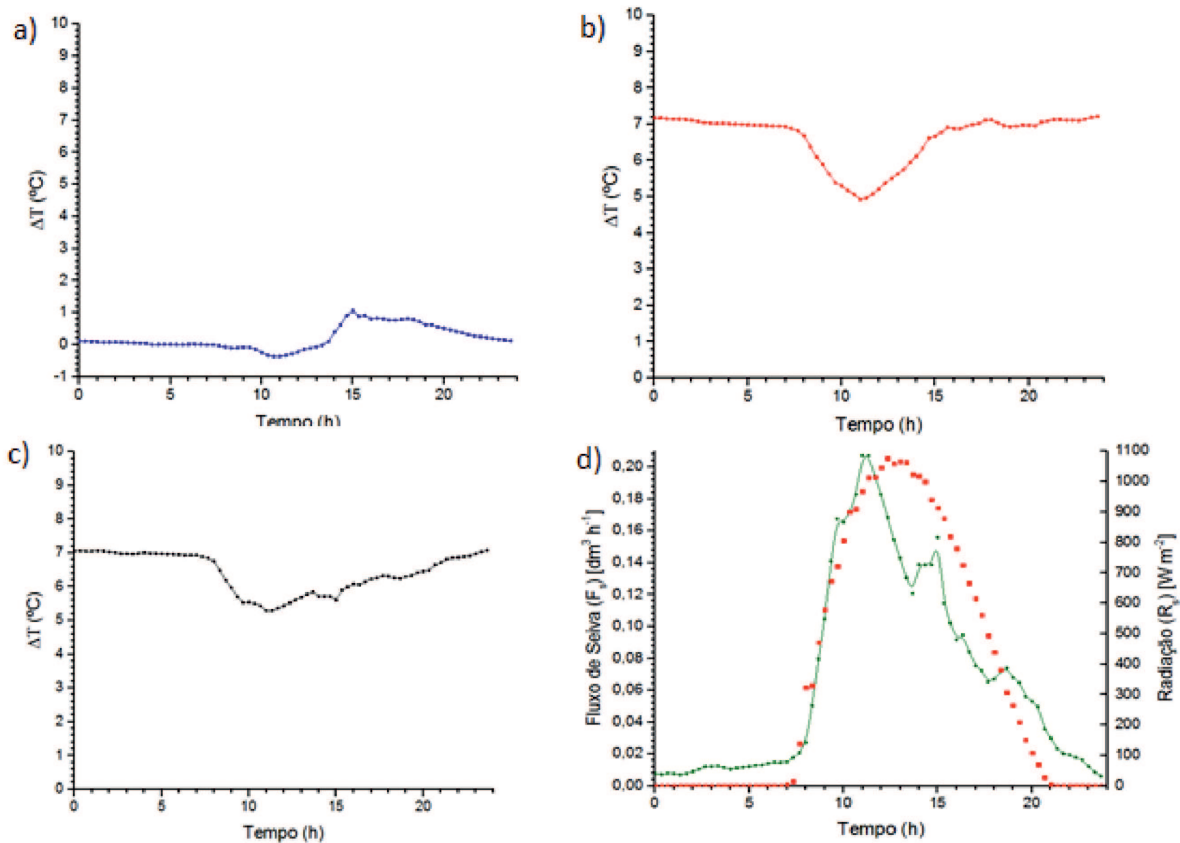


Figura 4.2 – a) Valores de ΔT obtidos pelo sensor a cada 20 minutos durante o período de arrefecimento na videira 1, b) Valores de ΔT obtidos pelo sensor a cada 20 minutos durante o período de aquecimento na videira 2, c) Diferença dos conjuntos de valores de ΔT aquecido e arrefecido, d) Fluxo de seiva (F_s) e radiação solar (R_s). Dados obtidos em 9 de agosto de 2008.

Em primeiro lugar, obtiveram-se as figuras de aquecimento e arrefecimento obtidos pela medição de SF nas videiras em separado. Posteriormente, obteve-se a correção efetuada pela subtração dos períodos de aquecimento aos períodos de arrefecimento. Estes dados corretivos foram utilizados para a determinação dos valores de SF ao longo do dia através da aplicação das equações (2.12), (2.14) e (2.15), apresentadas no capítulo 2. Nestas ainda são considerados os valores de $\Delta T_{\max}$ de 3 dias

consecutivos assim como o valor do diâmetro do tronco das videiras.

