



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa

## **GolfSense**

**Sistema de monitorização de campos de Golf com redes de  
sensores**

**JOÃO LUÍS CAMPOS VICENTE**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**ENGENHARIA DE REDES DE COMUNICAÇÕES**

### **Júri**

Presidente: Prof. Doutor Rui Jorge Morais Tomaz Valadas  
Orientador: Prof. Doutor Rui Manuel Rodrigues Rocha  
Co-Orientador: Prof. Doutor Rui Ferreira Neves  
Vogal: Prof. Doutor Paulo Pereira

**Outubro de 2009**



*Esta dissertação é dedicada ao meu Avô Luís.*

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores Professor Rui Rocha e Professor Rui Neves por todo o apoio que me deram e sem o qual este projecto não teria sido possível.

Gostaria de agradecer também, e em especial, ao meu colega Sérgio Santos, com o qual foi sempre um prazer trabalhar ao longo de todo o curso, o apoio durante este projecto. Agradeço também ao grupo de amigos que acabou por se consolidar durante este último ano de faculdade devido ao suporte que cada um sempre deu aos outros quando foi necessário, são eles: David Figo, Filipe Paredes, Gonçalo Teixeira e Sérgio Santos.

Gostaria ainda de agradecer ao Professor Pedro Leão do Instituto Superior de Agronomia e ao Engenheiro Jorge Marcelo, responsável pelo campo de golfe *Oeiras Golf & Residence*, pela sua colaboração imprescindível na análise de requisitos deste projecto. Agradeço também ao Professor Moisés Piedade toda a ajuda dispensada na fase de desenho e especificação da placa de hardware desenvolvida neste trabalho e ao Sr. José Pina a sua colaboração no processo de soldagem dos componentes desta placa.

Acima de tudo, agradeço aos meus Pais, e a toda a minha família, o apoio que me deram até hoje e que sei me irão continuar a dar.



## **Resumo**

Os sistemas de monitorização ambiental actualmente utilizados em grande parte dos campos de golfe recorrem apenas a uma única estação meteorológica. Esta estação só permite obter dados gerais sobre as condições climatéricas da região onde se encontra instalado o campo. Esta dissertação propõe uma aplicação de monitorização ambiental que, ao monitorizar continuamente, e em tempo real, o estado do solo em todas as zonas de um campo de golfe, permite obter uma compreensão mais detalhada sobre as necessidades hídricas da relva e sobre o comportamento hidrológico de cada solo.

Para além de recolher dados que permitem caracterizar o estado do solo, a aplicação desenvolvida permite modificar a frequência com que são realizadas medições e com que estas medições são transmitidas para o nó de processamento final. Esta possibilidade permite realizar medições mais frequentes numa fase inicial, quando ainda não se conhece com precisão o comportamento hidrológico do solo a estudar, enquanto que numa fase posterior poderão ser realizadas medições menos frequentes poupando recursos. Visto que a alteração da frequência de medição é dinâmica, esta também poderá ser alterada para melhor monitorizar fenómenos que alterem o estado do solo rapidamente (e.g. chuva).

Adicionalmente, ao permitir definir o estado em que se encontra cada um dos nós da rede (Modo Rega ou Modo Normal), esta aplicação encontra-se preparada para no futuro controlar o sistema de rega de um campo de golfe.

## **Palavras-chave**

Redes de Sensores Sem Fios, Monitorização Ambiental, Gestão e Controlo da Irrigação, Campos de Golfe

## **Abstract**

The environmental monitoring systems currently installed on most golf courses make use of a single weather station. This station only gives general data about the weather conditions of the region where the course is located. This dissertation proposes an environmental monitoring application, based on the concept of Wireless Sensor Networks (WSNs), that allows to continuously monitor the soil condition in real time on all the zones of a golf course making possible to obtain a more detailed vision on the water needs of the grass and of the hydrological behaviour of each soil.

The proposed application also allows the modification of the frequency by which the measurement samples are taken and the corresponding information is transmitted to the final processing node. This facility enables the realisation of more frequent measurements at an early stage, when the hydrological behaviour of the studied soil isn't yet known, whereas at a later stage measurements can be performed less frequently in order to save resources. Since the change in measurement frequency is dynamic, it may also be modified to better monitor phenomena that affect the state of the ground quickly (e.g. rain).

Additionally, by maintaining (and making possible to modify) a state in each of the nodes of the network (Irrigation Mode or Normal Mode), this application is prepared to control the irrigation system of a golf course in the future.

