

**Desenvolvimento de software de controlo e análise
de uma Sonda Multi-Funcional para medição
de propriedades do solo
MEEC/UTAD**

Por
Alexandre Coumiotis Peixoto

Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO
para obtenção do grau de
MESTRE,
de acordo com o disposto no
Decreto-lei 216/92 de 13 de Outubro

© Copyright by Alexandre Coumiotis Peixoto, 2010

Orientação Científica :

António Luís Gomes Valente

Professor Auxiliar do
Departamento de Engenharias
UTAD

Raul Manuel Pereira dos Santos

Professor Auxiliar do
Departamento de Engenharias
UTAD

*Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.*

Fernando Pessoa

*Aos meus pais, **Aspasia Coumiotis e José Peixoto***

Desenvolvimento de software de controlo e análise de uma Sonda Multi-Funcional para medição de propriedades do solo

Alexandre Coumiotis Moreira Peixoto

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

Resumo — Hoje em dia, com o desenvolver da técnica de gestão de processos agrícolas, torna-se imperativo a utilização de aparelhos de medição mais precisos e baratos de forma a rentabilizar o processo agrícola. Tradicionalmente, a instrumentação associada a esse tipo de aparelhos revela alguns pontos fracos a serem desenvolvidos, tais como a necessidade de fios ou então o desfasamento temporal entre leitura e verificação dos dados. Além disso, as mais recentes técnicas de controlo baseadas na resposta fisiológica das plantas requerem a monitorização de parâmetros extraídos das próprias plantas, parâmetros como o teor de água no solo junto às raízes, concentração de nitratos e de poluentes, bem como o fluxo de água/nutrientes nas raízes. Estas são algumas das grandezas que podem ser obtidas e processadas numa sonda Multi-Funcional com comunicações sem fios.

Sensores baseados no método do pulso de calor demonstram eficácia em medir simultânea e automaticamente e em várias situações o teor de água no solo, as propriedades térmicas e a condutividade eléctrica do solo.

A capacidade de análise dos dados recolhidos *in loco* por tal conjunto de instrumentos é de grande importância, uma vez que tradicionalmente os dados são colectados e posteriormente processados e, com isso, perde-se tempo de actuação. O presente equipamento pretende dar uma resposta a essa questão na medida em que tanto a leitura como o processamento de dados serão efectuados no próprio dispositivo e posteriormente transmitidos. Na presente dissertação, é demonstrado o desenvolvimento do software por trás de tal dispositivo e são sugeridos e testados alguns métodos de análise de dados tradicionalmente utilizados, como os algoritmos de *Levenberg-Marquardt*, *Trust Region*, o método do valor máximo mas também um novo método.

Palavras Chave: sensor de humidade do solo, pulso de calor, sensor Multi-Funcional, aproximação de curvas, transmissão por rádio-frequência, *ZigBee*, teor de água no solo, jennic.

Development of a control and analysis software for a Multi-Functional probe for measuring soil properties

Alexandre Coumiotis Peixoto

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

Abstract — Nowadays with the developing of the management of agricultural processes, becomes imperative the development of cheaper and preciser measurement devices, so to become profitable and economically viable. Traditionally the instrumentation used has some weak spots that must be developed, like the need of wires or the challenge to collect and process the data sequentially. Beyond that, the newest control techniques based on the physiological response of plant require the monitoring of the extracted parameters of plants. Parameters like water content near the roots, pollutant and nitrates concentration, water/nutrients flux in roots. These are some of the characteristics that must be collected and processed in a multi-functional probe enriched with wireless communications.

Sensors based in the heat pulse method show efficiency in the simultaneous and automatic measurement of the water content, thermal properties and electrical conductivity in soils.

The ability to locally analyze the collected data by such device is of great importance, since, traditionally the data is collected and processed later. In this situation the response time is delayed. The present solution intends to overcome this by means of collecting and processing the data in the same device. In this dissertation it is shown the development of the software underneath such device. It is also compared and tested some methods of data analysis like the Levenberg-Marquardt, Trust-Region algorithm, peak point algorithm and also a new method.

Key Words: soil moisture sensor, heat pulse, Multi-Functional sensor, curve fitting, wireless communications, ZigBee, soil water content, jennic.

Agradecimentos

Institucionalmente, os meus agradecimentos ao Magnífico Reitor da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Professor Doutor Mascarenhas Ferreira, bem como ao seu antecessor, Professor Doutor José Manuel Gaspar Torres Pereira, ao presidente da Escola de Ciências e Tecnologia, Professor Doutor José Afonso Bulas Cruz, e ao pessoal administrativo, pelas facilidades concedidas e meios colocados à disposição para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor António Luís Gomes Valente, orientador deste trabalho, pelas suas sugestões, ideias inovadoras e orientações que permitiram a sua realização. O meu apreço pela sua amizade e apoio, demonstrados nos últimos 10 anos de trabalho e de convívio comum.

Ao Professor Doutor Raul Morais dos Santos, na qualidade de co-orientador, pelo seu sentido crítico, apoio e discussões que viabilizaram e traçaram de forma significativa o rumo deste trabalho.

Aos meus colegas de gabinete e de área de investigação, Vasco Ferreira, Samuel Matos e Miguel Fernandes, pelas discussões técnicas, pela cumplicidade e parceria nos trabalhos realizados, pelo companheirismo e amizade que demonstraram, que em muito contribuíram para a execução do trabalho, bem como para manter o meu empenho nos momentos mais desafiadores. À minha tia Manuela pela generosa revisão de português do presente trabalho. À todos os meus amigos e parentes em

geral, que deram o seu apoio e fomentaram a curiosidade e espírito inquisitivo do qual vive a ciência.

UTAD, Vila Real

Alexandre Coumiotis Moreira Peixoto

21 de Abril, 2010

Índice

Resumo	i
<i>Abstract</i>	iii
Agradecimentos	v
Lista de tabelas	viii
Lista de figuras	ix
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Objectivos	3
1.2 Organização da dissertação	3
2 Estado da arte	5
2.1 Dispositivos baseados no pulso de calor	6
2.2 Métodos de recolha de dados e comunicações	8
2.3 Consumo de energia	11
2.4 Análise de dados	12
2.5 Modelos matemáticos	13
3 Conceitos teóricos	19
3.1 Propriedades térmicas e conteúdo de água no solo	20
3.1.1 Linha-Fonte Infinita e Pulsada	20

3.2	Condutividade Eléctrica (EC_b, EC_w)	22
3.2.1	Medição da condutividade eléctrica	22
3.3	Exponencial Integral	24
3.4	Método do ponto máximo	25
3.5	Aproximação não linear	26
4	Concepção e Implementação	29
4.1	Arquitectura do Sistema	30
4.2	Sonda	31
4.3	Unidade central de processamento	31
4.4	Microcontrolador	32
4.5	Comunicação e transmissão de dados	35
4.5.1	Topologia de rede proposta	35
4.6	Software	37
4.7	Gestão de energia	41
5	Resultados experimentais e discussão	43
5.1	Análise dos dados	44
5.1.1	Cálculo das Variáveis	44
5.1.2	Métodos utilizados	46
5.1.3	Método do ponto máximo	46
5.1.4	Aproximação de curvas	49
5.1.5	Algoritmo de ponderação	53
5.1.6	Comparação de dados	54
6	Conclusões Finais e Trabalho futuro	57
	Bibliografia	62

Lista de Tabelas

5.1	Teor de água e erro associado ao método do ponto máximo	47
5.2	Teor de água e erro associado ao método do ponto máximo	48
5.3	Resultado da aproximação feita pelo algoritmo de <i>Levenberg-Marquardt</i>	52
5.4	Resultado da aproximação feita pelo algoritmo de ponderação	54
5.5	Erros associados as leituras com o solo Totori	55

Lista de Figuras

2.1	Sonda de duas agulhas primeiramente proposta por Campbell	7
2.2	Sonda de quatro agulhas Bristow2001	8
2.3	Sonda Multifuncional desenvolvida por Mori et al.	9
2.4	Exemplo de um datalogger da Campbell Scientific	10
2.5	Arquitectura de rede em malha para a gestão de estufas baseado no ZigBee	10
2.6	Exemplo de resposta em temperatura em função do tempo apresentada por Kluitberg <i>et al.</i> (A) representa um linha fonte de libertação instantânea de calor, (B) um pulso em uma linha infinita, (C) um cilindro infinito com fonte pulsada e (D) um pulso de calor em uma linha finita.	16
3.1	Exemplo de resposta em temperatura para um solo genérico	21
3.2	Movimentação dos Iões	22
3.3	Configuração em Wenner array	23
3.4	Função E_i	24
3.5	Exemplo de resposta em temperatura para um solo genérico	25
3.6	Temperatura em função do tempo.	28
4.1	Arquitectura proposta.	30

4.2	(a) Constituição da sonda multi-funcional , (b) Caixa protectora . . .	31
4.3	(a) Unidade central, (b) Circuito impresso da unidade central	31
4.4	Diagrama de blocos do microcontrolador	32
4.5	Microcontrolador JN5139 falta por as legendas	33
4.6	Bus SPI de um <i>Master</i> e um <i>Slave</i>	34
4.7	Ligação I ² C genérica	34
4.8	Rede em malha	36
4.9	Ambiente de trabalho do CodeBlocks.	37
4.10	Placa de desenvolvimento da Jennic	38
4.11	Placa de desenvolvimento final	38
4.12	Exemplo de máquina de estados no End Device	40
5.1	ligação RS232 para USB	43
5.2	Ambiente de trabalho do Matlab	45
5.3	Exemplo de uma aproximação genérica	49
5.4	Aproximação à curva de resposta da Agár	50
5.5	Várias aproximações feitas utilizando o método de Levenberg-Marquardt	51
5.6	Comparativo do erros absolutos para os vários métodos	56

1

Introdução

O aumento exponencial da população mundial e as restrições ao aumento da superfície arável do planeta levam a que os sistemas de gestão de processos agrícolas tenham de ser cada vez mais eficazes, por forma a promoverem o aumento da produtividade das colheitas, a sua rentabilidade, a preservação do meio ambiente, a racionalização dos recursos naturais e o controlo de pragas e fungos. A monitorização das características dos solos agrícolas (nitratos, teor de água, poluentes, etc.) e dos factores de desenvolvimento das plantas revela-se assim primordial, bem como o desenvolvimento das respectivas interfaces sensoriais.

Hoje em dia, dispõe-se da tecnologia necessária para responder a essa demanda crescente de produtividade. As redes de sensores *wireless* (WSN - Wireless Sensor Networks) são actualmente utilizadas em diversas áreas de aplicação, áreas essas que vão da engenharia civil até à biologia. Pode-se ver como exemplo a utilização de sensores na climatização de edifícios, onde vários sensores espalhados pelos mesmos enviam informações da temperatura da sua área agindo como um *feedback* mais eficaz, ou então na indústria de semicondutores. Temos o exemplo da Intel, que equipa as suas máquinas com pequenos sensores para detectar nelas vibrações anormais que possam significar uma eventual anomalia. Outro exemplo mais próximo do âmbito

dessa dissertação é a monitorização climatérica. Neste caso, um conjunto de sensores remotos pode detectar propriedades físicas como a humidade, a temperatura, ou a luminosidade [1].

A grande vantagem de uma WSN é que os sensores são baratos, pequenos e comunicam sem a necessidade de fios. Outra das vantagens é que o microcontrolador usado da marca Jennic não só pode ler os dados e transmiti-los de imediato, mas principalmente ler os dados, processá-los e guardá-los para quando for altura de os transmitir. Isso traz uma grande vantagem a nível de tráfego na rede, reduzindo o tráfego e explorando as potencialidades do microcontrolador. Há uma grande vantagem em utilizar sensores *wireless* para agricultura em vez dos cablados, especialmente em termos de economia [2, 3]. A escolha do microprocessador utilizado na presente investigação teve em conta o gasto de energia, pois, como verificado por Zhou *et al.* [2] a família de microcontroladores tem vários níveis de consumo, o que é muito vantajoso para aplicações de baixo consumo energético. Pode-se ver em [2] os vários níveis de consumo de corrente por parte do microcontrolador da Jennic, JN5121, que é da mesma família do JN513x. Como mencionado antes, o objectivo de uma WSN é ter baixo consumo, daí ter baixa taxa de transmissão.

Como é prático e barato colocar esse tipo de sensores, pode-se aumentar o número destes melhorando a qualidade de informação e, conseqüentemente, o controlo de determinada área. Outra grande vantagem verifica-se no caso de um dos sensores falhar por razões de bateria ou outra. Neste caso, pode-se adicionar um sensor rapidamente na mesma área. A tecnologia ZigBee foi a escolhida para os sensores comunicarem. Esta tecnologia permite que os sensores se organizem automaticamente. Isso torna-se numa grande vantagem, pois a entrada ou saída de um sensor (nó) na rede é automaticamente assimilada, permitindo uma maior robustez e redundância. Esta tecnologia está orientada para o baixo consumo energético e a baixa taxa de transmissão ao contrário de outras tecnologias como o Bluetooth. O objectivo final é tornar esse tipo de tecnologia cada vez mais ubíquo [1]. Estes sistemas podem ter uma grande autonomia com a ajuda de fontes de energia como a solar ou a eólica, sendo muito mais cómoda a sua manutenção.

É do âmbito desta dissertação desenvolver/melhorar o software que irá correr

num sistema embebido de medição de vários parâmetros do solo. A medição da humidade do solo é feita através de uma sonda emissora de calor e de um termistor. O valor de humidade é retirado a partir da equação (2.1).

1.1 Motivação e Objectivos

Com o advento de tecnologias cada vez mais baratas e versáteis, torna-se cada vez mais possível o desenvolvimento de novas ferramentas para a agricultura e não só. Com base nisso, há uma motivação para desenvolver novos produtos funcionais, práticos, baratos e competitivos. A partir desta ideia, foi nossa intenção desenvolver um *software* que se tornasse futuramente capaz de ser economicamente viável como produto comercial. Grande parte da inviabilidade da comercialização ou então da utilização em massa deste tipo de dispositivo resulta do grande consumo de energia, que acarreta muita despesa em manutenção. O tamanho e o custo do material envolvido são também em parte responsáveis por tal inviabilidade. Em relação ao material, pode-se dizer que, hoje em dia, o custo e as dimensões dos microcontroladores não param de descer, o que possibilita uma futura mudança de produtos. Em relação ao consumo energético, pode-se otimizar a sua utilização com base no *software*. Outra grande motivação deste trabalho foi a vantagem que uma rede de sensores sem fios oferece relativamente a uma rede cablada.

1.2 Organização da dissertação

Além deste capítulo introdutório, que visou enquadrar este trabalho, bem como apresentar os objectivos traçados e sua motivação, esta dissertação é composta por mais cinco capítulos. No segundo capítulo, é feito um estudo de revisão tanto das tecnologias já utilizadas na obtenção de propriedades térmicas do solo como dos modelos matemáticos associados à essas propriedades. O terceiro capítulo explora em maior profundidade os conceitos essenciais desses mesmos modelos e indica uma direcção do que será implementado. No quarto capítulo, é descrita toda a implementação e componentes integrantes do dispositivo desenvolvido à luz dos conceitos explorados nos dois capítulos anteriores. No quinto capítulo, são apresentados os

resultados práticos e também são discutidas as vantagens e desvantagens dos diversos algoritmos de cálculo apresentados. Finalmente, no sexto capítulo, expõem-se as conclusões globais retiradas desta dissertação e referem-se algumas directrizes orientadoras de trabalho futuro, salientando-se alguns desafios vencidos e muitos outros que ainda terão de ser ultrapassados futuramente para a melhoria do dispositivo.