Nestes dois estudos conseguiu-se uma análise relativa e não absoluta ou seja, analisou-se o aspecto da curva no gráfico e não, a nível de valores de SF pois, diferentes condições influenciam o comportamento da transpiração da planta (e.g. teor e água do solo, condições meteorológicas, área foliar total). As figuras resultantes do cálculo do SF apresentam, em ambos os casos, uma forma de sino. A variação da radiação solar ao longo do dia também acompanha a variação do SF para ambos os casos. O SF estimado pelas sondas de dissipação térmica segue um padrão semelhante ao da radiação solar, em escala horária. A análise gráfica dos dados da videira nos diferentes ensaios, permitiu perceber que o SF apresenta valores aproximadamente nulos durante períodos noturnos. Nos períodos diurnos estes valores são superiores, visto serem os períodos de maior radiação solar o que leva a que a planta apresente maiores valores de SF.

Outra situação foi tida em conta neste estudo, nos últimos 15 dias de testes verificados no sensor construído, a planta foi regada com 10 L de água de forma a verificar qual a alteração nos dados recolhidos, caso esta exista. O gráfico resultante é ilustrado na figura [4.3](#).

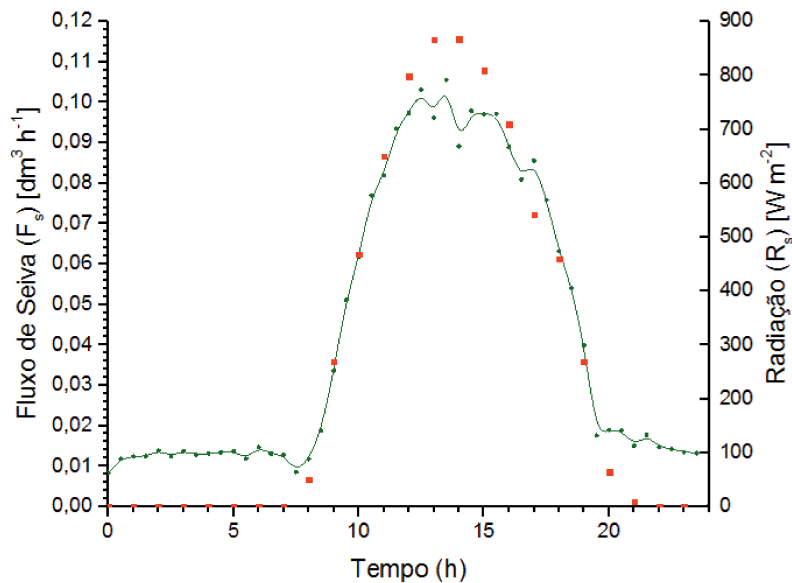


Figura 4.3 – Fluxo de Seiva (F_s) e Radiação Solar (R_s) após aplicação de água na videira. Dados obtidos a 3 de agosto de 2016.

Constatou-se que, a adição de água na videira não causou alterações evidentes no comportamento da planta, um fator indicativo que, o teor de água do solo, não constituiu um fator limitante à planta.

5

Conclusão e trabalho futuro

Durante o Verão de 2016, foram estudadas as variações de SF de uma videira da casta branca Viosinho.

A implementação de um sensor para a medição dos valores de SF na videira, com o intuito de avaliar o seu comportamento fisiológico, utilizando o método de Granier, provou a sua utilidade no processo de aquisição de dados sobre o SF durante períodos prolongados, dados estes que serviram de base à concepção e utilização de métodos de estimativa da transpiração da planta.