## **Keywords**

Wireless Sensor Networks, Environmental Monitoring, Irrigation Management and Control, Golf Courses

# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Palavras-chave.....	ii
Abstract .....	iii
Keywords.....	iii
Índice .....	iv
Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas .....	viii
Acrónimos .....	ix
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e Objectivos .....	5
1.2 Contribuições .....	6
1.3 Organização da Tese.....	6
<b>2. Aspectos Tecnológicos Relevantes das Redes de Sensores Aplicadas à Monitorização Ambiental .....</b>	<b>9</b>
2.1 Eficiência Energética .....	9
2.2 Localização .....	11
2.3 Reactividade.....	13
2.4 Robustez .....	14
2.5 Proactividade.....	14
<b>3. Estado da Arte.....</b>	<b>17</b>
3.1 Gestão da Rega sem redes de sensores.....	17
3.2 Aplicação de redes de sensores à monitorização de parâmetros ambientais .....	18
3.2.1 Vineyard Computing .....	19
3.2.2 Life Under Your Feet .....	21
3.2.3 Wireless Sensor Network for Variable Rate Irrigation in Citrus .....	22
3.2.4 COMMON-Sense Net.....	23
3.2.5 PermaSense .....	25
3.2.6 Wireless Underground Sensor Networks (WUSN).....	26
3.3 Análise Comparativa na perspectiva dos aspectos tecnológicos relevantes .....	28
3.3.1 Eficiência Energética .....	29
3.3.2 Localização.....	31
3.3.3 Reactividade.....	32
3.3.4 Robustez .....	32
3.3.5 Proactividade.....	33
3.4 Conclusões.....	34
<b>4. Análise de Requisitos e Concepção da Solução .....</b>	<b>35</b>
4.1 Requisitos e Objectivos.....	35
4.1.1 Situação Actual.....	35
4.1.2 Requisitos Funcionais .....	37
4.2 Estudo de Instalação dos nós sensoriais num campo de golfe .....	39
4.2.1 Superfície plana com relva de green.....	40
4.2.2 Receptor no <i>Satélite</i> do sistema de rega .....	43
4.2.3 Emissor dentro de caixa de sistema de rega .....	44
4.3 Arquitectura do Sistema .....	47

4.4	<i>Algoritmo de Medição e Actuação</i> .....	51
<b>5.</b>	<b>Implementação de Referência</b> .....	<b>57</b>
5.1	<i>Arquitectura de Referência</i> .....	57
5.1.1	<i>Componentes</i> .....	57
5.2	<i>Interface com o programa GolfWater</i> .....	65
<b>6.</b>	<b>Teste e Avaliação</b> .....	<b>67</b>
6.1	<i>Testes funcionais ao algoritmo de medição e actuação</i> .....	68
6.2	<i>Medição e Transmissão de valores de Humidade do Solo</i> .....	69
6.3	<i>Medição da Tensão das Baterias</i> .....	71
6.4	<i>Teste de Longa duração em Jardim ao Ar Livre</i> .....	72
6.5	<i>Performance Energética</i> .....	75
<b>7.</b>	<b>Conclusões</b> .....	<b>77</b>
7.1	<i>Trabalho Futuro</i> .....	78
	<b>Referências</b> .....	<b>79</b>
	<b>Anexos</b> .....	<b>83</b>

# Índice de Figuras

Figura 1 – Funcionamento de um aquífero.....	3
Figura 2 – Consequências da sobre exploração da água existente no subsolo.....	3
Figura 3 – Evolução da área disponível para agricultura per capita a nível mundial.....	4
Figura 4 – Arquitecturas de redes sem fios de sensores/actuadores [22].....	15
Figura 5 – Arquitectura genérica das redes de sensores .....	19
Figura 6 – Arquitectura do projecto Vineyard Computing [12].....	20
Figura 7 – Arquitectura do projecto Life Under Your Feet [27] .....	22
Figura 8 – Arquitectura do projecto Wireless Sensor Network for Variable Rate Irrigation in Citrus [29] .....	23
Figura 9 – Arquitectura do projecto COMMON-Sense Net [30].....	25
Figura 10 – Arquitectura do projecto PermaSense [28].....	26
Figura 11 – Topologia Subterrânea .....	28
Figura 12 – Topologia Híbrida .....	28
Figura 13 – Satélite de Controlo e Aspersor do Campo de Golfe estudado.....	36
Figura 14 – Cenário de testes com relva de green em superfície plana .....	41
Figura 15 – Potência recebida e percentagem de pacotes recebidos.....	42
Figura 16 – Possíveis locais para a instalação de nós num campo de golfe .....	43
Figura 17 – Receptor instalado sobre o satélite .....	43
Figura 18 – Potência recebida e percentagem de pacotes recebidos.....	44
Figura 19 – Emissor dentro de caixa de sistema de rega.....	45
Figura 20 – Potência recebida e percentagem de pacotes recebidos.....	46
Figura 21 – Comunicação com e sem linha directa entre emissor e receptor.....	47
Figura 22 – Arquitectura do Sistema .....	51
Figura 23 – Diagrama de actividade da aplicação GolfSense que se executa no NPF .....	53
Figura 24 – Diagrama de actividade da aplicação GolfSense que se executa no nó remoto .....	54
Figura 25 – Mote MicaZ da Crossbow [37].....	58
Figura 26 – Placa Sensorial frente e verso.....	58
Figura 27 – Desenvolvimento da Placa Sensorial .....	61