2

Estado da arte

Hoje em dia já existem sistemas capazes de medir várias características do solo em simultâneo e fazer essa transmissão por rádio frequência.

Graças à agricultura de precisão, investigações agronómicas, hidrológicas e ecológicas entre outras, as técnicas de medição de características do solo têm evoluído. Existem métodos directos e indirectos para medir o teor de águas e propriedades térmicas do solo, assim como diversos modos de quantificá-los.

As sondas baseadas no método do pulso de calor estão a advir como sensores para medir simultaneamente o teor de água, propriedades térmicas e condutividade eléctrica do solo [4, 5].

Os recentes avanços no design de sondas, na recolha de dados e na capacidade de computação tornaram possível obter melhor qualidade de dados em menores intervalos de tempo, minimizando assim alguns dos problemas associados à metodologia da aplicação de um pulso de calor nos locais de teste reais. É apropriado, então, que o método do pulso de calor seja reavaliado como método de medição das características do solo. Tal reavaliação justifica-se também devido ao facto de as propriedades térmicas do solo serem fortemente dependentes da quantidade de água nele existente. A automatização deste processo irá permitir a monitorização de mudanças no teor de água no solo, e isto providencia um incentivo adicional para

o desenvolvimento e a aplicação do método do pulso de calor [6].

O sistema Crossbow eKo <http://www.xbow.com/Eko/index.aspx> é um sistema de sensores utilizado para o exterior miniaturizado que permite aos utilizadores uma vantagem competitiva num mundo com restrições de recursos. O sistema eKo introduz uma nova geração de integração de sensores e de uma tecnologia sem fios anteriormente indisponível, enriquecendo os utilizadores com o conhecimento e os dados para compreender os seu meio ambiente. O sistema é uma solução de sensores sem fios que possibilita dados críticos e em tempo real. É alimentado por pilhas e por um sistema solar. Existe uma base de dados acessível através da *web* em qualquer lugar. É possível embutir um vasto leque de sensores, *EBS- Environmental Sensor Bus*, que permite a ligação *plug and play* de sensores de terceiros, escalabilidade e robustez do sistema. Não tem um custo fixo mensal ou anual por utilização do serviço ou devido à sua manutenção constante. Porém, este sistema, no que toca à sua inteligência, só é capaz de configurar a rede em malha dos sensores e também necessita de uma a duas horas de exposição solar para que as suas baterias fiquem carregadas. É necessário ter consideração que este sistema de rede exige sempre uma *gateway* directamente ligada a um servidor para recolha dos dados, sendo a comunicação desse *gateway* através de qualquer nó da rede. No nosso sistema, o *gateway* está implantado no terreno, o que possibilita uma rede muito mais vasta e, mais uma vez, autónoma.

2.1 Dispositivos baseados no pulso de calor

O desenvolvimento da teoria do pulso de calor levou ao desenvolvimento de pequenos e diferenciados sensores que permitiam fazer medições de pequena escala das propriedades térmicas do solo, como a capacidade volumétrica de calor, condutibilidade, difusividade térmica, condutividade eléctrica e teor de água no solo, entre outras.

Vários autores utilizaram o método de pulso de calor para obter características térmicas do solo [4? –9], apesar de utilizarem métodos diferenciados para obter esses resultados. A linha-mestra deste pensamento foi o método do pulso de calor descrito primeiramente por DeVries *et al.* [10].

O método do pulso de calor tem a capacidade de obter medições de grande qualidade e em alguns casos medições tão boas quanto as medições obtidas a partir de outros métodos convencionais actualmente utilizados para a superfície do solo [11].

Uma sonda de duas agulhas DPHP *Dual-Probe Heat-Pulse* foi inicialmente proposta por Campbell *et al.* [12] cf.fig. (2.1). Esta foi a primeira vez que um dispositivo foi utilizado com eficácia para retirar o teor de água no solo. Este dispositivo continha duas agulhas paralelas e separadas por uma pequena distância. Uma dessas agulhas continha internamente um aquecedor (sonda de aquecimento) e a outra continha um sensor de temperatura (sonda do sensor). Quando a sonda está inserida no solo, é aplicado um pulso de calor na resistência de aquecimento e é registado o valor no sensor de temperatura em função do tempo [13]. Essa curva obtida pelo sensor representava a resposta em temperatura do solo de onde, de onde era possível extrair a capacidade volumétrica de calor deste. O teor da água no solo poderia ser então calculado a partir dessa mesma curva, isto porque as variações volumétricas de calor são uma consequência da variação do teor de água no solo.

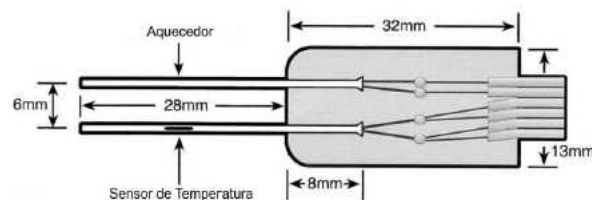


Figura 2.1 – Sonda de duas agulhas primeiramente proposta por Campbell

Outros esquemas de sonda foram testados, como o de quatro agulhas de Bristow *et al.* [11] representado abaixo.

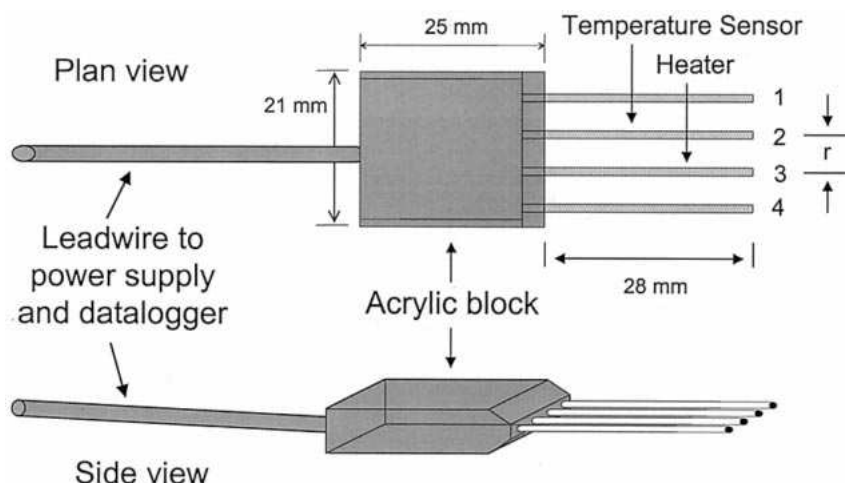


Figura 2.2 – Sonda de quatro agulhas Bristow2001

Esta sonda multifuncional já era capaz de medir simultaneamente a difusividade térmica do solo, a capacidade volumétrica de calor, a condutividade térmica, o teor de água e a condutividade eléctrica do solo.

Em 2003, Mori *et al.* [9] desenvolveu uma sonda de seis agulhas capaz de medir as características conseguidas por Bristow *et al.* a qual adicionou a capacidade de ler o fluxo de água no solo. Concluiu-se que era melhor ter apenas uma sonda multifuncional do que ter uma sonda para cada tipo de medida [9]. A figura (2.3) representa a sonda descrita por Mori *et al.* [9].

2.2 Métodos de recolha de dados e comunicações

Em todos esses dispositivos era necessário recolher e armazenar os dados, como também era necessário fazer um controlo adequado dos dispositivos associados à sonda. Na maioria dos dispositivos de pulso de calor era sempre necessário controlar a temporização do pulso de calor, adquirir os dados de temperatura, quer fossem de termístores, termopares ou outros tipos de dispositivos, a medição da condutividade

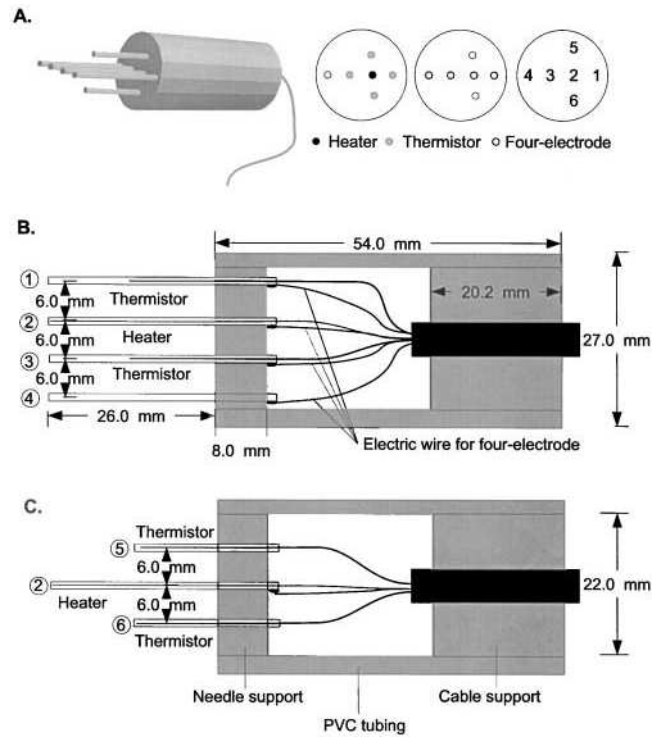


Figura 2.3 – Sonda Multifuncional desenvolvida por Mori et al.

eléctrica e de outros factores, gravar dados indicativos como a potência consumida e a temperatura máxima [4, 6, 9, 11, 12]. O *datalogger* foi o dispositivo mais largamente utilizado e que demonstrou maior fiabilidade e robustez para fazê-lo [4, 9, 11, 12, 14, 15].

Porém, este dispositivo trazia algumas desvantagens. A grande necessidade de manutenção, a falta de autonomia e as suas dimensões impeditivas do rápido e cómodo transporte, assim como a necessidade de cabos, quer para a alimentação, quer para a comunicação, minavam as possibilidades da aplicação em larga escala desse tipo de dispositivos. O *datalogger* continuou a ser o equipamento de eleição, porém, devido aos seus inconvenientes, começou-se a investigar outras possibilidades que aumentassem a autonomia e independência do equipamento. Alguns protocolos de comunicações foram desenvolvidos na esperança de resolver esse tipo de



Figura 2.4 – Exemplo de um datalogger da Campbell Scientific

problemas. Foram propostas algumas plataformas que permitiram inicialmente comunicações entre os dispositivos e também fazer uma gestão remotamente a partir de uma *web page* [3, 16]. Hill *et al.* [17] utilizou uma plataforma sem fios para redes profundamente embebidas. Esta plataforma demonstrava grande autonomia e robustez, pois, caso um dos nós dessa rede falhasse, poderia ser autonomamente substituído por outro, ou então, se surgisse um novo nó na rede, esse rapidamente seria assimilado.

Outras aplicações de sensores inteligentes foram descritas. Yiming *et al.* [2] descreve a utilização deste tipo de sensores para o controle de uma estufa. As comunicações dos sensores eram feitas através da tecnologia *Zigbee*. Este autor revela a utilidade de um novo equipamento para implementação desse tipo de redes chamado JN5121 da *Jennic*, cf. fig. (2.2).

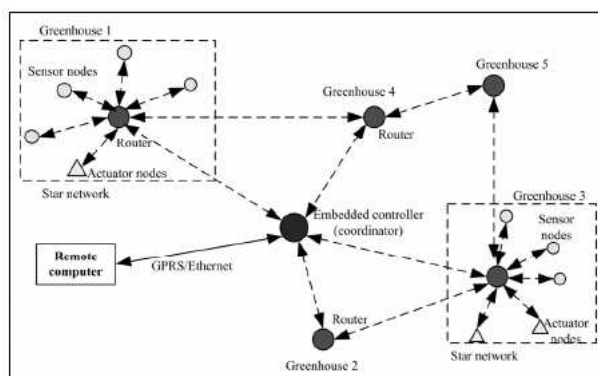


Figura 2.5 – Arquitectura de rede em malha para a gestão de estufas baseado no ZigBee

Esta arquitectura de rede baseada no protocolo ZigBee permite uma grande robustez da rede face às anteriores cabladas, pois esta rede tem a capacidade de auto formar-se e de autocura.

2.3 Consumo de energia

A autonomia em sistemas sem fios deste género é um dos factores fundamentais, pois, para aumentar a autonomia, é mister reduzir os consumos e obter fontes alternativas de energia. Entre os protocolos utilizado está o IEEE 802.11b, que foi utilizado por Hill *et al.* [17]. Porém, por ser um protocolo orientado para grandes débitos de informação, traz grandes inconvenientes ao nível do consumo. Concluiu-se que devido a essas características, esse protocolo não se mostra como uma solução válida para o objectivo proposto de conseguir um equipamento altamente autónomo. Para tal era necessário focar a atenção sobre um protocolo mais orientado para baixos débitos e baixos consumos. Este tipo de dispositivos deveriam funcionar a partir de um única pilha de lítio.

Conclui-se que para o sistema ser altamente autónomo necessita de métodos que consigam economizar no consumo energético e, para tal, alguns autores concluíram sobre a eficácia da utilização desses estados de baixo consumo em redes de sensores [17, 18]. Em 2006, alguns desenvolvimentos foram introduzidos por Valente *et al.* [5]. Na sua sonda multifuncional já era possível comunicar autonomamente através de um sistema de rádio frequência que implementava as camadas mais baixas do protocolo ZigBee, no entanto, os consumos de energia ainda eram demasiadamente altos para ser uma possibilidade real na indústria.

O equipamento de desenvolvimento de redes JN5121 da Jennic traz grandes vantagens relativamente à estrutura cablada que era utilizada até então. Este microcontrolador tem funções de baixo consumo de energia, chamados níveis de *sleep*. Quando os sensores não estão a funcionar na leitura ou transmissão então podem entrar nesse estado; Zhou *et al.* [2] demonstra a grande utilidade desses estados no consumo de energia total e consequente funcionalidade do sistema.

2.4 Análise de dados

Os dados recolhidos na maioria desses estudos resumiam-se às respostas em temperatura do solo para os diversos tempos e níveis de aquecimento. No que toca à análise dos dados, outros componentes das medições como a condutividade eléctrica e a orientação de fluxo não necessitavam de estratégias elaboradas para obter o resultado pretendido. Devido a algumas fontes de erros como o ruído a resolução dos conversores e outros, foi necessário fazer uma análise mais cuidada dos dados para se obterem os resultados pretendidos. Apesar de serem utilizados vários métodos para eliminar esses erros associados aos valores lidos, um método que se destacou pela sua eficácia eficaz foi o método dos mínimos quadrados de aproximação de curvas [4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15].

Dentre os métodos de mínimos quadrados existentes, o método de *Levenberg-Marquardt* impôs-se como a alternativa mais fiável para dados com grande quantidade de ruído e com um pico alargado [8]. Porém, a utilização alargada desse método foi posta em causa devido à grande capacidade de processamento envolvido e ao tempo necessário para ser efectuado. Outro factor de relevo é o cuidado ao fazer a escolha dos parâmetros iniciais, pois uma escolha pobre desses parâmetros pode levar a uma divergência do método. Uma coisa se conclui dentro dos métodos dos mínimos quadrados: a selecção de apenas um ponto revela ser uma estimativa pobre, pois é muito sensível a erros [8], daí ser necessário utilizar um conjunto de dados seleccionados ou então todos os dados para obter um melhor resultado. Para demonstrar a robustez do sistema, foram efectuados testes no terreno que demonstraram bons resultados [19].