Os valores foram recolhidos de minuto a minuto, alternando-se períodos de 15 minutos de aquecimento e arrefecimento. O comportamento da planta foi objeto de estudo na implementação do sensor. Para diferentes regimes diários, a planta reagiu de acordo com a sua necessidade e condições pedoclimáticas, transpirando em regime diurno (efeito determinante da radiação solar sobre os estomas da planta). Os resultados baseados no método de Granier mostram valores de SF coerentes com os obtidos por outros autores. Os valores de SF da planta não foram afetados com a adição de água, pois o padrão da curva manteve-se praticamente inalterado. A utilização do sensor implementado demonstra valores satisfatórios e coerentes uma vez que os dados obtidos são dados que figuram o comportamento da planta nas

condições a que foi sujeita. Assim, o modelo matemático obtido da calibração do HD para a videira é satisfatório para a obtenção dos valores do SF e, consequentemente, para estimativa da transpiração da planta.

O método de Granier é um método de fácil utilização, baixo custo e capacidade de automatização o que se tornou uma ferramenta imprescindível para a estimativa do SF.

O presente estudo é relativo a solos na região do Douro, no Campus da UTAD. Embora os dados obtidos tenham respondido a algumas questões relacionadas com a resposta das videiras ao uso da água, existem, no entanto, outras áreas que devem ser aprofundadas.

Além disso, a alteração de uma cultura para outras áreas em que as condições meteorológicas e de campo são diferentes, cria um novo cenário e, os mecanismos e avaliações resultantes de uma região não pode ser transportada de igual forma para outro tipo de meio.

A utilização de água pelas videiras permite algumas considerações importantes para aprofundar o conhecimento sobre as suas características onde o estudo da água é importante para avaliar as diferentes respostas destas à rega. Numa resposta mais aprofundada, seriam necessárias medições de SF precisas e individuais a longo prazo para diferentes tipos de culturas de modo a avaliar as suas consequências a nível da fisiologia da planta e a nível do estudo das culturas.

O estudo do tipo de videira em si, o ambiente onde está inserida e complexidade do solo é importante também no estudo do mecanismo que esta utiliza para obter água e nutrientes. Medições importantes conjuntamente com as de SF como por exemplo, o potencial hídrico foliar e o teor de água do solo, seriam úteis para avaliar o comportamento da planta e fornecer dados complementares no estudo da sua resposta.

Um mecanismo inovador para a aquisição e tratamento deste tipo de dados de forma mais eficiente seria implementar um sistema de aquisição de dados remotamente que

permitisse o envio de dados para um dispositivo em tempo real de modo a serem devidamente tratados e avaliados.

Referências bibliográficas

Agroads. Medidor de fluxo de seiva ICT-SFM1. [44](#)

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M. (2006). Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). [12](#), [13](#), [14](#)

Altozano, P., Pavel, E., Oncis, J., Doltra, J., Cohen, M., Paço, T., Massai, R., and Castel, J. (2008). Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees. [18](#), [25](#)

Altozano, P., Ruiz Sin, B., and Castel, J. R. (1998). Sap flow determination in citrus trees by heat pulse techniques. *Journal of Experimental Botany*, 32(1):221–239. [22](#)

Andrade, R. S. (2010). Rega por Superfície: Sulco e inundação. [37](#)

Arduino (2017). Arduino uno. Sítio da Internet. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. [52](#)

Baker, J. M. and Van Bavel, C. H. M. (1987). Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant, Cell e Environment*, 10(9):777–782. [23](#)

- Balastreire, L., Elias, I. A., and Amaral, J. (1998). Agricultura de Precisão: Mapeamento da Produtividade da Cultura do Milho. 6
- Bleby, T. M., Burgess, S. S. O., and Adams, M. A. (2004). A validation comparison and error analysis of two heat pulse methods for measuring sap flow in eucalyptus marginata seedlings. pages 645–658. 20
- Burgess, S. S. O., Adams, M., N.C., T., Beverly, C., Ong, C. K., H., K. A. A., and M., B. T. (2001). An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21:589–598. 20, 21
- Campbell Scientific. Cr10x datalogger for measurement and control. 69
- Carrilho, L. (2012). Alimentação das plantas. Sítio da Internet. <http://www.obichinhodosaber.com/2012/03/17/ciencias-da-natureza-6o-como-se-alimentam-as-plantas/>. 12
- Caspari, H., Green, S., and Edwards, W. (1993). Transpiration of well-watered and water-stressed asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse, and estimated by a penman-monteith model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67(1):13 – 27. 19
- Cermák, J., Kucera, J., and Nadezhdina, N. (2004). Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within and scaling up from sample trees to entire forest stands. 18(5):529–546. 18
- Clearwater, M. J., Meinzer F. C., Andrade, J. L., Goldstein, G., and Holbrook, N. M. (1999). Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, pages 681–687. 25
- Cohen, Y. (1994). *Thermoelectric Methods for Measurement of Sap Flow in Plants*, pages 63–89. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 19
- Cohen, Y., Fuchs, M., and Green, G. C. (1981). Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell & Environment*, 4(5):391–397. 19, 20, 21