Figura 28 – Sensor Capacitivo ECH2O EC-5 .....	61
Figura 29 – Circuito equivalente do sensor capacitivo ECH2O EC-5 .....	62
Figura 30 – Curvas de carga/descarga de dois condensadores com diferentes permissividades .....	63
Figura 31 – Comunicação GolfSense/GolfWater .....	65
Figura 32 – Arquitectura do Cenário de Testes .....	67
Figura 33 – Interface Gráfica GolfSense .....	68
Figura 34 – Variação da humidade do solo a 3 profundidades diferentes.....	70
Figura 35 – Temperaturas medidas pelos 3 nós remotos em graus Celsius (°C) .....	73
Figura 36 – Humidades medidas pelos 3 nós remotos em % .....	74
Figura 37 – Relação entre a humidade (%) e a temperatura (°C) medidas pelo Nó Remoto 1.....	75
Figura 38 – Comparação da performance energética de dois nós remotos.....	76

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Consumos de Energia de Life Under Your Feet e PermaSense .....	31
Tabela 2 – Características das zonas relvadas de um campo de golfe .....	37
Tabela 3 – Resultados dos testes funcionais ao algoritmo descrito em 4.4 .....	69
Tabela 4 – Parâmetros do teste de medição da humidade do solo.....	70
Tabela 5 – Resultados do teste de medição da tensão das baterias .....	72

## Acrónimos

AC	Alternating Current
CPU	Central Processing Unit
CSV	Comma-separated values
DC	Direct Current
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
I/O	Input/Output
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LCD	Liquid Crystal Display
MAC	Medium Access Control
MULE	Mobile Ubiquitous LAN Extensions
NPF	Nó de Processamento Final
PLC	Power Line Communication
PVC	Polyvinyl Chloride
RS	Redes de Sensores (sem fios)
SPI	Serial Peripheral Interface
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
VWC	Volumetric Water Content
WLAN	Wireless Local Area Network



# 1. Introdução

O desenvolvimento tecnológico nas áreas da micro electrónica e comunicações sem fios permitiu a criação de uma nova classe de dispositivos designados por nós sensoriais (por vezes também designados por motes). Cada um destes nós sensoriais é normalmente constituído por um processador, memória, sensores e/ou actuadores e um rádio sem fios que lhe permite comunicar com outros nós semelhantes a ele, formando uma rede sem fios de sensores inteligente, tal como descrito em [1].

De uma forma geral os nós que constituem uma rede sem fios de sensores são alimentados por baterias e têm um baixo custo de fabrico, pelo que as suas capacidades energéticas e de processamento individuais são limitadas. Por este motivo um dos maiores desafios das redes sem fios de sensores (normalmente designadas pela abreviatura “redes de sensores”) está na criação de mecanismos de cooperação entre os nós da rede de modo a que a rede no seu conjunto tenha a capacidade para resolver problemas de forma mais eficiente do que se os nós operassem de forma independente.

As redes de sensores são o culminar de duas tendências que se têm vindo a verificar desde os anos 60 até aos dias de hoje: a diminuição da relação preço/performance dos sistemas computacionais e a generalização da conectividade entre todos os sistemas.

Em 1964 a IBM lançou o System/360, o primeiro mainframe de venda generalizada, cujo preço e dimensão levaram a que o paradigma fosse o de “um computador, múltiplos utilizadores”. A conectividade entre sistemas computacionais não era ainda uma preocupação. No final da década de 70 começaram a surgir os primeiros computadores pessoais lançados pela Apple, IBM e Texas Instruments que alteraram o paradigma para “um computador, um utilizador”. No final dos anos 80, início dos anos 90 o sucesso extraordinário dos telemóveis e da Internet trouxe a conectividade para a ordem do dia. Mais recentemente as redes sem fios suportadas nas normas IEEE 802.11 e as redes móveis de 3ª geração estão progressivamente a substituir as anteriores soluções cabladas e a potenciar o aparecimento de novos produtos e serviços baseados numa conectividade permanente. É neste contexto de descentralização do processamento e de omnipresença da conectividade que surgem as redes de sensores.

Estas redes sem fios de sensores inteligentes oferecem inúmeras vantagens sobre os tradicionais sistemas de monitorização. Redução dos custos de instalação e operação, aumento da resolução temporal e espacial das medições e obtenção de informação já pré-processada pela rede são algumas das vantagens normalmente associadas às redes de sensores.