Outra nota importante no desenvolvimento deste tipo de sensores é a grande influência que as conversões analógico-digitais têm no resultado final dos dados. Tarrara *et al.* [19] concluiu que um aumento de resolução dos conversores analógico-digitais assim como o aumento da taxa de amostragem são factores fundamentais para a grande melhoria dos resultados da sobrelevação de temperatura. Outros autores verificaram que o hardware de base tem grandes influências nos resultados dos dados [13].

Outro método estudado foi o método de detecção de pico, que requer medições exactas do ponto máximo de sobrelevação de temperatura e do tempo associado. Este método, desde que com uma medição cuidada e uma identificação prudente do valor de pico, demonstra obter excelentes resultados, além de que é um método de simples aplicação e de uma necessidade de recursos escassa [13–15, 20]. Alguns autores compararam este método ao método de aproximação não linear e verificaram que ambos os métodos têm vantagens e desvantagens dependendo das condições a ser analisadas [13–15, 20]. Algumas análises ao modelo teórico foram efectuadas para verificar a validade dos dados daí resultantes. Klitutenberg *et al.* [7] fez uma análise do modelo de Campbell *et al.* e verificou a robustez do mesmo (modelo da teoria do aquecimentos instantâneo). É também verificado que quanto maior o pulso menos probabilidades de erro existem.

Bristow *et al.* [11] fez uma análise de dois métodos para retirar os valores pretendidos da curva da resposta em temperatura. Apesar de ambos os métodos estarem baseados na aproximação de curvas através do método dos mínimos quadrados, uma das soluções tinha como objectivo passar apenas por um ponto (ponto máximo) e o outro método obrigava o modelo a se ajustar a todos os pontos recolhidos da curva de resposta em temperatura.

Hoje em dia existe no mercado uma variedade de dispositivos de medição do teor de água no solo. Temos o exemplo do sensor *thermo*-TDR (*thermo-time domain reflectometry*). Porém, estes sensores são de custo elevado para ser utilizados em larga escala e também apresentam limitações na calibração para diferentes tipos de solo. Outra desvantagem é que este método não é capaz de fazer medições perto da superfície do solo [21], onde é mais vital a monitorização de teor de água. Para além destes factores, é necessário recorrer a dispositivos externos, quer para alimentação do sensor, quer para a aquisição e processamento dos dados [22].

2.5 Modelos matemáticos

Assim como a tecnologia por detrás do sensor evoluiu, os modelos matemáticos associados para a extracção das características térmicas também foram alvo de análise e adaptações. Uma das características principais a ser extraída do solo é o teor de

água que este contém. Para obter o teor de água a partir do método do pulso de calor, primeiramente foi utilizada a equação (2.1) descrita por Campbell *et al.* [12]:

$$\theta = \frac{\rho c - \rho_b c_s}{\rho_w c_w} \quad (2.1)$$

Onde o θ é o teor de água ou então a quantidade volumétrica de água no solo ($m^3 m^{-3}$), ρ_w é a densidade da água ($kg m^{-3}$), ρ_b é a densidade do solo seco, c_s e c_w são o calor específico do solo e da água respectivamente ($J kg^{-1} K^{-1}$), e ρc é a capacidade térmica por volume do solo ($J m^{-3} K^{-1}$). Tendo em conta que já se conhecem os parâmetros básicos do solo, pode-se obter o valor de ρc através da equação (2.2) [12]:

$$\rho c = \frac{q}{e \pi r_m^2 \Delta T_m} \quad (2.2)$$

Aqui ΔT_m representa a sobre-elevação máxima de temperatura (K). Nota-se que ρc está relacionado com o inverso da sobre-elevação de temperatura ΔT_m . Para determinar ΔT_m necessitamos de obter um modelo que possa representar a sobre-elevação de temperatura ΔT . Para tal pode-se utilizar o modelo abaixo descrito por Campbell *et al.* [12]:

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q}{4 \pi \kappa t} e^{\frac{-r^2}{4 \kappa t}} \quad (2.3)$$

Este modelo descreve que quando uma quantidade finita de calor Q é instantaneamente libertada de uma linha fonte de calor colocada num meio infinito, a variação de temperatura ΔT a uma distância r dessa mesma linha após um tempo t do pulso de calor pode ser descrita por (2.3). Onde κ é a difusividade térmica do meio ($m^2 s^{-1}$), r é dado em metros (m) e t é dado em segundos (s). Q pode ser descrito pela relação:

$$Q = \frac{q}{\rho c} \quad (2.4)$$

Aqui, q é a quantidade de calor injectada na linha fonte representada pelo aquecedor (Jm^{-1}). Para se obter a sobre-elevação máxima de temperatura, é necessário substituir t pelo tempo onde ocorre o máximo t_m em (2.3).

$$\Delta T_m = \frac{Q}{e\pi r_m^2} \quad (2.5)$$

Torna-se pois notória a importância de se concluir com a maior precisão possível esse ponto de sobre-elevação máxima para a determinação do teor de água no solo. Pode-se então deduzir a importância da equação (2.3) e as suas consequências na extracção dos parâmetros pretendidos.

O modelo proposto por Campbell *et al.* [12] baseia-se no pressuposto do aquecimento instantâneo de uma linha fonte, o que é uma aproximação da realidade, porém, um modelo que previsse um aquecimento através de um pulso de calor seria mais realista e consequentemente obter-se-iam melhores resultados. O modelo do pulso de calor foi inicialmente proposto por De Vries *et al.* [10]:

$$\Delta T(r, t) = \begin{cases} T_1(r, t) & \text{se } 0 < t \leq t_0 \\ T_2(r, t) & \text{se } t > t_0 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$T_1(r, t) = -\frac{Q'}{4\pi\kappa} Ei\left(\frac{-r^2}{4\kappa t}\right) \quad (2.7)$$

$$T_2(r, t) = -\frac{Q'}{4\pi\kappa} \left[Ei\left(\frac{-r^2}{4\kappa(t-t_0)}\right) - Ei\left(\frac{-r^2}{4\kappa t}\right) \right] \quad (2.8)$$

onde temos dois momentos distintos, o tempo de aquecimento ou então de duração do pulso t_0 (s) e o tempo de arrefecimento ou então o tempo de descida ($t > t_0$). Para estes dois momentos distintos, temos duas equações distintas. Para a presente dissertação terá interesse olhar apenas para o segundo momento. Aqui, Q' é a força da fonte de calor por unidade de comprimento por unidade de tempo ($m^2 \text{ } ^\circ C \text{ } s^{-1}$) e $-Ei(-x)$ representa o integral exponencial de x . Finalmente ao reorganizar a equação (2.6) obtemos [7]:

$$C = \rho c = \frac{q'}{4\pi\kappa\Delta T_M} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa(t_M - t_0)} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa t_M} \right) \right] \quad (2.9)$$

onde C representa a capacidade térmica por volume de solo ($Jm^{-3}K^{-1}$) e q' é a energia de entrada por unidade de comprimento de aquecimento por unidade de tempo ($Jm^{-1}s^{-1}$) e pode ser relacionada em (2.10).

$$Q' = \frac{q'}{\rho c} \quad (2.10)$$

Kluitenberg *et al.* [7] fez uma comparação entre o modelo proposto por Campbell *et al.* e o modelo do pulso de calor proposto por De Vries *et al.*.

Ambos os modelos reflectem de uma maneira fiável a realidade, no entanto ao implementar esses dois modelos verifica-se que há algumas diferenças importantes. Na figura (2.6) pode-se notar que há um ligeiro desvio entre o modelo do pulso instantâneo utilizado por Campbell *et al.* (modelo da libertação instantânea de calor) e o modelo proposto por De Vries *et al.* (modelo do pulso de calor).

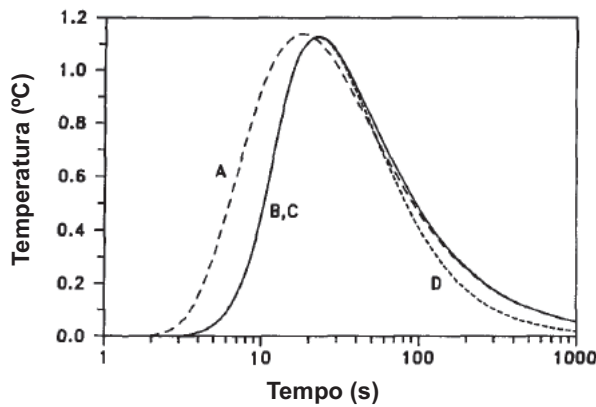


Figura 2.6 – Exemplo de resposta em temperatura em função do tempo apresentada por Kluitberg *et al.* (A) representa um linha fonte de libertação instantânea de calor, (B) um pulso em uma linha infinita, (C) um cilindro infinito com fonte pulsada e (D) um pulso de calor em uma linha finita.

O modelo de pulso de calor desvia-se consideravelmente do modelo de libertação instantânea de calor *cf. fig. (2.6)*, no entanto fornece uma descrição mais realista dos dados recolhidos por Campbell *et al.* (1991) ,isto porque as suas experiências foram efectuadas com o pulso de calor. Campbell *et al.* (1991) foi bem sucedido com a sua teoria do aquecimento instantâneo porque o máximo de temperatura neste modelo difere ligeiramente do pulso de calor *cf. fig. (2.6)*, apesar do facto da curva estar transladada para esquerda. Isto demonstra que o modelo utilizado por Campbell *et al.* se mostra robusto [7]. Um estudo dos erros associados aos diferentes modelos representados na figura (2.6) demonstram que a temperatura máxima pode ser extraída a partir do modelo de Campbell *et al.* (1991) com erros associados mínimos [7]. Outro factor importante é o tempo onde ocorre o máximo (t_m). Na extracção de C , é necessário determinar t_m na equação (2.9). Para a determinação deste parâmetro, é necessário ser mais cuidadoso com o modelo a ter em conta [15].

3

Conceitos teóricos

Uma produção agrícola mais eficaz requer a determinação de diversas propriedades do solo dentre as quais se destacam o teor de água, a difusividade térmica, a capacidade calorífica volumétrica e a condutividade eléctrica. Um entendimento do comportamento dessas variáveis torna-se necessário para a sua determinação.

O teor de água no solo indica-nos a quantidade de água por volume de solo e é uma das variáveis mais importantes, pois afecta directamente o crescimento das plantas e condiciona o conteúdo de trocas de gás no solo, que por sua vez irá afectar a respiração das raízes, a actividade de microorganismos e o estado químico do solo. Para poder obter o teor de água, é necessário recorrer à resposta em temperatura do solo, bem como à sua difusividade térmica. Esta última representa a capacidade do solo em difundir calor.

A capacidade calorífica volumétrica representa a quantidade de energia térmica necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de volume do material, neste caso do solo em questão. A condutividade eléctrica é um parâmetro dependente do teor de água e indica o quão bom condutor eléctrico é o solo. Esta característica do solo é de grande interesse, pois está directamente relacionada com o bom desenvolvimento da planta.

3.1 Propriedades térmicas e conteúdo de água no solo

Como foi visto na secção anterior, a existência de diversos modelos para extrair as propriedades térmicas traz vantagens e desvantagens. Para efectuar a extracção de algumas propriedades térmicas do solo é necessário obter-se a curva de resposta em temperatura desse mesmo solo, recorrendo ao modelo teórico mais apropriado.

3.1.1 Linha-Fonte Infinita e Pulsada

O modelo da linha-fonte infinita e pulsada foi primeiramente proposta por De Vries (1952). Este modelo mostrou ser o mais próximo da realidade de uma sonda pulsada de calor como a proposta nesta dissertação. Para a análise posterior dos dados será apenas necessário ter em consideração a parte da curva após o tempo do pulso. Sendo assim das três equações anteriormente vistas (2.6), (2.7) e (2.8) vamo-nos focar apenas em (2.8).

A equação (2.8) que representa a resposta em temperatura do solo pode ser simplificada tendo apenas em conta o seu segundo ramo, ramo este correspondente ao tempo da curva onde o pulso de calor está desligado. Note-se que tanto T como ΔT representam a elevação de temperatura. Tem-se então:

$$T_2(r, t) = -\frac{Q'}{4\pi\kappa} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa(t - t_0)} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa t} \right) \right] \quad (3.1)$$

onde:

$$Q' = \frac{q'}{\rho c} \quad (3.2)$$

obtendo finalmente:

$$\Delta T(r, t) = -\frac{q'}{4\pi C\kappa} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa(t - t_0)} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa t} \right) \right] \quad (3.3)$$

Esta equação descreve com precisão curvas de resposta em temperatura do solo

e representa uma vantagem em relação aos modelos descritos por Campbell [12], pois é o modelo mais aproximado da linha-fonte instantânea. Considere-se como exemplo a curva abaixo, que representa uma resposta em temperatura para um solo genérico e que pode ser descrita pela equação (3.3).

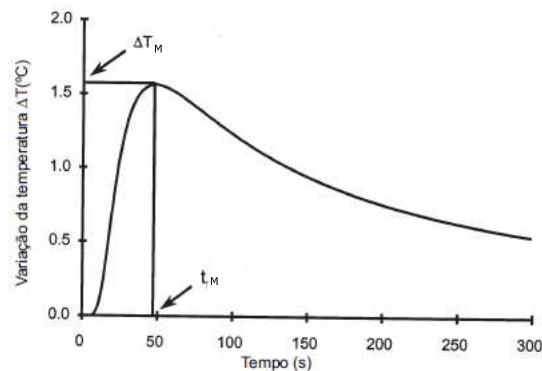


Figura 3.1 – Exemplo de resposta em temperatura para um solo genérico

Pode-se distinguir duas fases na figura acima. Uma fase ascendente, onde há um acumular de calor no solo e a variação de temperatura ascende até atingir um máximo de variação de temperatura com o tempo correspondente t_m . Após esse ponto, inicia-se a fase descendente, onde a variação de temperatura decresce.

A partir da equação (2.9) pode-se verificar que a capacidade calorífica volumétrica do solo C é obtida pela substituição nessa mesma equação dos parâmetros ΔT_M e t_M , entre outros.

Outro parâmetro importante a ser extraído do solo é a difusividade térmica do solo k . Este parâmetro pode ser obtido através da equação abaixo:

$$k = \frac{r^2}{4} \frac{(1/(t_M - t_0)) - (1/t_M)}{\ln[t_M/(t_M - t_0)]} \quad (3.4)$$

onde r representa a distância em metros entre o aquecedor e o termistor e t_0 é o tempo de duração do pulso de calor. T_M representa o tempo onde ocorre a máxima elevação de temperatura. Note-se que para o cálculo de k também é necessária a

determinação de t_M .

3.2 Condutividade Eléctrica (EC_b , EC_w)

Estudos com o uso da condutividade eléctrica do solo têm apontado o seu potencial para a medição do conteúdo de argila, conteúdo de água, capacidade de troca catiónica e teores de cálcio e magnésio trocáveis, profundidade de camada de impedimento, teor de matéria orgânica, teor de sais da solução do solo, dentre outros [23].

3.2.1 Medição da condutividade eléctrica

A condutividade eléctrica é a capacidade de uma solução de um metal ou de um gás permitir a passagem de corrente eléctrica. Nas soluções, os portadores de carga são os cátions e aniões, e nos metais os portadores de carga são os electrões, portadores estes que originam a corrente eléctrica. Para uma solução conduzir corrente eléctrica, depende de vários factores: concentração, mobilidade dos iões, valência de iões e temperatura.