- Cohen, Y., Kelliher, F. M., and Black, T. A. (1985). Determination of sap flow in douglas-fir trees using the heat pulse technique. *Canadian Journal of Forest Research*, 15(2):422–428. [19](#)
- Cohen M., Goldhamer, D., Fereres, E., Girona, J., and Mata, M. (2001). Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits with continuous monitoring of trunk diameter changes. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 76(1):55–60. [22](#)
- Dauzat, J., B., R., and Berger, A. (2001). Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: model description and application to a coffee plantation in costa rica. *Agricultural and Forest Meteorology*, pages 143–160. [26](#)
- Davis, T. W., Kuo, C.-M., Liang, X., and Yu, P.-S. (2012). Sap flow sensors: Construction, quality control and comparison. *Sensors*, 12(1):954–971. [46](#)
- Dayau, S. (1993). Realisation des capteurs pour la mesure du débit de sève dans des arbres (méthode du bilan de chaleur). pages 3 – 24. [28](#)
- DO, F. and Rocheteau, A. (2002). Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. [25](#), [26](#)
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. (1977). *Crop water requirements.*, pages 1–15. Springer Berlin Heidelberg, Rome. [13](#)
- Dragoni, D., Lakso, A., and Piccioni, R. (2005). Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas exchange chambers. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam. 130:85–94. [27](#)
- Dynamax (2017). Dynagage sap flow sensors. Sítio da Internet. <http://www.dynamax.com/products/transpiration-sap-flow/dynagage-sap-flow-sensor>. [39](#), [40](#), [41](#)

- Dynamax, I. (2017). New exo-skin sap flow sensor. Sitio da Internet. <http://www.dynamax.com/products/transpiration-sap-flow/exo-skin-sap-flow-sensor>. 39, 42
- Čermák, J., Deml, M., and Penka, M. (1973). A new method of sap flow rate determination in trees. 15:171–178. 22
- Čermák, J., Kučera, J., and Penka, M. (1976). Improvement of the method of sap flow rate determination in adult trees based on heat balance with direct electric heating of xylem. *Biol Plant*, 18:105–110. 22
- Fernández, E., Čermák, J., Cohen, Y., Ferreira I., Nadezhdina N., Testi, L., and Steppe K. (2013). Methods to Estimate Sap Flow. 20
- Fernández, J., Palomo, M., Díaz Espejo, A., Clothier, B., Green S.R, 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. 21
- Ferreira, M. I. and Zitscher, H. (1996). Measurements performed with granier method in short trunks near the soil. 25
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2014). Statistical Yearbook, world food and agriculture, parte 1. Sítio da Internet. <http://www.fao.org/docrep/015/i2490e/i2490e00.htm>. 7
- Granier, A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. pages 193–200. 24, 25, 42, 45
- Granier, A. (1987). Mesure du flux de sève brute dans le tronc du douglas par une nouvelle méthode thermique. 44:1–14. 25, 33, 46
- Granier, A., Bobay, V., Gelpe, J., Saugier, B., and Shuttleworth, W. J. (1990). Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of maritime pine (*pinus pinaster* ait.). 51:309–319. 33