A monitorização de parâmetros ambientais como auxílio à gestão agrícola é uma das áreas onde o conceito de redes de sensores poderá ser aplicado com maior sucesso. O problema da sustentabilidade agrícola a nível mundial torna indispensável a adopção de soluções que aumentem a produção. O conceito de “agricultura de precisão” surge com o objectivo de otimizar a produtividade agrícola aumentando a produção das culturas e/ou diminuindo os seus custos. Para

cumprir este objectivo torna-se essencial gerir a rega de forma a maximizar a sua eficiência. Sendo a água um recurso cada vez mais escasso, e a agricultura o seu maior utilizador, a gestão da rega ganha importância também como forma de minimizar o impacto ambiental das produções agrícolas. Para além da rega também a aplicação de fertilizantes, pesticidas e outros consumíveis agrícolas poderá ser largamente reduzida se estes forem utilizados apenas quando for estritamente necessário.

O conceito de agricultura de precisão pressupõe um conhecimento detalhado das condições de cada cultura. Actualmente as medições necessárias para aferir o estado de cada plantação são efectuadas esporadicamente e de forma manual. A aplicação de uma rede de sensores à monitorização de uma plantação agrícola poderá alterar drasticamente este cenário. Uma rede de sensores permitirá reduzir de forma significativa o custo associado a cada medição, possibilitando a monitorização de um maior número de locais por cultura e uma frequência de medição muito superior. Conhecendo com maior precisão as condições exactas do solo e do clima da zona cultivada poderão ser criados modelos agronómicos mais precisos que permitirão uma melhor gestão de toda a actividade agrícola aumentando a rentabilidade de cada hectare de solo cultivado.

Apesar da enorme quantidade de água presente na Terra esta é na sua maioria excessivamente salgada para uso humano (nesta inclui-se para além da água dos oceanos a água subterrânea das zonas mais profundas). As calotes polares e glaciares, apesar de serem constituídas por água doce encontram-se em zonas dificilmente acessíveis. Deste modo estima-se que de toda a água existente na Terra apenas 0,3% é água doce e acessível para consumo humano. Este tipo de água é por isso um recurso cada vez mais escasso e distribuído geograficamente de forma pouco uniforme. Com o previsível aquecimento global o problema da escassez de água potável terá tendência a alastrar-se a zonas onde actualmente não se faz sentir sendo previsivelmente a causa para novos conflitos e catástrofes humanitárias.

Estima-se que 69% de toda a água consumida é utilizada na irrigação de plantações agrícolas. A indústria é responsável pelo consumo de 15% e o uso doméstico por outros 15%. A agricultura é assim a actividade humana responsável pelo maior consumo de água. A maior parte da água utilizada na agricultura é gasta com o objectivo de produzir alimentos. No entanto, uma percentagem considerável desta água é gasta na irrigação de recintos desportivos tais como campos de golfe.

O objectivo de um jogo de golfe é, resumidamente, utilizar um conjunto de tacos para colocar uma bola num grupo de buracos no menor número de tacadas possível. Num campo de golfe existem tipicamente 9 ou 18 buracos. Um campo de golfe é constituído por três zonas relvadas distintas: *Teeing Area*, *Fairway* e *Putting Green*. A *Teeing Area* é o local onde se inicia o jogo para cada buraco. O *Putting Green* é o local onde se encontra situado o buraco. A relva do *Putting Green* é especialmente importante para uma boa prática do jogo devido ao facto de a bola ter de rolar de forma uniforme. Por este motivo é alvo de uma atenção especial por parte do pessoal responsável pela sua manutenção que tem de garantir que esta se encontra em excelentes condições. O *Fairway* é a zona localizada entre a *Teeing Area* e o *Putting Green*.

A maior percentagem de água utilizada na irrigação de campos de golfe é proveniente de aquíferos existentes no subsolo. Esta água é extraída para a superfície através da realização de furos de captação ou poços, utilizando bombas de água.

O subsolo não é uma fonte inesgotável de água. Um aquífero pode ser visto como uma caixa negra onde é possível introduzir, guardar e retirar água (ver Figura 1). A água pode ser inserida por infiltração de água superficial proveniente da precipitação ou irrigação. Pode permanecer no aquífero ou ser retirada naturalmente para corpos de água superficiais (rios, lagos) ou através da evapotranspiração da vegetação. Um sistema de aquíferos não explorados pelo Homem encontra-se num equilíbrio de longo prazo (ver Figura 1.A). A quantidade de água introduzida é igual à retirada, permanecendo a quantidade armazenada constante. Quando um aquífero começa a ser explorado, através da bombagem de água para a superfície, este equilíbrio é alterado e os níveis de água existentes nos lençóis freáticos subterrâneos começam a baixar (ver Figura 1.B).