A condutividade eléctrica pode ser medida aplicando uma corrente eléctrica alternada (I) a dois eléctrodos imergidos numa solução e medindo a tensão resultante (V). Durante este processo, os cátions migram para o eléctrodo negativo, os aniões para o eléctrodo positivo e a solução actua como um condutor eléctrico cf. fig. (3.2).

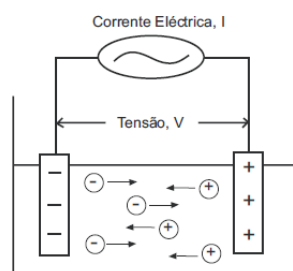


Figura 3.2 – Movimentação dos iões

A sonda multifuncional inclui quatro eléctrodos para medição da condutividade eléctrica (CE). Trata-se de quatro eléctrodos paralelos que, em conjunto, constituem

uma configuração em *Wenner array* (3.3), na qual a condutividade do solo pode ser lida.

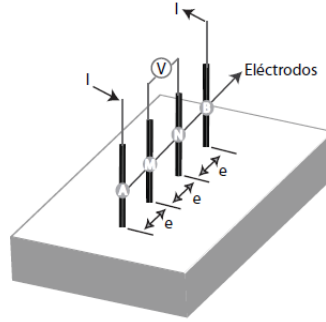


Figura 3.3 – Configuração em Wenner array

Todos os electrodos estão separados a uma distância constante de valor e , e a condutividade eléctrica aparente, $\sigma_a(Sm-1)$ é:

$$\sigma_a = \frac{1}{2\pi K} \frac{I}{V_{MN}}, \quad (3.5)$$

onde $I(A)$ é a fonte de corrente, $V_{MN}(V)$ é a tensão medida entre os electrodos M e N, e $\frac{1}{2\pi K}(m^{-1})$ é a constante da célula de medição, onde:

$$\frac{1}{K} = \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right], \quad (3.6)$$

representa o factor geométrico que irá adquirir um valor específico para um dado espaçamento entre electrodos. No *Wenner array*, o factor geométrico assume a forma simples $K = a$, e a constante da célula será $(1/2\pi\alpha)$. Rhoades propôs a seguinte expressão [24]:

$$\frac{EC_b}{EC_w} = \alpha + \theta_v^2 + \frac{EC_s}{EC_w}, \quad (3.7)$$

onde EC_b é a condutividade eléctrica do meio bruto de condutividade eléctrica do meio, EC_W é a condutividade eléctrica da água do solo e o EC_S é a condutividade da superfície do solo.

3.3 Exponencial Integral

Como foi visto no capítulo anterior, as equações que regem o comportamento térmico do solo (2.7) e (2.8) utilizam uma função matemática especial denominada por exponencial integral, representada pelo símbolo Ei . Esta função matemática é definida no plano complexo e tem um único argumento.

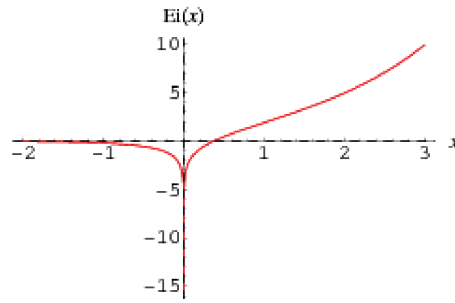


Figura 3.4 – Função Ei

partindo da função E_1 :

$$E_1(x) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-tx}}{t} dt = \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (3.8)$$

Então define-se o integral exponencial $Ei(x)$ como:

$$E_1(x) = -Ei(-x), \quad (3.9)$$

onde a notação $-Ei(-x)$ é mantida por razões históricas.

$$Ei(x) = - \int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt = \int_{-\infty}^x \frac{e^{-t}}{t} dt \quad (3.10)$$

3.4 Método do ponto máximo

Para se obter os valores da capacidade térmica, difusividade térmica e teor de água no solo é necessário determinar os valores de elevação máximo (ΔT_M) e o seu tempo correspondente (t_M). Sendo conhecidos os valores de r e de q' , resta determinar a capacidade térmica volumétrica C e a difusividade térmica do solo k através das equações (3.3) e (3.4). O presente método utiliza um único ponto na curva de $\Delta T(t)$, e os resultados dependerão do ruído ou do erro que existe nesse ponto. Este método requer precisão nas leituras de t_M e ΔT_M que definem o valor de pico. Erros nas medições de r , q' e t_0 poderão conduzir a erros na leitura das propriedades térmicas do solo [13]. No entanto, para leituras relativamente precisas, o método demonstrou fiabilidade na resolução deste tipo de problemas [20].

O método do ponto máximo é efectuado a partir de um algoritmo de detecção de pico. Este algoritmo progride ao longo da curva, verificando todos os seus pontos e comparando com o máximo actual. É notório que este método é simples e rápido, porém, como indicado antes, tem algumas desvantagens. Pode-se ver abaixo uma curva de resposta em temperatura, característica para um solo genérico. Note-se que nesta curva os pontos a determinar pelo algoritmo são t_M e ΔT_M .

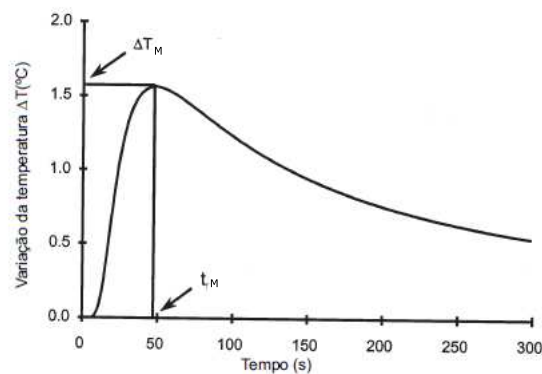


Figura 3.5 – Exemplo de resposta em temperatura para um solo genérico

Em baixo pode-se ver um algoritmo de exemplo que efectua o método de detecção de pico.

```

posição = 1
Máximo <-  $\Delta T$ [posição]
Se ( $\Delta T$ [posição+1] =  $\Delta T$ [posição])
Então
    posição <- posição + 1
    Máximo =  $\Delta T$ [posição]
    posição = FIM ?
Fim se

```

3.5 Aproximação não linear

Imprecisões na leitura da curva, erros inerentes à ADC, imperfeições da própria estrutura da sonda podem levar a grandes erros na leitura final dessa mesma curva. Sabe-se que através de métodos matemáticos como a aproximação de curvas são muito úteis para atenuar em maior ou menor medida esses erros inerentes a qualquer instrumento de medição. Tendo em mente esse conceito, é de grande importância apresentar métodos de aproximação de curvas eficazes para atenuação desses erros que nada mais são do que ruídos na leitura final.

Para o caso em questão ir-se-á, utilizar o método de aproximação não linear de curvas devido à natureza não linear da equação em questão (3.3). Dando um valor apropriado para $\Delta T(t)$, obtido a partir da sonda, consegue-se determinar κ e ρc ao aproximar a equação (3.3) aos valores lidos de $\Delta T(t)$. Esta abordagem requer o uso de regressão não linear devido as não linearidades da equação (3.3) [13].

Algoritmo de Levenberg-Marquardt

Um método largamente utilizado e que demonstra grande eficácia para fazer a aproximação de funções é o algoritmo de Levenberg-Marquardt [6, 7, 12]. Este método requer as derivadas de $\Delta T(r, t)$ em ordem a κ e ρc , ambos os parâmetros a ser otimizados no processo de aproximação. A derivada em ordem a ρc encontra-se abaixo:

$$\frac{\partial \Delta T(r, t)}{\partial(\rho c)} = -q' 4\pi(\rho c)^2 \kappa \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa(t - t_0)} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa t} \right) \right]; t > t_0, \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta T(r, t)}{\partial(\rho c)} = & \frac{-q'}{4\pi(\rho c)^2 \kappa} \left[Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa(t - t_0)} \right) - Ei \left(\frac{-r^2}{4\kappa t} \right) \right] \\ & + \frac{q'}{4\pi(\rho c)^2 \kappa} \left[exp \left(\frac{-r^2}{4\kappa t} \right) - \left(\frac{-r^2}{4\kappa(t - t_0)} \right) \right]; t > t_0, \quad (3.12) \end{aligned}$$

Método da Região de Confiança

Outro método popular é o método de *Trust-Region*, ou seja, Região de Confiança. Este é um método de optimização matemática. Ao invés de outros algoritmos de optimização, como por exemplo, o de *Newton-Raphson*, que utiliza a função inteira, o algoritmo da região de confiança aproxima apenas determinada região (chamada região de confiança) da função objectivo através de uma função modelo. Quando um modelo apropriado é utilizado dentro da região de confiança, essa região é expandida e, contrariamente, se a aproximação é fraca, a região é diminuída. O método de avaliação é observar a razão da melhoria esperada da aproximação quadrática com a aproximação na função objectivo. À parte das complexidades matemáticas dos métodos de aproximação aqui descritos, é importante notar que o seu objectivo é aproximar tanto quanto possível os valores reais a uma determinada curva teórica. Na figura (3.6) pode-se notar como um método de aproximação não linear consegue atenuar ruídos por motivos vários.

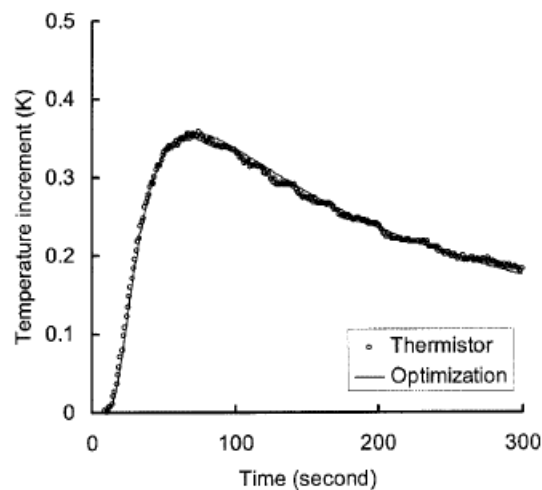


Figura 3.6 – Temperatura em função do tempo.

4

Concepção e Implementação

Tendo em mente todos os dispositivos já desenvolvidos e as suas características positivas e negativas, partiu-se para um sistema que seria a evolução de uma sonda com duas agulhas descrita por Bristow *et. al* [14]. Partiu-se do princípio de que o sistema deveria ser capaz de recolher e calcular a temperatura do solo, a capacidade volumétrica de calor, a difusividade térmica, a condutividade térmica, o conteúdo de água no solo e a condutividade eléctrica do solo, todas estas no mesmo local e ao mesmo tempo. Outro requisito seria a capacidade de transmissão sem fios dos dados recolhidos e ou calculados remotamente para um computador ou dispositivo equivalente. Era também de grande importância a autonomia de tal dispositivo, pois, para se tornar eficaz, deveria ser o mais independente de manutenção possível. Com todos esses requisitos ainda foi necessário pensar num sensor que fosse simples de implementar e de baixo custo, capaz de fazer medições perto da superfície do solo, capaz de ser utilizado em experiências tanto em laboratório como no campo, que não emitisse nenhum tipo de radiação ou ionização e, em última análise, que também servisse como ferramenta de ensino. Uma sonda multi-funcional de quatro agulhas teria a capacidade de preencher esses requisitos [11].

4.1 Arquitectura do Sistema

A arquitectura inicialmente proposta encontra-se ilustrada na figura (4.1), é composta por seis módulos: controlo do aquecedor, medição de temperatura, medição de condutividade eléctrica, transmissor de rádio frequência, controlo digital e módulo de alimentação.

Todos os circuitos de processamento de sinal do controlador do aquecedor, da medição de temperatura e da medição da condutividade eléctrica serão implementadas num único microsistema.

O controlo digital realizará o condicionamento de sinal necessário para controlar o pulso de calor, medição da temperatura, bem como todo o condicionamento de sinal necessário para a leitura da condutividade eléctrica. O módulo de alimentação é responsável pelo controlo de carga de bateria através de um painel solar e fornece a tensão necessária para o pulso de calor e para a alimentação de todo o sistema. O módulo de comunicação (transmissor de rádio-frequência) realiza a interface entre sinais digitais e sinais rádio.

Podem-se distinguir dois grandes blocos, o primeiro que representa uma cadeia de medição com os sensores incluídos na sonda e os conversores analógico para digital, o segundo com um microcontrolador para aquisição dos dados e posterior processamento.

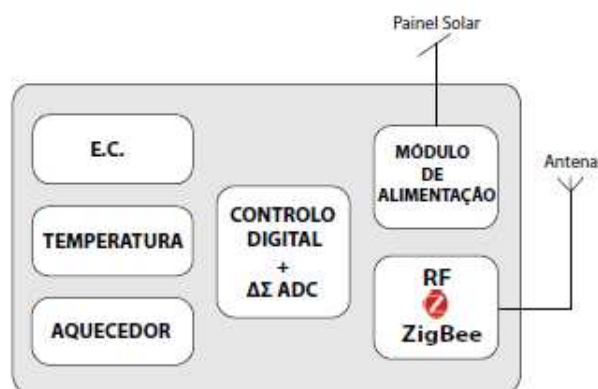


Figura 4.1 – Arquitectura proposta.

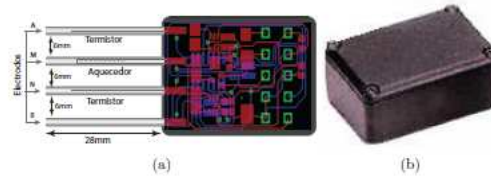


Figura 4.2 – (a) Constituição da sonda multi-funcional , (b) Caixa protectora

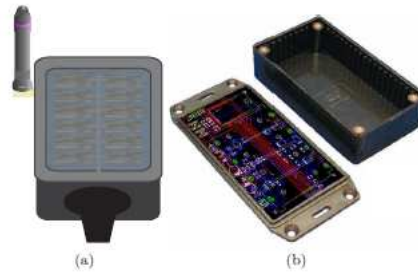


Figura 4.3 – (a) Unidade central, (b) Circuito impresso da unidade central

4.2 Sonda

A sonda multi-funcional representada na figura (4.2) (a) e (b) foi desenvolvida de modo a efectuar medições simultâneas das propriedades térmicas do solo (capacidade volumétrica de calor, condutibilidade e difusibilidade térmica) e do conteúdo de água no solo, utilizando o método do pulso de calor e condutividade eléctrica pelo método de *Wenner array*. Esta sonda artesanal é baseada nos estudos de Mori *et al.* e de Valente *et al.* [5, 9]. O presente sistema é dividido em duas partes: a sonda e a unidade central que contém o microcontrolador com comunicações sem fios, painel solar e gestão de energia [25].

4.3 Unidade central de processamento

Nos dispositivos vistos no capítulo dois, nota-se que era de grande interesse a miniaturização e autonomia do sistema de controle geral do dispositivo. Com a evolução dos microcontroladores, torna-se economicamente viável o armazenamento e processamento de informação, permitindo a sua aplicação em sistemas de aquisição cada vez mais compactos e fiáveis. Torna-se também possível o acréscimo do número de

periféricos que potenciam essas unidades de processamento.