- Granier, A., Brion, P., Bréda, N., Pontailier, J. Y., and Saugier, B. (1996). Transpiration of trees and forest stands: short and longterm monitoring using sapflow methods. pages 265–274. [20](#)
- Granier, A. and Loustau, D. (1994). Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. *Agricultural and Forest Meteorology*, pages 61–81. [25](#)
- Granier A. and Cermák, J. (1998). Sap flow measurements in forest stands-methods and uncertainties. pages 13–27. [20](#)
- Green, S. B., Clothier, B., and Jardine, B. (2003). Theory and practical application of heat pulse to measure sap flow. *Agron. J.*, pages 1371–1379. [19](#), [21](#)
- Green, S. R. and Clothier, B. E. (1988). Water use of kiwifruit vines and apples trees by the heat-pulse technique. *Plant Physiol*, pages 115–123. [20](#)
- Grime, V. L., Morison, J. I., and Simmonds, L. P. (1995). Sap flow measurements from stem heat balances: a comparison of constant with variable power methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74(1):27 – 40. [22](#)
- Heidi, J. R. and S., K. V. R. (2012). Comparison of tissue heat balance- and thermal dissipation-derived sap flow measurements in ring-porous oaks and a pine. *Front Plant Sci. 2012*, page 103. [36](#)
- Heilman, J. and Ham, M. (1990). Measurement of mass flow rate of sap in ligustrum japonicum. *HortScience*, 25(4):465–467. [23](#)
- Huber, B. (1932). Beobachtung und messung pflanzlicher safstrome. 50:89–109. [18](#)
- Instituto da Água (2012). Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água. [2](#), [3](#)
- Instituto Nacional de Estatística, I. (2011). O uso de água na agricultura 2011. [2](#)
- Kenneth, A., Shackel, R., Johnson, S., Charles, K., and Claude, J. P. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. [23](#)

- Kjelgaard, J., Stockle, C., Black, R., and Campbell, G. (1997). Measuring sap flow with the heat balance approach using constant and variable heat inputs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85(3):239 – 250. 22
- Kučera, J., Čermák, J., and Penka, M. (1977). Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. 19:413–420. 22
- Larry E. W. (November/December 2001). Irrigation of winegrapes in California. Sítio da Internet. <https://www.practicalwinery.com/novdec01p42.htm>. 8
- Lowenberg DeBoer, J. (2015). The Precision Agriculture Revolution. 4, 5
- Lu, P. (1997). A direct method for estimating the average sap flux density using a modified granier measuring system. *Plant Physiol*, pages 701–705. 26
- Lundblad, M., Lagergren, F., and Lindroth, A. (2001). Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sap flow measurements in pine and spruce. pages 625–638. 20
- Magalhães, N. (2008). Tratado de viticultura – A videira, a vinha e o terror. 11
- Malheiro, A. (2005). Microclimate, yield and water-use in the Douro Region, Portugal. Master’s thesis, Institute of Water and Environment. 17, 47
- Malheiro, A., Gonçalves, I., Fernandes-Silva, A., Silvestre, J., Conceição, N., Paço, T., and Ferreira, M. (2011). Relationships between relative transpiration of grapevines and plant and soil water status in portugal’s douro wine region. pages 261–267. 69
- Marshall DC. (1958). Measurements of sap flow in conifers by heat transport. 33:385–396. 18, 27
- Maxim Integrated Products (USA). MAX31855 Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter. Sítio da internet. 51
- Monteith, J. (1965). Evaporation and Environment. 13

- Monteith, J. (1985). Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. [13](#)
- Nascimento, T. and Soares J. M. (2004). Manejo de Água na Cultura da Videira. 185:10. [11](#)
- OriginPro Version 9.0. Originlab corporation. [66](#)
- Paço, M. T. (2003). Modelação da Evapotranspiração em Cobertos Descontínuos: Programação da Rega em Pomar de Pessegueiro. Master's thesis, Universidade Técnica de Lisboa . [2](#), [13](#), [19](#), [22](#)
- Penman, H. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. [13](#)
- Pereira, L., Oweis, T., and Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. 57(3):175–206. [8](#)
- Pires, R. C. d. M., Sakai, E., Arruda, F. B., Fujiwara, M. O., and Calheiros, R. (1999). Métodos e Manejo de Rega. [10](#)
- Postel, S. (2001). Growing more food with less water. pages 33–34. [2](#)
- Remorini, D. and Massai, R. (2003). Comparison of water status indicator for young peach trees. 22:39–46. [24](#)
- Resende, M. and de Albuquerque, P. E. P. (1998). *Métodos e Estratégias de Manejo de Rega*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Roma. [10](#)
- Robert H. Swanson (1994). Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72(1):113 – 132. [19](#)
- Rojas, J. (2003). Avaliação do uso do Fluxo de Seiva e da Variação do Diâmetro do Caule e de ramos na Determinação das Condições Hidricas de Citros, como Base para Manejo de Rega. [25](#), [32](#)