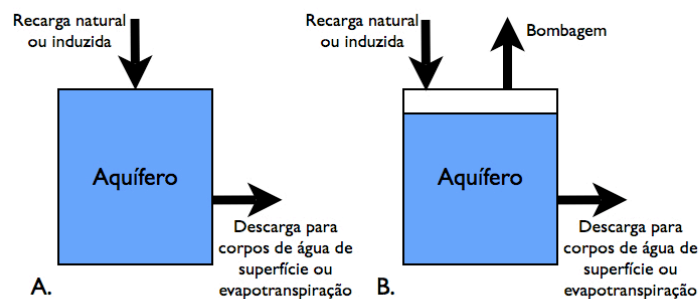


Figura 1 – Funcionamento de um aquífero

Na Figura 2 encontram-se representadas algumas das consequências de uma redução excessiva dos níveis de água dos lençóis freáticos:

- Diminuição da quantidade de água nas linhas de água e lagos (A)
- Aumento dos custos de bombagem (B)
- Secagem de furos (C e D)
- Deterioração da qualidade da água (E)
- Deslocamentos de terras e desabamentos

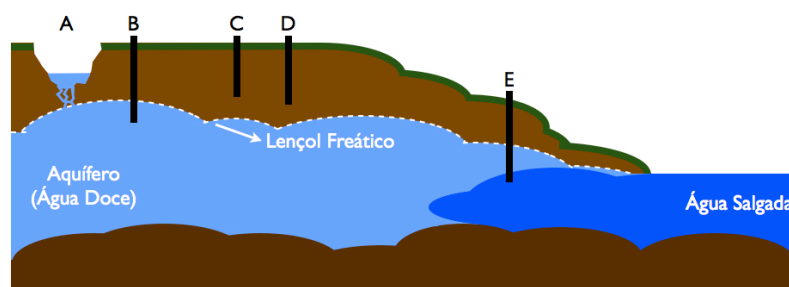


Figura 2 – Consequências da sobre exploração da água existente no subsolo

Parte da água que existe nos rios e lagos tem origem subterrânea. A contribuição da água de origem subterrânea para os rios e lagos depende da geografia, geologia e clima de cada região mas é normalmente bastante elevada. Existe, por isso, uma relação directa entre a quantidade de água existente nos aquíferos e os níveis de água à superfície (Figura 2.A).

A principal consequência de uma bombagem excessiva de água é a diminuição do nível do lençol freático abaixo do qual o solo se encontra saturado de água. Para que seja possível extrair água do subsolo é necessário efectuar perfurações até profundidades superiores ao nível do lençol freático. Se este se tornar mais profundo poderá obrigar a aumentar a profundidade do furo ou mesmo a efectuar um novo furo. Com o aumento da profundidade a que se encontra a água aumenta também a energia necessária para a bombear até à superfície e consequentemente o custo da água extraída (Figura 2.B, C e D).

Outra das consequências de uma redução do nível do lençol freático é a contaminação do aquífero por água salgada proveniente dos oceanos tal como pode ser observado na Figura 2.E.

Dados disponibilizados pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) mostram que a desertificação do planeta, em conjunto com o aumento da população mundial, tem como consequência uma constante diminuição da área de terra arável disponível por habitante, tal como pode ser analisado na Figura 3.

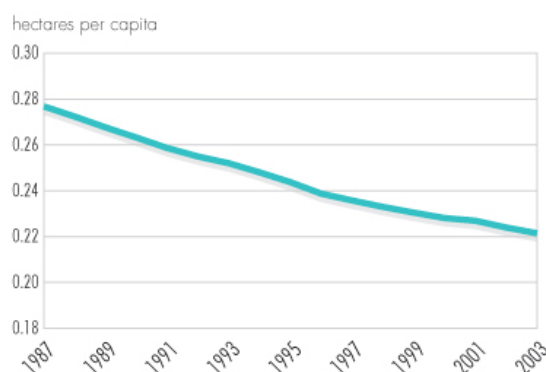


Figura 3 – Evolução da área disponível para agricultura *per capita* a nível mundial<sup>1</sup>

O gráfico da figura mostra a área de terra que pode ser cultivada existente *per capita*. O previsível aumento da população mundial de 6.7 biliões de pessoas em 2006 para 9.2 biliões em 2050, discutido em [2], deverá contribuir para acentuar esta tendência. A mesma organização alerta para o facto da produção de biocombustíveis poder vir a contribuir para a escassez de comida. Actualmente são utilizados cerca de 14 milhões de hectares (1% da terra arável) na produção de biocombustíveis. Esta percentagem deverá aumentar para entre 2.5% a 3.8% em 2030 e para 20% em 2050.

Os problemas decorrentes da excessiva exploração da água disponível para irrigação em conjunto com a continua diminuição da quantidade de solo disponível para a produção de alimentos por habitante tornarão indispensável o aumento da produtividade de cada hectare plantado de modo a que os problemas de escassez alimentar não se agravem. O conceito de agricultura de precisão

<sup>1</sup> <http://faostat.fao.org>

poderá tirar partido das redes de sensores como instrumentos de monitorização contínua das condições de cada plantação para tornar a produção agrícola mais eficiente. Para além de possibilitar uma aplicação mais eficaz da água disponível, a monitorização contínua permitirá conhecer quando as plantações estão mais susceptíveis a certas doenças ou pragas só aplicando tratamentos quando necessário.