Uma das necessidades fundamentais no desenvolvimento de sistemas de monitorização agro-ambiental é a troca de dados entre o sistema de aquisição de dados e o sistema responsável pelo tratamento desses mesmos dados. Torna-se vantajoso conseguir unificar esses sistemas num só, onde a aquisição e processamento de dados sejam efectuados pelo mesmo sistema. Com esta possibilidade reduz-se o volume de dados entre as unidades e todo o dispêndio de energia associado. É também vantajoso que se possa ter acesso remoto às variáveis pretendidas, eliminando assim a necessidade de deslocação exclusiva para a obtenção desses dados pretendidos, tornando apenas necessárias deslocações para a manutenção do sistema.

Esta unidade também tem a capacidade de transmissão e recepção de dados através do ar, isto é, sem a necessidade de fios. Todo o controlo do tráfego, a verificação dos dados e as acções de comunicação são efectuadas nesta unidade.

4.4 Microcontrolador

Na figura (4.4) encontra-se ilustrado o diagrama de blocos do microcontrolador implementado no presente sistema, com a indicação das ligações de entrada e de saída mais pertinentes.

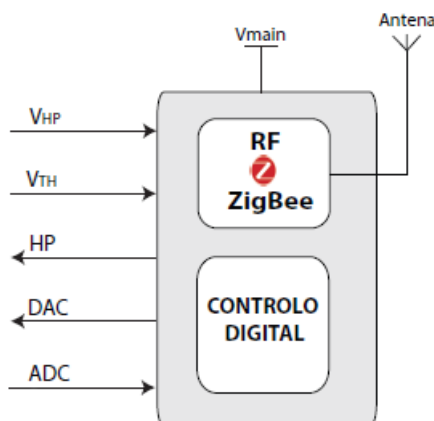


Figura 4.4 – Diagrama de blocos do microcontrolador

No presente sistema, é utilizado o módulo JN5139 da *Jennic*. Esse módulo tem incorporado um microcontrolador e recursos de comunicação sem fios. Uma das vantagens deste microcontrolador é a de ser capaz de verificar os requisitos anteriormente mencionados. Ou seja, este microcontrolador é capaz de efectuar leituras simultâneas dos periféricos associados, processar os dados das leituras, armazená-los para posteriormente os transmitir para uma rede sem fios *ZigBee*. Este módulo está de acordo com a norma IEEE 802.15.4 e implementa a *stack* do protocolo *ZigBee*. É constituído por um CPU de 16MHz de 32-bit RISC, um transmissor de 2.4GHz IEEE 802.15.4, 192kB de ROM, 96kB de RAM e fornece uma solução versátil de baixo custo para aplicações de redes de sensores em comunicação sem fios. O nível elevado de integração ajuda a reduzir o custo total do sistema. O grande poder de processamento desse microcontrolador traz grandes vantagem ao nível de tráfego na rede, pois reduz esse mesmo tráfego ao explorar as potencialidades de processamento por ele oferecidas.

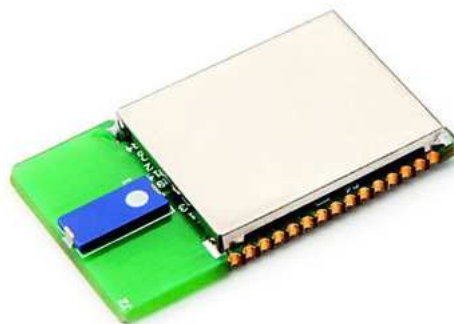


Figura 4.5 – Microcontrolador JN5139 falta por as legendas

O microcontrolador controla todos os blocos funcionais e respectivos periféricos, desde os conversores A/D (MCP3421 da Microchip), aos conversores DC-DC (MAX8715 da maxim), estes últimos, que fornecem a tensão necessária para o pulso de calor e permitem a leitura da tensão de referência assim como a energia gasta através dos seus conversores A/D internos.

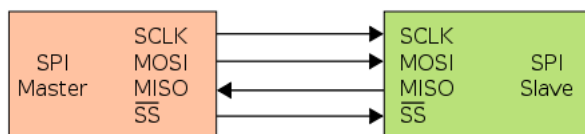


Figura 4.6 – Bus SPI de um *Master* e um *Slave*

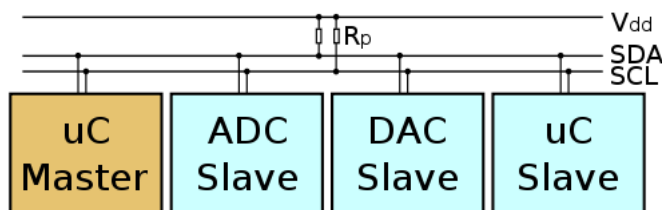


Figura 4.7 – Ligação I²C genérica

Este dispositivo incorpora dois protocolos de comunicação com os periférico, o protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*) e o protocolo I²C (*Inter-Integrated Circuit*). Na escolha do protocolo de comunicação pesaram alguns factores, o mais importante dos quais era utilizar o menor número possível de ligações entre o micro-controlador e os periféricos. Isto porque, como visto anteriormente, a ligação entre a sonda e a unidade central é feita através de fios e, então torna-se vantajoso diminuir a quantidade do número de fios de ligação.

O SPI é um protocolo de comunicação síncrono e opera no modo full-duplex este é composto por 4 ligações - duas ligações de controle e duas de comunicação de dados *cf.fig.* (4.6). O protocolo I²C apenas necessita de duas ligações, uma para o sinal de relógio e outra para a transmissão dos próprios dados *cf.fig.* (4.7). Tanto para o SPI como para o I²C não é tido em conta as ligações de alimentação, pois essa é transversal aos sistemas da sonda. Tendo então essas duas possibilidades integradas no sistema, optou-se pelo protocolo I²C para a comunicação com os periféricos devido à sua vantagem manifesta.

4.5 Comunicação e transmissão de dados

De um ponto de vista de transmissão de dados, cada sonda pode ser considerada um nó de uma rede composta, ou não, por vários nós. Sabe-se que os sistemas de sensores sem fios, para serem altamente eficientes, devem ser tão fiáveis como os sistemas cablados [26]. A arquitectura de rede mais adequada para proporcionar esta fiabilidade e autonomia necessária é a configuração de rede em malha *cf.fig.* (4.8).

Uma das discussões iniciais em termos de comunicação foi a escolha do protocolo mais adequado para o presente dispositivo. Protocolos como o IEEE 802.15.1 (*bluetooth*) revela-se mais orientado para as PANs (*Personal Area Network*) e possibilita altas taxas de transmissão de informação, ou então o protocolo IEEE 802.11 (vulgo *wireless*), assim como o *bluetooth*, também está orientado para grandes débitos com a diferença de ser orientado para LANs (*Local Area Network*) e não para PANs. Estes dois últimos protocolos trazem uma grande desvantagem ao nível de consumo, pois estão orientados para altos débitos de informação. Um terceiro protocolo IEEE 802.15.4, vulgarmente conhecido como *ZigBee*, demonstrou ser orientado para baixos débitos de informação e também baixo consumo energético, o que desde já representava uma vantagem. Para o dispositivo em questão, não se irá necessitar de grandes débitos, pois as leituras das propriedades térmicas são espaçadas no tempo, uma vez que o objectivo é poder transmitir as leituras ao longo do ano e não fazer uma transmissão intensa ao longo de dias. Logo, é desejável escolher um protocolo orientado para baixos débitos e baixos consumos. Através da avaliação desses três protocolos existentes e com provas de eficácia dadas em diversas publicações, escolheu-se o protocolo *ZigBee* como o melhor adaptado às nossas necessidades.

4.5.1 Topologia de rede proposta

O protocolo *ZigBee* foi desenvolvido especialmente para ser utilizado por um grande número de nós de sensores interligados numa topologia em malha *cf.fig.* (4.8). Sabe-se também que este protocolo é por excelência o protocolo mais utilizado e que tem demonstrado mais potencialidades na área de comunicação de sensores sem fios de baixo consumo e baixa taxa de transmissão de dados [26]. Uma rede em malha

é composta de vários nós que intercomunicam entre si e onde a informação pode tomar qualquer caminho através desses mesmo nós. Os nós podem funcionar como repetidores pois esses mesmos nós estão ligados a um ou mais nós, sendo possível transmitir dados de um nó a outro por diferentes caminhos.

O protocolo *ZigBee* funciona na faixa ISM (não requer licença para funcionamento), 2,4GHz. É um protocolo simples, orientado para baixas taxas de transmissão e para um reduzido consumo energético, o que se torna vantajoso, pois um dos objectivos dos sensores sem fios é a capacidade de permanecer activo por longos períodos de tempo, transmitindo ocasionalmente. Além disso, o tempo de acesso à rede é reduzido e os pacotes de dados que circulam na rede também são reduzidos. Essa rede também tem a qualidade de robustez, pois é capaz de se auto-gerir caso surja um novo nó, sendo possível assimilá-lo rapidamente, ou então, no caso inverso, quando um dos nós fica desabilitado, a restante rede rearranja os caminhos de informação para nenhum dos restantes nós ficar fora de alcance.

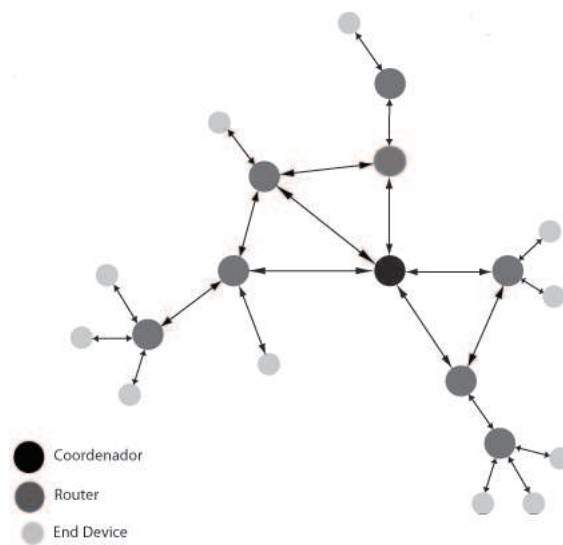


Figura 4.8 – Rede em malha

Resumidamente, para o nosso sistema teremos um coordenador que estará ligado por cabo a um computador e, através de uma rede sem fios, aos *end-devices* e *routers* dessa mesma malha. Os *end-devices* propriamente ditos farão unicamente as leituras

das características do solo, enquanto que os *routers* poderão fazê-lo, porém estão mais orientados para servir como encaminhadores de dados.

4.6 Software

Para o desenvolvimento do software, foi utilizado um ambiente de programação chamado *CodeBlocks* ilustrado na figura (4.9). Neste ambiente, é possível traduzir para código o algoritmo a ser implementado no microcontrolador. O programa, após ser compilado e testado nesse ambiente de desenvolvimento, é posteriormente descarregado através de uma ligação série *RS232* para o microcontrolador da *Jennic* JN5139. A interface inicial de testes para programação do chip foi feita através de uma placa fornecida pela *Jennic* com um cabo conversor de *RS232* para USB, como pode ver-se na figura (4.10). Tal como indicado na primeira secção do presente capítulo, o sensor deveria ser capaz de transmitir apenas a pedido. Após o desenvolvimento completo do hardware de suporte final para o presente trabalho todo o trabalho de programação passou a ser efectuado na placa de desenvolvimentos final *cf. fig.* (4.11).

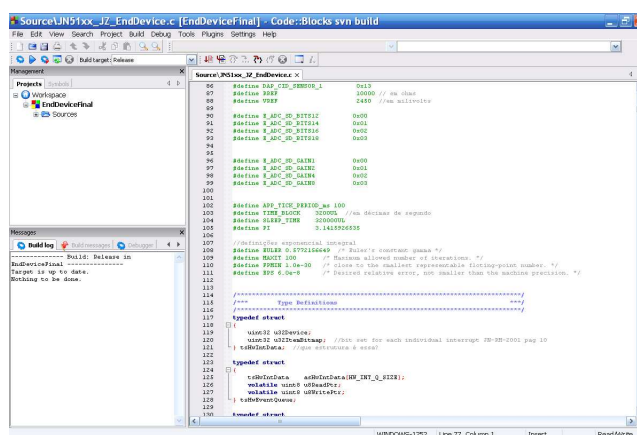


Figura 4.9 – Ambiente de trabalho do CodeBlocks.



Figura 4.10 – Placa de desenvolvimento da Jennic

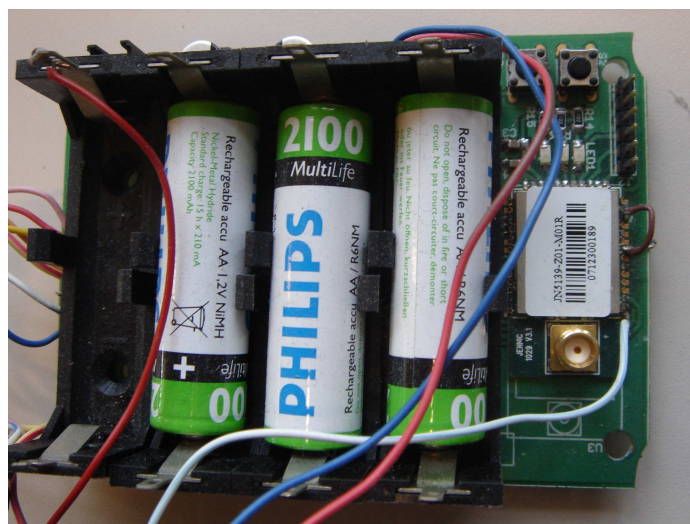


Figura 4.11 – Placa de desenvolvimento final

Configuração de Periféricos

A *Stack* do microcontrolador, permite que o sistema responda a pedido, através de uma função nativa de *ZigBee* chamada *JZA vZdpResponse*. Esta função gera uma interrupção que posteriormente é processada cada vez que é recebida uma transmissão por parte de outro *EndDevice*, *Router* ou mesmo *Coordenador*. Na leitura dos conversores A/D internos utilizou-se também uma função da *Stack* do microcontrolador. Relativamente aos conversores A/D para a medição da resposta em temperatura, utilizou-se conversores A/D externos da *Microchip*. Estes conversores

foram configurados para uma frequência de amostragem de quinze amostras por segundo e para comunicações em I²C.

Processamento de dados

Ao nível de processamento de informação, foram utilizados algoritmos de detecção de máximo, cálculo de exponencial integral e de operações ordinárias. Como resultado, o microcontrolador, está preparado para enviar apenas os valores das variáveis de interesse, sendo desnecessário um grande processamento de informação posterior. Para se efectuar o armazenamento de informação, o microcontrolador nunca deve ser desligado fisicamente, mas ao invés disso deve, sempre que necessário, manter-se num estado de baixo consumo (*sleep*) pré-definido pelo próprio fabricante.