- Russo, J. (2016). Globalization and precision agriculture. Sítio da Internet. <http://www.precisionag.com/systems-management/globalization-and-precision-agriculture/>. 5
- Sakuratani, T. (1981). A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plant. 39:9–17. 23
- Sakuratani, T. (1984). Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method. 40:273–277. 23
- Santana, L. (2010). Sistema de Rega Automatizado. 7
- Schulze, E. D., Čermák, J., Matyssek, M., Penka, M., Zimmermann, R., Vasícek, F., Gries, W., and Kučera, J. (1985). Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of larix and picea trees — a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements. *Oecologia*, 66(4):475–483. 22
- Silva, M. (2008). Desenvolvimento de Sensor de Fluxo de Seiva e de Coeficiente indicador de Estresse Hídrico para Plantas de Cafeeiro Arábica. 21, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 32
- Smith, D. and Allen S.J. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 47(12):1833–1844. 20, 26
- Sonka, S. T., Bauer, M. E., and Cherry, E. T. (1997). Precision Agriculture in the 21st Century Geospatial and Information Technologies in Crop Management. 6
- Steinberg, S., Van Bavel, C. H. M., and McFarland, M. J. (1989). A gauge to measure mass flow rate of sap in stem and trunks of woody plants. pages 466–472. 23
- Swanson, R. H. (1962). An instrument for detecting sap movement in woody plants. *Proceedings of 4th International Workshop*, page 16. 19, 20
- Swanson, R. H. and Whitfield, D. W. A. (1981). A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *Journal of Experimental Botany*, 32(1):221–239. 19, 20

- Swanson R.H. and Whitfield, W. A. (1981). A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *Journal of Experimental Botany*, 32(1):221–239. 22
- Tavares, R. A. F. R. (1993). Medição da transpiração e caracterização do estado hídrico em *Prunus persica*. Master's thesis, Universidade Técnica de Lisboa. 33
- Tecnal (2017). Sensor de fluxo de seiva eck-sf-20. Sítio da Internet. <http://tecna.com.br/pt/produtos/sensor-de-fluxo-de-seiva-eck-sf-20-ecomatik/>. 43
- Tournebize, R. and Boistard, S. (1998). Comparison of two sap flow methods for the estimation of tree transpiration. pages 707–713. 20
- Trejo Chandia, L. and Angelocci, R. Aplicação do método de balanço de calor na determinação da transpiração de mudas de limoeiro. 24
- Tschiedel, M. and Ferreira, M. F. (2002). Introdução à Agricultura de Precisão: Conceitos e Vantagens. *Ciência rural*, 32:159 – 163. 6
- Valancogne, C., Angelocci, L., and Cruiziat, P. (1993). Evaluation of transpiration of apple trees and measurement of daily course of water flow within the main branches of walnut trees. page 219. 23
- Valancogne, C. and Granier, A. (1994). Avaliação do uso do Fluxo de Seiva e da Variação do Diâmetro do Caule e de ramos na Determinação das Condições Hídricas de Citros, como Base para Manejo de Rega. 30
- Valancogne, C. and Granier, A. (1997). Mésures de flux de sève brute. in: *L'eau dans l'espace rural*). pages 153–160. 33
- Valancogne, C. and Nasr, Z. (1989). Une méthode de mesure du débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur. 18, 23, 24, 31
- Vandegehuchte, M. W. and Kathy, S. J. (2013). Sap-flux density measurement methods: working principles and applicability. *Functional Plant Biology*, pages 213–223. 34

Weibel, F. P. and de Vos, J. A. (1994). Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance method. *Plant and Soil*, 166(2):203–219. [23](#)