## 1.1 Motivação e Objectivos

Neste contexto de escassez de água para a produção agrícola torna-se difícil de justificar a sua utilização para fins recreativos. No entanto os campos de Golfe contribuem de forma decisiva para o consumo de água a nível mundial. Estima-se que os EUA gastem cerca de 1800 biliões de litros de água anualmente na rega de campos de golfe e que o custo de irrigação de cada campo de golfe ronde os 500 mil euros por ano.

Em Portugal o Algarve é simultaneamente uma das áreas com maiores índices de risco de desertificação (devido à pressão que tem sido exercida ao longo dos anos em relação à sua capacidade hídrica) e a região do país onde se concentram um maior número de campos de golfe. Estes campos de golfe são uma das principais atracções para os turistas estrangeiros que visitam o nosso país. A importância do sector do turismo para Portugal obrigará a encontrar soluções que permitam manter os campos de golfe em funcionamento de forma sustentável e em harmonia com o ambiente envolvente.

Actualmente a maior parte dos campos de golfe portugueses utilizam água proveniente de furos de captação com todos os problemas referidos anteriormente. Uma das alternativas apontadas é a dessalinização de água proveniente do oceano. Infelizmente a quantidade de energia necessária na dessalinização torna a produção de água potável a partir de água salgada extremamente dispendiosa. Esta solução também apresenta algumas falhas de um ponto de vista ambiental. As centrais de dessalinização produzem como resíduo uma solução de água saturada de sal que quando é largada novamente no oceano poderá afectar alguns ecossistemas e a captação de água do oceano poderá levar a que algumas espécies sejam atraídas para o sistema.

Neste âmbito a optimização do consumo de água dos campos de golfe será de vital importância. O objectivo desta dissertação é o de criar uma solução de monitorização de parâmetros ambientais baseada no conceito de redes de sensores que possa ser utilizada como auxílio à gestão da rega de um campo de golfe. As características de um campo de golfe, onde toda a gestão da rega é feita por especialistas, fazem com que este seja o local ideal para desenvolver e testar soluções deste tipo. Para além deste facto, a capacidade económica destes recintos desportivos poderá fazer com que estes sejam *early adopters* desta tecnologia. Uma solução de monitorização de parâmetros ambientais com redes de sensores sem fios que funcione com sucesso num campo de golfe poderá ser posteriormente adaptada a outros tipos de plantações agrícolas.

## 1.2 Contribuições

As contribuições desta dissertação são:

- Uma análise das soluções de monitorização ambiental baseadas no conceito de redes de sensores existentes.
- Uma análise dos requisitos que uma aplicação de monitorização de parâmetros ambientais como auxílio à gestão da rega de um campo de golfe deverá cumprir (com a colaboração de especialistas em agronomia e de responsáveis pela manutenção de campos de golfe).
- Um estudo de instalação de nós remotos (motes MicaZ) num campo de golfe real.
- A concepção de uma aplicação de monitorização de parâmetros ambientais adaptada às necessidades de um campo de golfe.
- Uma implementação de referência utilizando nós remotos (e sensores) reais.

O trabalho realizado no âmbito desta dissertação enquadra-se num projecto mais vasto do qual também faz parte a aplicação desenvolvida na dissertação intitulada: “GolfWater - Sistema de gestão de rega de campos de Golfe com redes de sensores”. A dissertação GolfWater tem como objectivo o desenvolvimento de um algoritmo que utiliza os dados recolhidos por esta aplicação para calcular as necessidades hídricas da relva e, com base nessa informação, controlar o sistema de rega de um campo de golfe. O objectivo final deste projecto conjunto é o de criar um sistema de gestão e controlo da rega de um campo de golfe que não necessite de qualquer intervenção humana.

## 1.3 Organização da Tese

Esta dissertação encontra-se separada em sete capítulos principais. Depois deste primeiro capítulo introdutório segue-se o segundo capítulo onde são apresentados e discutidos os aspectos tecnológicos mais relevantes das redes de sensores aplicadas à monitorização ambiental. No terceiro capítulo é apresentado o actual estado da arte da aplicação de redes de sensores à monitorização de parâmetros ambientais com especial enfoque na sua contribuição para a gestão agrícola. No final do terceiro capítulo é apresentada uma breve discussão da forma como os vários projectos descritos abordam os aspectos tecnológicos mais relevantes apresentados no segundo capítulo. O quarto capítulo apresenta uma descrição da análise de requisitos e concepção da aplicação desenvolvida no âmbito desta dissertação. Nesse capítulo começa por ser feito um levantamento da situação actual de um campo de golfe típico para, com base neste levantamento, serem apresentados os requisitos que a aplicação desenvolvida deverá cumprir. Posteriormente é apresentado um estudo de instalação dos motes MicaZ num campo de golfe real. Finalmente é descrita a arquitectura do sistema assim como o algoritmo de medição e actuação desenvolvido. No quinto capítulo é descrita uma implementação de referência, os seus componentes e a forma como esta comunica com a

aplicação *GolfWater*. No sexto capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados para avaliar o funcionamento e eficácia da aplicação desenvolvida. No sétimo e último capítulo são apresentadas algumas conclusões finais e sugestões de trabalho futuro.