Máquina de estados

Visto o programa de controlo do dispositivo ter sido desenvolvido em linguagem C, é necessário abordar a lógica da função principal por detrás do sistema. Para se efectuar um controlo adequado, foi implementada uma máquina de estados que reagia com o passar do tempo ou então com estímulos externos. No fundo, uma máquina de estados, é um conjunto de estados possíveis onde, em cada estado do sistema, é efectuada determinada operação através de funções. Essas funções podem variar desde funções para acordar ou hibernar o sistema passado determinado tempo, até funções que tratam da gestão das conexões com periféricos, periféricos esses, internos (caso dos conversores A/D, botões de interrupção e *LEDs*) ou externos (Conversores A/D da *Microchip* e conversor *STEP-UP* que liga ou não o aquecedor), funções específicas de cálculo numérico como por exemplo, o cálculo do integral exponencial, conversões, algumas funções específicas transmissão e recepção de dados e, finalmente, funções de temporização. Pode-se ver um exemplo dos estados definidos para a máquina do *End Device* na figura (4.12). Neste exemplo tem-se o estado **Init** que representa a inicialização da *stack* do *ZigBee* e do sistema operativo básico. O bloco seguinte **Start** representa as configurações tanto das ADCs como das DACs internas. Os três blocos seguintes, **Start DAC**, **Start ADC**, **Stop DAC** referem-se a activação e desactivação das DACs e ADCs externas para

a medição da temperatura de referência. Seguidamente em **Read EC** é-se lido a condutividade eléctrica do solo. Seguidamente nos estados

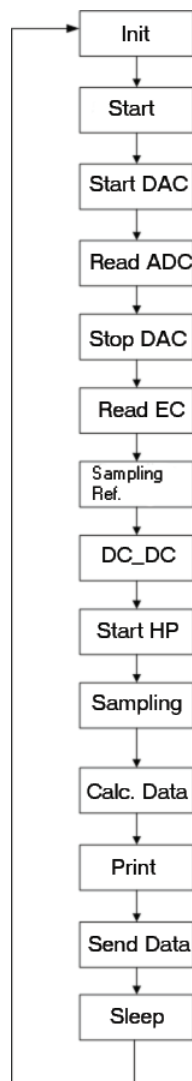


Figura 4.12 – Exemplo de máquina de estados no End Device

4.7 Gestão de energia

Um dos aspectos fundamentais deste trabalho era o desenvolvimento de um sensor autónomo. Para tal, o dispositivo será equipado com um conjunto de pilhas e pequeno painel fotovoltaico para recarregar essas mesmas pilhas. Visto a energia fornecida pelas pilhas ser limitada e a potência fornecida pelo painel ser reduzida face ao pleno funcionamento do dispositivo e visto também ser aleatória, dependendo do estado do tempo, é de extrema importância a eficácia energética do dispositivo. Para tal, ir-se-á utilizar um sistema de auto-hibernação, entre outros, isto é, o sistema será programado para recolher os dados pretendidos, enviá-los e posteriormente, hibernar. Uma das optimizações possíveis é reduzir a duração do pulso, visto esta operação ser a que mais energia despende juntamente com a transmissão dos dados. O tempo de duração do pulso será de oito segundos, como proposto por Mori *et al.* [9].

5

Resultados experimentais e discussão

Como visto anteriormente, com o dispositivo apresentado, os dados retirados do solo eram momentaneamente armazenados no sistema de processamento central do sistema, posteriormente estes enviados para a rede que, por sua vez, encaminharia estes mesmos dados para um sistema central de armazenamento, que poderia ser representado por um computador ou servidor. Este sistema possibilitava o acesso à informação por parte do administrador. A ligação ao computador (para programação, monitorização e *debugging*) tanto por parte do coordenador como pelo *End Device* era feito através de uma porta série ilustrada na figura (5.1).

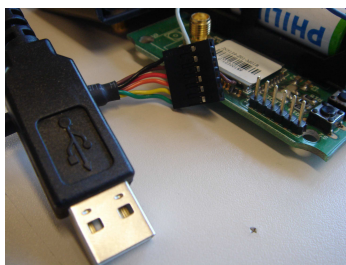


Figura 5.1 – ligação RS232 para USB

5.1 Análise dos dados

Após a recolha dos dados, estes tinham que ser analisados por duas razões. A primeira requeria que o dados fossem posteriormente tratados para o cálculo das diferentes variáveis, apesar do cálculo das variáveis ser parcialmente efectuado no próprio microprocessador. A outra razão era a verificação da fiabilidade dos dados através de ferramentas estatísticas. O tratamento estatísticos dos dados foi efectuado através de ferramentas informáticas bastante elaboradas pelo que não se tornava viável a codificação dos algoritmos por detrás dessas mesmas ferramentas informáticas. Foi efectuada uma pesquisa de diversas ferramentas para posteriormente decidir sobre a que trazia mais vantagens *versus* desvantagens.

Ferramentas informáticas

Para o tratamento estatístico dos dados, foram testadas algumas ferramentas informáticas como o *DataFit* da *Oakdale Engeneering*, o *Mathematica* da *Wolfram Research* e o *Matlab* da *MathWorks*. Para as soluções de aproximação de dados, a ferramenta que demonstrou maior eficácia e maior variedade no tratamento estatístico dos dados foi o *Matlab*. Foi utilizada a versão 2007b do *Matlab* na presente dissertação. Este programa possibilitou uma aproximação de curvas através da *toolbox* de *curve fitting* incorporada nesse mesmo programa.

5.1.1 Cálculo das Variáveis

Para o cálculo das diversas variáveis, utilizaram-se pequenos programas em linguagem C que implementavam tanto conversões como simples cálculos de média. Todos os cálculos foram postos à prova e verificados externamente. O cálculo do Exponencial Integral representava o passo com maior possibilidade de erro, pois necessitava de recorrer a funções internas do microprocessador, como a função de logaritmo e o exponencial neperiano e , assim como recorrer a ciclos para implementar a aproximação numérica a essa função.

Este algoritmo de cálculo foi adaptado a partir do algoritmo implementado no

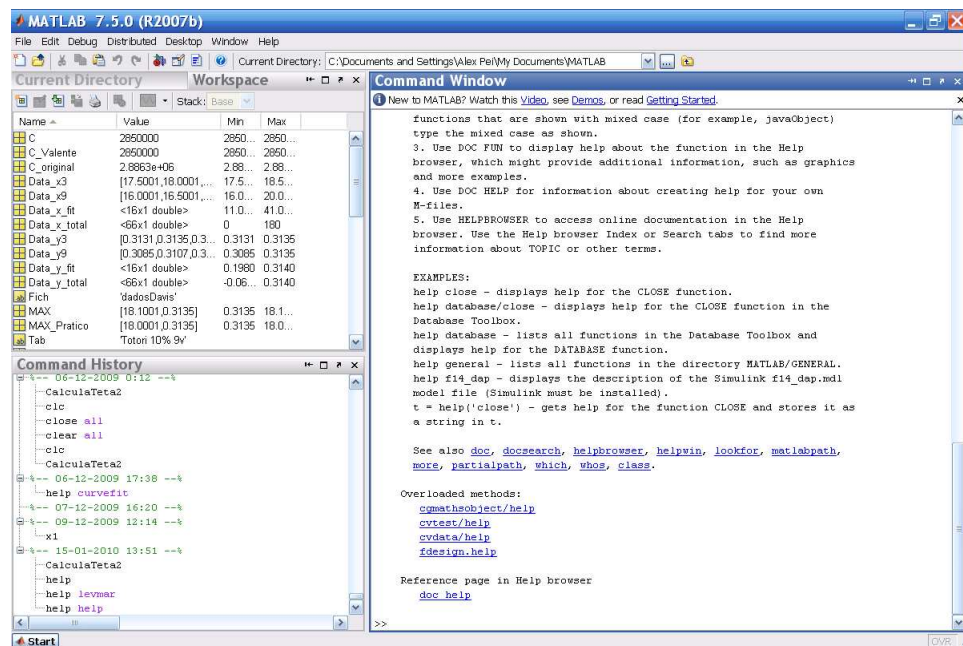


Figura 5.2 – Ambiente de trabalho do Matlab

livro *Numerical Recipes* [27]. A comparação dos resultados entre o algoritmo implementado no microcontrolador e o resultado do mesmo através da função do *Matlab* denominada `expint` demonstrou a validade e a precisão do algoritmo implementado no microcontrolador. A verificação foi feita através da comparação de resultados de ρ_c (capacidade térmica do solo). Essa verificação demonstrou que ambos os algoritmos coincidiam até à quinta casa decimal, iniciando a divergência na sexta casa decimal. Conclui-se que o algoritmo implementado no microcontrolador é preciso o suficiente para o cálculo das variáveis em questão.

Outro aspecto a ter em conta no cálculo das variáveis é a grande sensibilidade a erros devido às variações do raio considerado que representa a distância entre o aquecedor e o termistor. Bristow *et al.* [6] verificou que, para pequenas variações de r , ocorrem maiores variações de θ se tivermos em conta a equação (5.1). No entanto, o autor considera o erro pouco significativo. Quantificando, Bristow *et al.* verificou que um erro de medição do raio de 3,33%(6 mm a 5.8 mm) acarretava um erro de 7% no teor de água [6].

Apesar de no nosso caso ser utilizada a equação (2.8), pode-se notar que θ

também é grandemente dependente do raio r . Uma das verificações feitas foi que a alteração, ainda que pequena, de r , teve grande impacto no resultado final de θ .

$$\theta = \frac{\frac{q}{(\pi r^2 \Delta T_M e)} - \rho_b c_m}{\rho_W c_W} \quad (5.1)$$

5.1.2 Métodos utilizados

Para a determinação de θ , podem-se utilizar dois métodos possíveis. O primeiro consiste na determinação com precisão dos valores de t_M e ΔT_M , isto é, na determinação do valor máximo ou de pico. Outro método consiste em recorrer a ferramentas estatísticas e de otimização, como a aproximação de curvas através do método dos mínimos quadrados. Na presente secção serão abordados estes dois métodos apontando os seus resultados e também uma melhoria proposta ao método do ponto máximo, verificando posteriormente a sua eficácia face aos restantes métodos.

5.1.3 Método do ponto máximo

Como já visto no capítulo três, é possível calcular as características térmicas de determinado solo através da determinação do ponto máximo de uma curva (ΔT_M) de resposta em temperatura e do seu respectivo tempo de ocorrência (t_m). Pode-se verificar uma tabela com resultados obtidos através desse método na tabela (5.1).

Como é visível na tabela (5.1) os valores obtidos através do método do ponto máximo estão próximos dos valores reais esperados. Pode-se notar que os maiores erros ocorrem com uma exceção para solos secos. A razão desse fenómeno não ficou clara, porém uma causa possível pode estar no processo de secagem dos solos. Em teoria, o tempo ideal de secagem seria de 24 horas, no entanto, a secagem foi acelerada num forno industrial sendo este tempo de apenas vinte minutos.

Na tabela (5.1) estão representados os erros absolutos da medição dos solos. Note-se que em nenhuma das medições, inclusive para o solo seco, o erro absoluto ultrapassa os 10%.

Voltagem	Tipo de solo	Termistor 1	Erro(%) Th 1
9	Totori 0%	0,03811	3,8
	Totori 10%	0,10534	0,5
	Totori 20%	0,19768	0,2
	Totori 30%	0,26485	3,5
	Totori 39%	0,44704	5,7
	Columbia 0%	0,07162	7,2
	Columbia 15%	0,17365	2,4
	Columbia 25%	0,24633	0,4
	Columbia 35%	0,34941	0,1
	Columbia 45%	0,48006	3,0
12	Totori 0%	0,06359	6,4
	Totori 10%	0,10252	0,3
	Totori 20%	0,19645	0,4
	Totori 30%	0,29276	0,7
	Totori 39%	0,42989	4,0
	Columbia 0%	0,03722	3,7
	Columbia 15%	0,15574	0,6
	Columbia 25%	0,26010	1,0
	Columbia 35%	0,36832	1,8
	Columbia 45%	0,43410	1,6

Tabela 5.1 – Teor de água e erro associado ao método do ponto máximo

Voltagem	Tipo de solo	Termistor 1	Erro(%) Th 1
9	Totori 0%	0,03811	3,81
	Totori 10%	0,09654	0,35
	Totori 20%	0,18695	1,31
	Totori 30%	0,25385	4,62
	Totori 39%	0,43603	4,60
	Columbia 0%	0,07152	7,15
	Columbia 15%	0,17113	2,11
	Columbia 25%	0,24253	0,75
	Columbia 35%	0,34337	0,66
	Columbia 45%	0,47607	2,61
12	Totori 0%	0,06352	6,35
	Totori 10%	0,09379	0,62
	Totori 20%	0,18574	1,43
	Totori 30%	0,28123	1,88
	Totori 39%	0,41814	2,81
	Columbia 0%	0,03714	3,71
	Columbia 15%	0,15361	0,36
	Columbia 25%	0,25592	0,59
	Columbia 35%	0,36253	1,25
	Columbia 45%	0,43011	1,99

Tabela 5.2 – Teor de água e erro associado ao método do ponto máximo

5.1.4 Aproximação de curvas

A aproximação de curvas é um método de optimização utilizado para aproximar um modelo aos dados reais. Na aproximação a uma curva genérica, necessita-se de ter em consideração alguns factores como a banda de confiança e banda de previsão. Sabe-se que o objectivo final é obter uma curva que possa ser expressa por uma função pré-determinada o mais aproximada possível dos dados pontuais recolhidos.

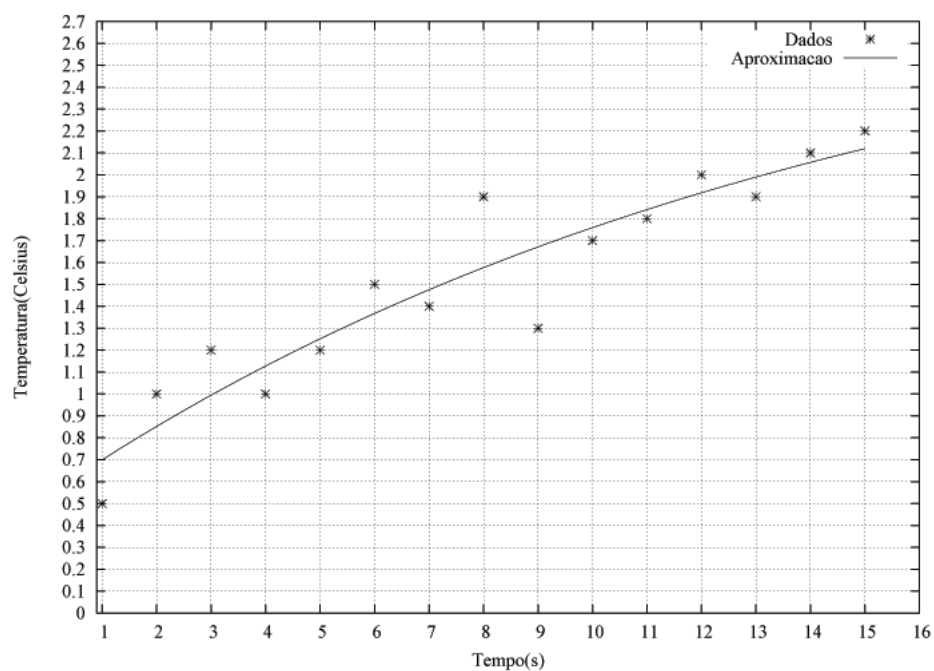


Figura 5.3 – Exemplo de uma aproximação genérica

Dos vários métodos de aproximação de curvas destacam-se os algoritmos de *Levenberg-Marquardt* e de *Trust-Region*, ambos embutidos na *Toolbox* do *Matlab* e ambos os algoritmos utilizam o método dos mínimos quadrados para efectuar as aproximações. Ambos os algoritmos foram testados para efectuar aproximações aos dados do solo. Apesar de em algumas situações o algoritmo de *Levenberg-Marquardt* mostrar vantagens e em outras situações ser o algoritmo de *Trust-Region*, nenhum dos algoritmos demonstrou vantagens significativas em termos globais. A

nota importante na preparação dos parâmetros para uma melhor aproximação foi a de que para ambos os métodos era necessário incluir valores iniciais próximos dos valores reais e limites muito ajustados para que os algoritmos não divergissem. Pela literatura sabe-se que esses algoritmos são utilizados em larga escala e com resultados satisfatórios [12, 15, 28]. Pode-se verificar a aproximação de uma curva utilizando os algoritmos de *Trust-Region* e *Levenberg-Marquardt* aos dados recolhidos com Agár aquando de uma tensão no pulso de 9 volts na figura (5.1.4).