Código *Arduino* para sistema de aquisição de dados

```
/*
  Projecto Barbara
  25/05/2016

  O alarme do RTC da-se de minuto a minuto,
  sendo utilizado um contador para detectar a passagem de
  15 minutos.

  A cada alarme do RTC sao medidas tres temperaturas (Termopar,
  MAX31855, e RTC) sendo os dados guardados num cartao SD.
*/

#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <SD.h>
#include "ds3231.h"
#include "Adafruit_MAX31855.h"

#define BUFF_MAX 56
#define MAXDO    5
#define MAXCS    6
#define MAXCLK   8

// Criar um objecto termopar a usar na biblioteca do MAX31855
Adafruit_MAX31855 thermocouple(MAXCLK, MAXCS, MAXDO);
```

```
// Os varios sensores de temperatura
float temperaturaRTC;
double temperaturaMAX31855;
double temperaturaTermopar; // Principal
double valor = 0.0; // diferenca entre os dois anteriores (termopar
    - interno)
double soma = 0.0;
double maximo = -300.0;
double minimo = 500.0;

uint8_t contador = 15; // Minutos entre amostragens

boolean aquecedor = false; // Aquecedor ON ou OFF

uint8_t Heater_state = 0; // OFF por defeito

String cabecalho = "Data;Heater_state;diferencial_termopar;
    t_MAX31855; t_RTC";

// Para tratar do cartao SD
File dataFile;
char s[32];
String dataString = ""; // Guardar os dados no formato
String aux = ""; // csv para se poder abrir no Excel

void set_next_alarm(void)
{
    unsigned char wakeup_min = 0;

    // Da um alarme a cada minuto
    // Projectado para dar alarme a cada minuto ao segundo 0
    uint8_t flags[4] = { 1, 1, 1, 1 };

    // Definir Alarm2. Somente o minuto e ajustado desde que nos
        ignoramos o componente da hora e do dia
    DS3231_set_a2(wakeup_min, 0, 0, flags);

    // Ativar Alarm2
    DS3231_set_creg(DS3231_INTCN | DS3231_A2IE);
}

void setup()
{
```

```

    delay(500);

    // Usar pino A3 como pino digital para controlar rele
    pinMode(A3, OUTPUT);
    digitalWrite(A3, LOW);

    // Iniciar o cartao SD
    // Serial.print(F("Initializing SD card..."));
    if (!SD.begin(4)) {
    // Serial.println(F("initialization failed!"));
        return;
    }
    // Serial.println(F("initialization done."));

    // Iniciar o RTC definindo o alarme
    Wire.begin();
    DS3231_init(DS3231_INTCN);
    DS3231_clear_a2f();
    set_next_alarm();
}

void loop()
{
    char buff[BUFF_MAX]; // Para guardar a data e hora
    struct ts t;          // no formato 2016.05.18 18:52:00

    if (aquecedor) {
        digitalWrite(A3, HIGH); // Ligar rele
    // Serial.println(F("Relay ON"));
        Heater_state = 1;
        delay(2000);
    } else {
        digitalWrite(A3, LOW); // Desligar rele
    // Serial.println(F("Relay OFF"));
        Heater_state = 0;
        delay(2000);
    }

    // Alarme a cada minuto
    if (DS3231_triggered_a2()) {
    // Serial.println(F("Alarme -> passou 1 minuto"));

        contador--; // Decrementa contador de minutos
    // Serial.print(F("Contador = "));