## 2. Aspectos Tecnológicos Relevantes das Redes de Sensores Aplicadas à Monitorização Ambiental

Neste capítulo são apresentados os aspectos tecnológicos mais relevantes na área das redes de sensores aplicadas à monitorização de parâmetros ambientais. As redes de sensores são constituídas por nós remotos com capacidade de comunicação sem fios e sensorização/actuação. Devido à sua simplicidade, estes nós têm o potencial para se tornarem muito em breve extremamente baratos de produzir, facto que deverá incrementar exponencialmente a sua utilização, quer por substituição das actuais soluções de monitorização, quer pela criação de soluções totalmente novas. Actualmente existem diversas aplicações que tiram partido do conceito de redes sem fios de sensores em áreas tão díspares como a monitorização de estruturas (e.g. pontes e túneis), de vibrações sísmicas ou de habitats naturais, só para referir alguns exemplos. Na área da monitorização de parâmetros ambientais existem aplicações com fins estritamente científicos e outras que procuram servir como auxílio à gestão agrícola.

Devido ao facto das aplicações do conceito de redes de sensores se encontrarem numa fase embrionária não existem ainda soluções universais para os problemas que se colocam ao seu desenvolvimento. O facto de cada aplicação possuir requisitos específicos torna necessária uma selecção dos protocolos e soluções que melhor se adequam a cada aplicação. Os projectos que procuram aplicar o conceito de redes de sensores à monitorização de parâmetros ambientais abordam estes desafios separando-os por tópicos de investigação onde cada projecto adopta soluções distintas consoante os seus requisitos. De seguida segue-se uma lista dos principais tópicos abordados, sendo posteriormente apresentadas algumas das soluções mais interessantes em cada uma destas áreas.

- **Eficiência energética:** Maximização do tempo em que a rede deverá permanecer em funcionamento sem que seja necessário substituir baterias.
- **Localização:** Informação relativa ao local onde se encontra cada nó da rede de sensores sem fios.
- **Reactividade:** Capacidade que a rede tem de reagir ao ambiente que a rodeia alterando o seu comportamento.
- **Robustez:** Capacidade da rede se manter em pleno funcionamento na presença de condições adversas.
- **Proactividade:** Capacidade de actuar sobre o ambiente, com base na informação recolhida pela rede de sensores, sem necessidade de qualquer intervenção humana.

### 2.1 Eficiência Energética

A maximização do tempo durante o qual uma rede de sensores se mantém em funcionamento, recolhendo e enviando informação, é fundamental para a sua viabilidade. Uma implementação

energeticamente ineficiente poderá tornar os custos de manutenção, associados à intervenção humana necessária para realizar a troca ou recarga das baterias inportáveis.

Nas redes de monitorização de parâmetros ambientais a maximização da sua vida útil é um objectivo prioritário. Existem por isso diversos projectos de investigação que procuram atingi-lo recorrendo a fontes alternativas de energia e/ou optimizando a eficiência com que é utilizada a energia disponível.

A utilização de energia solar [3] como forma de recarregar as baterias é uma possibilidade já testada com resultados positivos. Esta abordagem tem como desvantagens uma grande dependência das condições meteorológicas e tornar a instalação dos nós mais complexa e menos transparente devido às dimensões dos painéis solares. Em [4] é proposto um algoritmo de encaminhamento que tem em consideração o facto dos nós estarem ou não a ser alimentados por painéis solares de modo a poupar energia. Ao dar preferência a rotas que utilizam nós alimentados por energia solar é maximizada a vida útil dos nós alimentados por baterias.

A utilização de energia proveniente de vibrações sísmicas [5,6] é outra possibilidade para as redes de monitorização de parâmetros ambientais. A energia produzida desta forma é no entanto muito limitada podendo apenas alimentar circuitos de ultra-baixo consumo ou servir como fonte auxiliar de energia em sistemas mais complexos. Em [7] é proposta a utilização de um gerador termoeléctrico que utiliza a diferença de temperatura para gerar energia até  $60\mu W$ .

Em [8] é realizado um estudo comparativo de várias formas de obter energia a partir de fontes menos convencionais como sinais de rádio, conversão termoeléctrica ou vibrações. Os autores concluem que, com excepção da luz solar directa ( $100mW/cm^2$ ), as restantes fontes de energia são demasiado limitadas para alimentar convenientemente os dispositivos electrónicos produzidos actualmente. No entanto a evolução tecnológica na área dos circuitos electrónicos de baixo consumo poderá alterar este paradigma.