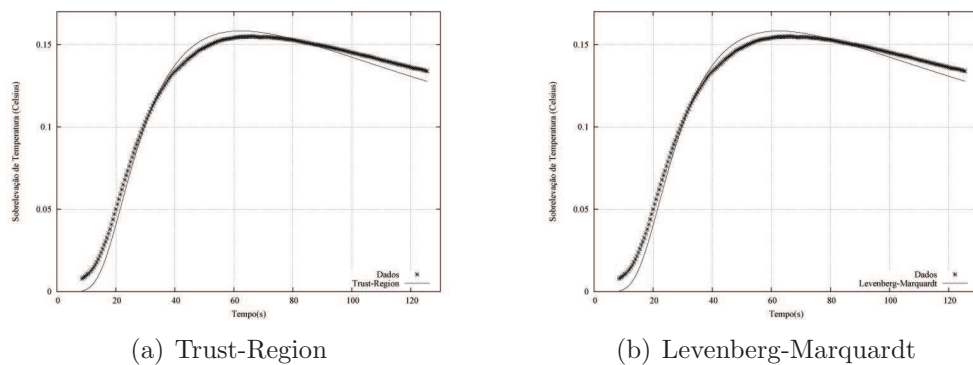


Figura 5.4 – Aproximação à curva de resposta da Agár

Numa primeira análise às imagens 5.4(a) e 5.4(b), pode-se verificar que ambas as aproximações têm resultados, se não iguais, muito próximos. Outro aspecto importante é que apesar de ambas as aproximações efectuadas se assemelharem aos dados reais, não se sobrepõem a eles completamente, o que significa que existe um desvio em ambas as aproximações ilustradas.

Visto não haver grande diferença ao nível dos resultados destes dois algoritmos optou-se pelo uso do algoritmo de *Levenberg-Marquardt* para se efectuar as aproximações aos dados.

A tabela (5.3) mostra o erro absoluto e os valores de teor de água aproximados utilizando o algoritmo de *Levenberg-Marquardt* para os tipos de solo testados.

No conjunto de figuras (5.5), pode-se ver várias aproximações para um conjunto de dados específico. Esses dados referem-se à resposta em temperatura do solo Totori com um teor de água de 20%.

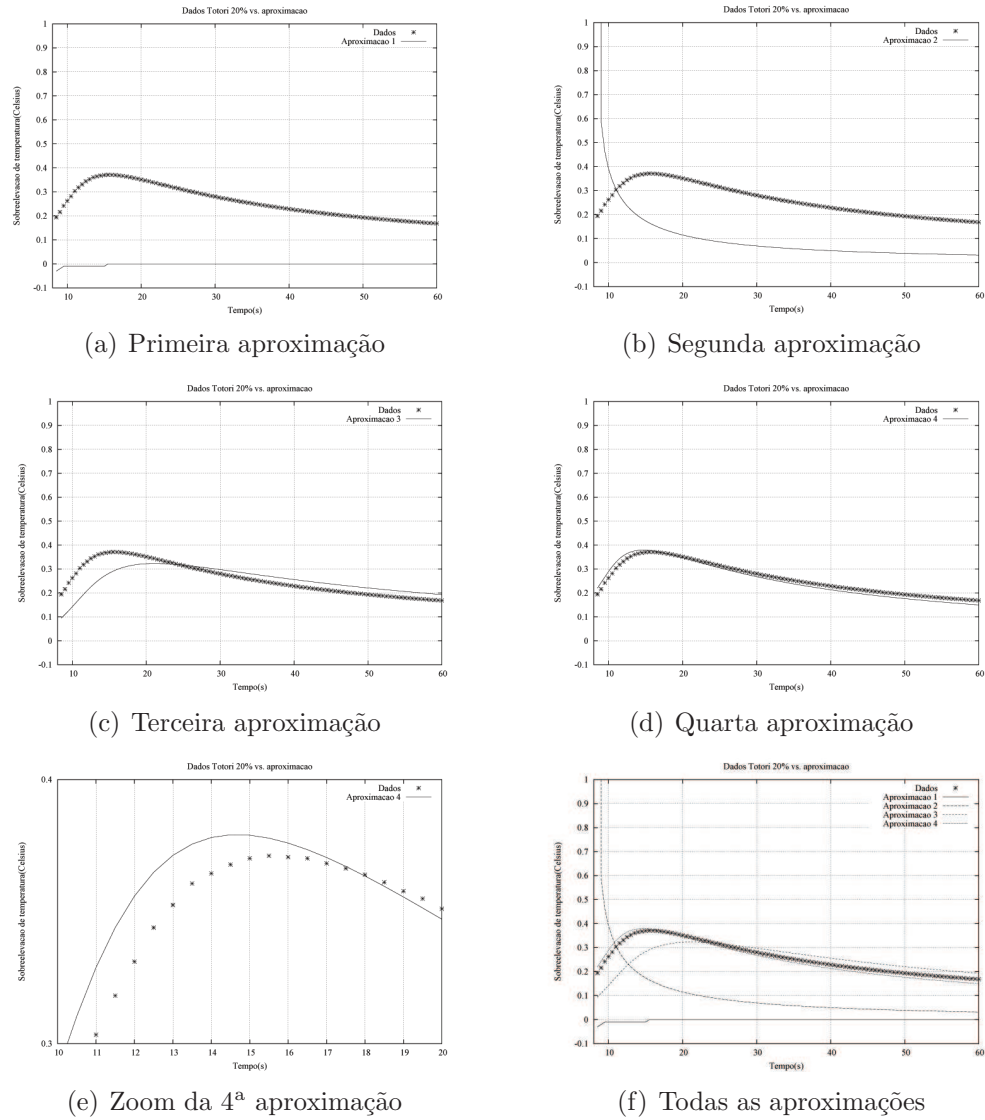


Figura 5.5 – Várias aproximações feitas utilizando o método de Levenberg-Marquardt

A figura 5.5(a) representa uma primeira aproximação onde os pontos iniciais (k e C) não são dados. Na figura 5.5(b), apenas é dado o ponto inicial correspondente a k . Na figura 5.5(c), pode-se ver o resultado da aproximação, sendo dado k e limitando-se o intervalo de possibilidades de C . Notar que para essa aproximação específica o algoritmo passa a ser de *Trust-Region*, pois o algoritmo de *Levenberg-Marquardt* não aceita limitações nos intervalos. Para a figura 5.5(d), são dados os

valores de C e k . Pode-se notar que, para esta última aproximação, as duas curvas têm o maior nível de convergência, por essa razão torna-se importante verificar em pormenor os desvios entre os dados recolhidos e os valores da aproximação na figura 5.5(e). Para fazer uma comparação grosseira do grau de exactidão entre os vários métodos, pode-se ver todas as aproximações anteriores num único gráfico representado na figura 5.5(f). Para o primeiro caso representado na figura 5.5(a) os valores aproximados são $C = 5868$ e $k = -5864$. Para o segundo caso, figura 5.5(b), obteve-se $C = 2932$ e $k = 0.003413$. Para o terceiro caso, figura 5.5(c), tem-se $C = 2.55e + 006$ e $k = 4.837e - 007$ e, finalmente, para o quarto e último caso, obteve-se $C = 2.129e + 006$ e $k = 8.457e - 007$. Todos esses resultados são para um intervalo de confiança de 95%. Para o quarto caso, o valor do teor de água resultante foi de $\theta = 21\%$, o que é um valor aceitável para os objectivos delineados. Por outro lado sabe-se que o valor real da capacidade térmica do solo C é igual a $2128760 \text{ (Jm}^{-3}\text{K}^{-1}\text{)}$ e $k = 3.1563E - 07$ e sabe-se que estes valores têm um erro inferior a 1% do valor real. Foram efectuadas algumas modificações na robustez do algoritmo *Trust-Region* e, também, no numero máximo de iterações do algoritmo sem se notarem alterações significativas nos resultados.

Voltagem	Tipo de solo	Teta aprox (θ)	Erro(%) Th 1
9	Totori 0%	-0,073	7
	Totori 10%	0,09	1
	Totori 20%	0,197	0
	Totori 30%	0,26	3,7
	Totori 39%	0,41	2
	Columbia 0%	-0,03	3
12	Totori 0%	-0,07	7
	Totori 39%	0,41	2

Tabela 5.3 – Resultado da aproximação feita pelo algoritmo de *Levenberg-Marquardt*

É notório que, na tabela (5.3), se pode observar que mais uma vez os resultados para o solo seco atingem os maiores valores de erro absoluto. Utilizando uma visão

global, pode-se notar que os resultados de erro são todos abaixo de 10% o que, mais uma vez, representa um objectivo conseguido.

Note-se que a qualidade dos dados recolhidos é elevada. Como visto anteriormente, os algoritmos de aproximação são excelentes abordagens para dados que contenham muito ruído, no entanto, para o presente caso não demonstraram ter grandes vantagens nesse campo, pois, pelo que é possível observar pela figura (5.1.4), não se conseguem vantagens significativas deste métodos na resolução do ponto máximo e respectivo tempo de ocorrência. Uma das conclusões a retirar desse resultado é que o sistema de aquisição tem um grau de sensibilidade e imunidade a ruídos elevado.

Foram também efectuados vários testes com diferentes abordagens de aproximação, no entanto, os que se destacaram com uma aproximação maior foram os algoritmos de *Trust-Region* e *Levenberg-Marquardt*. Para que a curva de aproximação fosse útil, foi necessário não só dar os valores iniciais, como também, em alguns casos, limitar os intervalos de possibilidades das variáveis.

Em conclusão, obter bons valores através da aproximação de curvas não é conseguido apenas com bons dados e o modelo apropriado. É importante também escolher o algoritmo mais apropriado. Ao efectuar aproximações não lineares, é de extrema importância ter em conta todas as informações disponíveis e verificar em última análise se a aproximação é realmente boa e faz sentido prático. É preciso lembrar que o algoritmo a ser utilizado não entende nada de biologia ou ciência dos solos e, em última análise, fica ao critério do especialista aceitar ou rejeitar os resultados, baseando-se nos seus conhecimentos e experiência [29, 30].

5.1.5 Algoritmo de ponderação

Outra abordagem utilizada para a melhoria dos dados recolhido foi a utilização de um algoritmo de escolha e ponderação dos dados recolhidos. Esse algoritmo consistia em escolher grupos de pontos com o valor máximo nas proximidades do pico e efectuar um cálculo de média para obter um tempo mais preciso de t_m .

Na tabela (5.4), estão representados os resultados das leituras de teor de água no solo e os respectivos erros associados. Mais uma vez são notórios os valores de erro elevados para o solo seco. Notar que apenas são mostrados os erros associados ao

Voltagem	Tipo de solo	Termistor 1	Erro(%) Th 1
9	Totori 0%	0,03806	3,8
	Totori 10%	0,09654	0,3
	Totori 20%	0,18695	1,3
	Totori 30%	0,25385	4,6
	Totori 39%	0,43692	4,7
	Columbia 0%	0,07155	7,2
	Columbia 15%	0,17121	2,1
	Columbia 25%	0,24253	0,7
	Columbia 35%	0,34380	0,6
	Columbia 45%	0,47619	2,6
12	Totori 0%	0,06353	6,4
	Totori 10%	0,09379	0,6
	Totori 20%	0,18574	1,4
	Totori 30%	0,28360	1,6
	Totori 39%	0,41427	2,4
	Columbia 0%	0,03716	3,7
	Columbia 15%	0,15361	0,4
	Columbia 25%	0,25592	0,6
	Columbia 35%	0,36273	1,3
	Columbia 45%	0,43046	2,0

Tabela 5.4 – Resultado da aproximação feita pelo algoritmo de ponderação

termístor um, isto porque os resultados de ambos os termístores estiveram sempre muito próximos. À primeira vista, este algoritmo não demonstra grandes melhorias face aos resultados anteriores no que toca à eliminação de erro, porém, ao nível de codificação e processamento, por ser um algoritmo simples e rápido, traz vantagens.

5.1.6 Comparação de dados

Ao analisar os dados acima descritos e apresentados, pode-se verificar que, apesar dos algoritmos de aproximação trazerem uma ligeira melhoria no resultados, nenhum dos métodos estudados demonstra ser especialmente eficaz na redução de erros associados às leituras. Por um lado, isso deve-se à grande qualidade do sistema de

aquisição e à qualidade de construção da sonda; por outro, o próprio método e modelo têm alguns erros associados que não dependem da tecnologia utilizada. Para uma análise mais precisa, pode-se verificar a tabela (5.5). Nesta tabela, pode-se ver a comparação dos erros absolutos para o método do ponto máximo utilizando o modelo inicialmente proposto por Campbell *et al.* [12]. A segunda coluna representa o mesmo método utilizando o modelo de *DeVries et al.* [10], a terceira coluna mostra os erros através do algoritmo de média ponderada desenvolvido e a quarta através do algoritmo de *Levenberg-Marquardt*. Esses erros são relativos às medições efectuadas em areia Totori com diversos teores de água e para um pulso de calor programado para uma tensão de 9 volts.

Termistor 1 (9v)				
Tipo de Solo	Pto Máx C.	Pto Máx V.	Alg. Pond.	Lev-Mar
Totori 0%	3,8	3,8	3,8	7
Totori 10%	0,5	0,3	0,3	1
Totori 20%	0,2	1,3	1,3	0
Totori 30%	3,5	4,6	4,6	4
Totori 39%	5,7	4,6	4,7	2

Tabela 5.5 – Erros associados as leituras com o solo Totori

Como é possível verificar, grosseiramente, todos os quatro métodos têm resultados semelhantes, no entanto é possível, notar que a aproximação através do algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, na maior parte dos casos, representa uma ligeira vantagem ao nível dos erros. Os valores para o algoritmo de média ponderada e do ponto máximo através da fórmula (2.8) de *DeVries et al.* têm um padrão muito semelhante. Pode-se verificar que, para alguns valores de teor de água os métodos do ponto máximo variam conforme o modelo utilizado, sendo por vezes melhor um modelo, outras vezes outro. O único método que se destaca ligeiramente na maioria dos valores é o método de aproximação.