```

```
//      Serial.println(contador);

// Aquisicao de dados e sua gravacao no cartao SD.

// Ler data e hora actuais no RTC
DS3231_get(&t);

// display current time
sprintf(buff, BUFF_MAX, "%d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d", t.
    year,
        t.mon, t.mday, t.hour, t.min, t.sec);
//      Serial.println(buff);

// Medir a temperatura do RTC
temperaturaRTC = DS3231_get_treg();
//      Serial.print(F("Temperatura RTC = "));
//      Serial.println(temperaturaRTC);

////////////////////////////////////
// Fazer 6 medicoes e tirar a media
for (int i=0; i < 6; i++){
    // temperatura interna
    temperaturaMAX31855 = thermocouple.readInternal();
//      Serial.print("Internal Temp = ");
//      Serial.println(temperaturaMAX31855);

    // temperatura termopar
    temperaturaTermopar = thermocouple.readCelsius();
    if (isnan(temperaturaTermopar)) {
//          Serial.println("Something wrong with thermocouple!");
    } else {
//          Serial.print("Temperatura termopar = ");
//          Serial.println(temperaturaTermopar);
    }

    valor = temperaturaTermopar - temperaturaMAX31855;
//      Serial.print("Valor = ");
//      Serial.println(valor);

    // Determinar o maximo e o minimo das 6 medicoes
    if (valor > maximo)
        maximo = valor;
```



```

        if (valor < minimo)
            minimo = valor;

        // Adicionar os valores das 6 medicoes
        soma += valor;

        // Esperar 1 segundo entre medicoes
        delay(1000);
    }

    // Serial.print("maximo = ");
    // Serial.println(maximo);

    // Serial.print("minimo = ");
    // Serial.println(minimo);

    // Serial.print("soma total = ");
    // Serial.println(soma);

    // Valor final ignorando o maximo e o minimo
    soma = soma - maximo;
    soma = soma - minimo;

    // Serial.print("soma + e - removidos = ");
    // Serial.println(soma);

    valor = abs(soma/4); // Guardar este valor por vez
                        // do valor da variavel
                        temperaturaTermopar

    // Serial.print("Diferencial temperatura = ");
    // Serial.println(valor);

    // Reiniciar variaveis no fim de tudo. Ver em *A

////////////////////////////////////

    // Se o ficheiro ainda nao existe, entao
    // acrescentar o cabecalho.
    if (!SD.exists("dados.csv")) {
        dataFile = SD.open("dados.csv", FILE_WRITE);
        // if the file is available, write to it:
        if (dataFile) {

```

```

        dataFile.println(cabecalho);
        dataFile.close();
//        Serial.println(F("Cabecalho guardado no ficheiro"));
    }
    // if the file isn't open, pop up an error:
    else {
//        Serial.println(F("Erro ao gravar o cabecalho"));
    }
}
// Fim de guardar o cabecalho

// Agrupar os dados na string dataString
dataString = ""; // Limpar variaveis
aux = "";

dataString += buff; // buff tem a data e hora
dataString += ";";

dataString += String(Heater_state); // guardar o estado do
    aquecedor
dataString += ";"; // 0 = desligado; 1 = ligado

// Transformar valor de temperatura do termopar em string
// Agora guardar o que esta na variavel valor.
//aux = dtostrf(temperaturaTermopar,2,3,s); // float to
    string com 3 valores depois do .
aux = dtostrf(valor,2,3,s);
dataString += aux;
dataString += ";";

// Transformar valor de temperatura do MAX31855 em string
aux = dtostrf(temperaturaMAX31855,2,3,s); // float to
    string com 3 valores depois do .
dataString += aux;
dataString += ";";

// Transformar valor de temperatura do RTC em string
aux = dtostrf(temperaturaRTC,2,3,s); // float to string com
    3 valores depois do .
dataString += aux;

dataString.replace('.',','); // Conversao de . para ,

```

```

// para abrir no Excel em
// Portugues

// Fim de agrupar os dados

// Guardar os dados no ficheiro
dataFile = SD.open("dados.csv", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
    dataFile.println(dataString);
    dataFile.close();
    // print to the serial port too:
//    Serial.println(dataString);
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
//    Serial.println("Erro ao gravar dados!");
}
// Fim de guardar dados no ficheiro

// Quando passarem 15 minutos mudar o estado do aquecedor
// e reiniciar contador.
if (contador == 0) {
//    Serial.println("Passaram 15 minutos");

    aquecedor = !aquecedor;
    // Repor contador de 15 minutos
    //contador = 15;
    contador = 2; // Para testar sem esperar muito tempo
}

// *A reiniciar variavei para calcular diferencial da
// temperatura do termopar ( dois termopares na realidade)
valor = 0.0;
soma = 0.0;
maximo = 0.0;
minimo = 1000.0;

//set_next_alarm(); // So necessario com outros modos de
// alarme
DS3231_clear_a2f();
}
}
```