Com os dados aqui testados e apresentados, pode-se concluir que não há um

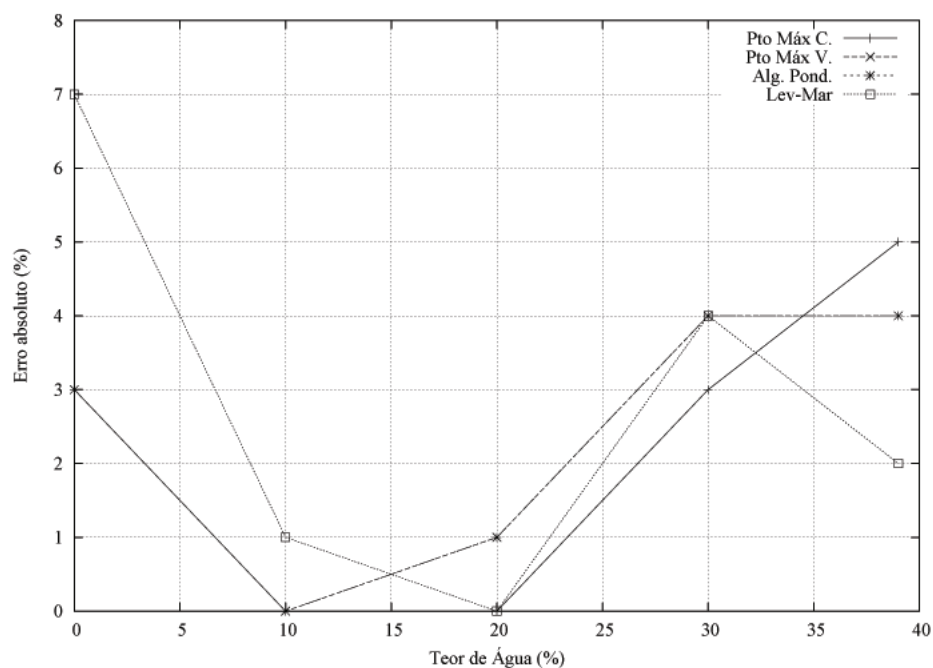


Figura 5.6 – Comparativo do erros absolutos para os vários métodos

método que seja relevantemente melhor, todos os três métodos trazem vantagens e desvantagens, porém isso apenas é verdade em termos estatísticos, pois, existem outros factores de origem económica e uso prático que necessitam também de ser ponderados.

6

Conclusões Finais e Trabalho futuro

Neste trabalho foi apresentada uma sonda multi-funcional com gestão de energia através de um painel solar, para a medição simultânea *in situ* do teor de água no solo, propriedades térmicas e condutividade eléctrica do solo, através de um sistema capaz de adquirir esses dados, processá-los através de um microcontrolador e transmiti-los por rádio-frequência, utilizando o protocolo *ZigBee*.

Alguns dos objectivos traçados no início desta dissertação foram alcançados, outros não revelaram eficácia e outros ainda foram ultrapassados. Os objectivos fundamentais propostos foram a concepção de uma sonda multi-funcional de baixo custo, flexível, autónoma e com comunicações sem fios. Para tal, implementou-se um sistema constituído por dois blocos principais, o primeiro contendo a unidade central constituída pelo microcontrolador com capacidades sem fios, painel solar e circuitos de gestão de energia. O segundo bloco é representado pelo sistema da sonda, onde reside toda a electrónica de aquisição e os métodos físicos de interacção com o solo, nomeadamente quatro agulhas paralelas constituídas por um aquecedor e termístores. Através da característica da sonda, era possível a leitura das propriedades térmicas e eléctricas do solo.

Outro aspecto importante foi o tratamento dos dados adquiridos. Estes demonstraram estabilidade e exactidão suficientes para fazer desse dispositivo um sério

candidato a protótipo para futuros desenvolvimentos. Com isto pode-se dizer que já é possível obter as características térmicas do solo com margens de erro aceitáveis e que a técnica do pulso de calor provou mais uma vez ter boas hipóteses de ser uma técnica massificada nos meios de produção agrícola. É importante dizer que, apesar da qualidade dos resultados, serão necessários desenvolvimentos, quer na tecnologia, quer nos modelos de base, para atingir um grau de excelência por parte de um dispositivo do género.

A utilização com eficácia de um pulso de calor com 9 V ao invés de 12 V, normalmente utilizado na literatura, permite a diminuição dos consumos do dispositivo e respectivo aumento da sua autonomia, sem descurar a qualidade dos dados.

A escolha de métodos estatísticos complexos e lentos de análise de dados *versus* algoritmos mais rápidos e simples é precisa de ser ponderada. Segundo os resultados obtidos na presente dissertação, conclui-se sobre os métodos de análise de dados que se podem tomar duas vias. A primeira é através da utilização do método do ponto máximo, com ou sem ponderação. Este método demonstrou obter resultados com uma qualidade muito próxima dos métodos de aproximação. A segunda, é a utilização de algoritmos de aproximação de dados como o de *Levenberg-Marquardt*, e outros do género, que demonstram ser robustos e eficazes, porém, com os inconvenientes associados ao consumo de energia, incerteza dos valores iniciais e tempo gasto.

Para a presente configuração de sistema, conclui-se que o método de análise de dados mais indicado é o método do ponto máximo. A principal razão para tal é que este método consegue obter os mesmo resultados que os complexos métodos de aproximação com menos custo. Uma das razões apontadas reside na qualidade das ADC utilizadas, pois estas mostraram grande imunidade ao ruído. Sabe-se que o método do ponto máximo é mais simples e, por conseguinte, mais rapidamente processado, por outro lado, os métodos estatísticos de aproximação de curvas, como o algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, são complexos e, devido ao grande número de iterações, tornam-se mais lentos e consequentemente maiores consumidores de energia. Sabe-se que para dados com muito ruído esses algoritmos são muito eficazes, no entanto, é da minha opinião que, no presente caso não revelaram ter uma vantagem

decisiva. Outro inconveniente é o de que esse tipo de método requer a determinação dos parâmetros iniciais com alguma exactidão correndo o risco de divergirem.

A transmissão sem fios de dados utilizando o protocolo adequado, possibilita que a sonda multi-funcional possa transmitir remotamente os dados e, permite que o utilizador, faça uma monitorização constante das variáveis físicas, evitando assim deslocações desnecessárias.

O método adoptado para a medição da condutividade eléctrica revelou algumas lacunas, de modo que o sistema de medição deverá ser reconsiderado para colmatar as influências verificadas nos resultados da medição da mesma. Uma das causas prováveis da grandeza de erros no presente dispositivo poderá estar relacionada com a utilização de ADC internas do microcontrolador que não têm os mesmos padrões de sensibilidade e rigor das restantes ADC. No entanto, a impossibilidade de leitura de valores aceitáveis na condutividade eléctrica não impossibilitou a medição de outros valores de características térmicas e teor de água do solo, uma vez que a condutividade eléctrica seria apenas um indicador qualitativo do teor de água.

Vários requisitos foram ponderados de modo a que a solução implementada constituísse um contributo válido na gestão de explorações agrícolas, nomeadamente no tocante a alimentação através de bateria, electrónica de aquisição, gestão de energia da sonda, microcontrolador com comunicações para o exterior sem fios, capacidade de interligação em rede com outras unidades e portabilidade do sistema. A utilização de uma estaca para o suporte da unidade central tornou-se mais eficaz a transmissão de dados, evitando interferências devido a um posicionamento rasteiro da antena.

As suas reduzidas dimensões proporcionam inúmeras vantagens de aplicação, desde medições mais localizadas até à massificação em grande escala em vastas áreas agrícolas. Devido às suas características é possível efectuar medições de teor de água nas proximidades das raízes da planta, o que proporciona ao dispositivo uma aplicação eficaz no controlo de irrigação.

Perspectivas de trabalho futuro

Desenvolver um sistema de agulhas mais robusto torna-se imperativo para o uso corriqueiro do equipamento. Sabe-se que é necessário um grande cuidado ao inserir

as agulhas na terra, pois é essencial que tais agulhas se mantenham paralelas, uma vez que pequenas alterações no espaçamento entre agulhas podem acarretar grandes erros de medição no teor de água [6, 11]. Outro aspecto a ser melhorado é um sistema de compactação adequado para a eliminação, tanto quanto possível, de espaços vazios entre as agulhas e o solo [11].

Outro desafio ainda por ultrapassar é a exactidão dos dados. Com o equipamento actualmente disponível no mercado e recorrendo a estratégias de aproximação de dados, os erros de medição máximos são de 10%. Uma análise breve indica que os pequenos melhoramentos que os diversos equipamentos constituintes da sonda podem fornecer, não parecem ser os principais factores de melhoramento dos resultados. Creio que a melhoria dos modelos matemáticos utilizados para o cálculo das variáveis, assim como métodos alternativos, por exemplo, uma abordagem mais numérica, deverão ser os caminhos possíveis a seguir para a contínua redução do erro.

Métodos alternativos de medição de condutividade eléctrica do solo também deverão ser pensados, assim como a utilização de ADC externas com maior robustez e sensibilidade.

Algoritmos simples e mais eficazes de análise de dados também seriam de especial relevo na determinação precisa do ponto máximo da curva, permitindo ao dispositivo transmitir apenas os resultados finais. A redução de tráfego de dados na rede como consequência desses algoritmos permitiria um maior tempo de vida da bateria e menor custo de gestão de rede por parte dos *routers*.

Uma das grandes possibilidades de evolução em termos energéticos verifica-se na optimização de energia por parte do microcontrolador, visto haver no mercado microcontroladores mais eficientes do que o presentemente utilizado.

Outra possibilidade a ser desenvolvida é a capacitação do nó-sensor em actuar noutros sistemas actuadores como torneira automáticas de rega ou verificadores de caudal de água, tornando assim mais autónomo e inteligente o processo de gestão agrícola.

Finaliza-se esta dissertação com a convicção de que o trabalho apresentado pode constituir mais uma possibilidade para a evolução e melhoria da gestão dos processos

agrícolas. A expectativa é a de que este sistema possa um dia ter utilidade comercial.

Bibliografia

- [1] W. Treese, “The coming of sensor networks,” *netWorker*, vol. 8, no. 2, pp. 15–17, 2004.
- [2] Zhou, Y. Yang, X. Guo, X. Zhou, M. Wang, and Liren, “A design of greenhouse monitoring and control system based on zigbee wireless sensor network,” in *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference*, pp. 2563–2567, September 2007.
- [3] C. A. Serodio, J. Monteiro, and C. Couto, “An integrated network for agricultural management applications,” in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility , America: Denver.*, vol. 2, pp. 679–683, 1998.
- [4] Y. Mori, J. Hopmans, A. Mortensen, and G. Kluitenberg, “Estimation of vadose zone water flux from multi-functional heat pulse probe measurements,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 69, p. 599, 2005.
- [5] A. Valente, R. Morais, A. Tuli, J. Hopmans, and G. Kluitenberg, “Multi-functional probe for small-scale simultaneous measurements of soil thermal properties and water content and and electrical conductivity,” *Sensors & Actuators: A. Physical*, vol. 132, pp. 70–77, 2006.

- [6] K. L. Bristow, C. G. S., and C. K., "Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content," *Soil Science Society of America journal*, vol. vol. 57, no. no4, pp. pp. 930–934, 1993.
- [7] G. J. Kluitenberg, J. M. Ham, and K. L. Bristow, "Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity," *Soil Sci. Soc. Am.*, vol. 57, pp. 1444–1451, 1993.
- [8] S. M. Welch, G. J. Kluitenberg, and K. L. Bristow, "Rapid numerical estimation of soil thermal properties for a broad class of heat-pulse emitter geometries," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 7, pp. 932–938, February 1996.
- [9] Y. Mori, J. W. Hopmans, A. P. Mortensen, and G. J. Kluitenberg, "Multi-functional heat pulse probe for the simultaneous measurement of soil water content and solute concentration andand heat transport parameters," *Vadose Zone Journal*, vol. 2, pp. 966–978, 2003.
- [10] D. DeVries and A. Peck, "On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils: I. extension of theory and discussion of probe characteristics," *Australian Journal of Physics*, vol. 11, pp. 255–271, 06 1958.
- [11] K. L. Bristow, G. J. Kluitenberg, C. J. Goding, and T. S. Fitzgerald, "A small multi-needle probe for measuring soil thermal properties, water content and electrical conductivity," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. vol. 31, pp. 265–280, 2001.
- [12] G. S. Campbell, C. C., and W. J. H., "Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method," *Soil Science Society of America journal*, vol. vol. 55, pp. pp. 291–293, 1991.
- [13] K. L. Bristow, B. J. R., K. G. J., and H. R., "Comparison of techniques for extracting soil thermal properties from dual-probe heat-pulse data," *Soil science (Soil sci.)*, vol. vol. 160, no. no1, pp. pp. 1–7, 1995.

- [14] K. L. Bristow, K. G. J., and H. R., “Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique,” *Soil Science Society of America journal*, vol. 58, no. no5, pp. 1288–1294, 1994a.
- [15] K. Bristow, R. White, and G. Kluitenberg, “Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating,” *Aust. J. Soil Res*, vol. 32, pp. 447–464, 1994b.
- [16] C. Serôdio, J. Cunha, R. Morais, C. Couto, and J. Monteiro, “A networked platform for agricultural management systems,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. Vol. 31, No. 1, pp. 75–90, March 2001.
- [17] J. Hill and D. Culler, “Mica: A wireless platform for deeply embedded networks,” *IEEE micro*, vol. 22, no. 6, pp. 12–24, 2002.
- [18] B. OFlynn, S.Bellis, K.Delaney, J.Barton, S. OMathuna, A. M. Barroso, J.Benson, U.Roedig, and C.Sreenan, “The development of a novel miniaturized modular platform for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, no. 49, IEEE Press, 2005.
- [19] J. Tarara and J. Ham, “Measuring soil water content in the laboratory and field with dual-probe heat-capacity sensors,” *Agronomy Journal*, vol. 89, pp. 535–541, 1997.
- [20] H. Zhang, L. He, G. Z. S. Cheng¹, and D. Gao, “Approaches to extract thermal properties from dual-thermistor heat pulse experimental data,” *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, vol. 15, pp. 221–2261, 2004.
- [21] Y. Song, M. Kirkham, J. Ham, , and G. Kluitenberg, “Dual probe heat pulse technique for measuring soil water content and sunflower water uptake,” *Soil & Tillage Research*, vol. vol. 50, pp. 345–348, 1999.

- [22] R. Morais, A. V. C. Couto, and J. Correia, “A wireless rf cmos mixed-signal interface for soil moisture measurements,” *Sensors and Actuators*, vol. 115, pp. 376–384, 2004.
- [23] J. p. Molin, L. m. Gimenez, V. pauletti, U. schmidhalter, and J. hammer, “Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção,” *Eng. Agríc., Jaboticabal*, vol. 25, pp. 420–426, 2005.
- [24] Rhoades, Raats, and Prather, “Effects of liquid-phase electrical conductivity and water content and and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. Vol. 40 and No. 5, pp. 651–655, September-October 1976.
- [25] V. A. Machado, “Desenvolvimento de hardware para uma sonda multifuncional de medição simultânea do conteúdo de Água, propriedades térmicas e condutividade elétrica do solo,” Master’s thesis, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2008.
- [26] M. Upal Mahfuz and K. Ahmed, “A review of micro-nano-scale wireless sensor networks for environmental protection: Prospects and challenges,” *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 6, pp. 302 – 306, June 2005.
- [27] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2 edition ed., October 30 1992.
- [28] G. Kluitenberg, J. Ham, and K. Bristow, “Error analysis of heat pulse method for measuring soil heat capacity, diffusivity and conductivity,” *Soil Sci. Soc. Am. j.*, vol. vol. 59, pp. pp. 719–726, 1995.
- [29] B. D. McCullough, “The accuracy of mathematica 4 as a statistical package,” *Journal of Computational Statistics*, vol. 15, pp. 279–299, 2000.

-
- [30] I. Brooks, “Fitting experimental data with mathematica,” tech. rep., Wolfram Research.