A comunicação é de longe o maior consumidor de energia das redes de sensores [9], sendo estimado que o envio de um pacote gasta aproximadamente 5 vezes mais energia do que realizar a medição de um parâmetro e guarda-lo localmente [10] ou que a transmissão de um bit equivale à execução de 1000 instruções [11]. A melhor forma de poupar energia numa rede de sensores é portanto reduzindo as comunicações ao mínimo, o que pode ser conseguido de várias formas:

**Agregação ou compressão de dados:** A capacidade computacional da rede pode ser utilizada para processar os dados recolhidos com vista a diminuir a quantidade de tráfego trocado na rede. Existem diversas técnicas de agregação e compressão de dados que apesar de implicarem um aumento dos requisitos de memória e processamento de cada nó da rede, compensam este facto com a redução da quantidade de informação a transmitir. Estas

técnicas procuram identificar a informação irrelevante através da comparação de dados provenientes de diversos nós. Um exemplo prático da eficiência da agregação de dados pode ser encontrado na monitorização de vibrações sísmicas com o objectivo de detectar tremores de terra. Numa aplicação deste tipo se um nó detectar vibrações invulgares mas os seus nós vizinhos não as detectarem, esta informação poderá ser considerada irrelevante e consequentemente descartada.

**Filtragem de dados:** Cada nó pode filtrar a informação que envia para a rede através da aplicação de critérios de selecção que variam consoante os requisitos específicos de cada aplicação. Pode ser apenas necessário reportar alterações relevantes nas leituras efectuadas pelos sensores não sendo necessário transmitir dados referentes a leituras semelhantes. No projecto *Vineyard Computing: Sensor Networks in Agricultural Production* [12], descrito em 3.2.1, foi realizada uma análise de requisitos que permitiu concluir ser apenas necessário transmitir as temperaturas máximas e mínimas diárias em cada ponto. Deste modo, apesar de cada nó realizar medições de temperatura de 60 em 60 segundos, cada medição efectuada é comparada com os máximos e mínimos guardados anteriormente sendo apenas guardada se substituir um destes valores.

**Redução do overhead:** De forma a reduzir a quantidade de informação a transmitir por cada nó os protocolos desenvolvidos para redes de sensores procuram reduzir a quantidade de tráfego de controlo de que necessitam para funcionarem correctamente.

O protocolo MAC utilizado é outro aspecto relevante para a eficiência energética das redes de sensores sem fios. Em redes muito densas ou baseadas em *broadcast* os nós estão permanentemente a receber pacotes que não são a si destinados mas que têm de ser parcialmente processados para poderem ser descartados. Mesmo quando um nó não está a enviar nem a receber nenhum pacote dirigido a si pode ter a necessidade de ter o rádio ligado para escutar o meio gastando energia. Estas formas de gastar energia podem ser minoradas recorrendo a protocolos MAC desenvolvidos especificamente para o ambiente das redes de sensores. Os requisitos especiais das redes de sensores, como a necessidade de poupar energia e a auto-configuração, tornam os protocolos MAC tradicionais inadequados. Os protocolos MAC utilizados noutros tipos de redes sem fios, como por exemplo 802.11, estão optimizados para responder a outro tipo de requisitos como baixa latência e justiça no acesso ao meio que não são tão importantes em redes de sensores.

## 2.2 Localização

A informação relativa à localização de cada nó é extremamente importante nas redes de sensores sem fios. Na maior parte das aplicações em que são utilizadas redes de sensores a informação recolhida pelos sensores apenas é relevante se for possível determinar o local

onde o parâmetro foi medido ou o evento foi detectado. Em muitas aplicações a associação de informação geográfica aos dados recolhidos permite a criação de mapas que podem ser rapidamente interpretados pelos utilizadores. A capacidade da rede de sensores localizar geograficamente os seus nós também poderá ser útil para tornar a sua operação mais eficiente, nomeadamente ao nível dos protocolos de encaminhamento. Em [13] e [14] são propostos algoritmos de encaminhamento que utilizam a informação de localização dos nós para reduzirem a dimensão das tabelas de encaminhamento (ou mesmo eliminar a necessidade da existência destas tabelas). A utilização deste tipo de algoritmos será útil em redes de sensores em que os nós possuam uma capacidade de memória reduzida. Em [15] é proposto um mecanismo de actualização de rotas, em redes *ad hoc* com nós móveis, que utiliza informação sobre a localização dos nós para limitar a procura de novas rotas a uma zona geográfica reduzida. Este mecanismo permite reduzir o número de mensagens de encaminhamento trocadas.

De seguida serão descritos diversos sistemas que permitem determinar a localização geográfica dos nós da rede.

Durante a fase de instalação da rede poderá ser realizado um mapeamento manual dos nós instalados associando o identificador de cada nó à sua localização geográfica. Esta abordagem não necessita que a rede possua qualquer mecanismo de localização próprio, mas implica uma instalação individual de cada nó e não permite a existência de nós móveis. Sempre que um nó mude de posição a informação relativa à sua localização terá de ser alterada manualmente.

Equipar todos os nós da rede com módulos GPS resolve o problema de obter a sua localização. Esta solução tem problemas óbvios ao nível do custo, da energia e do aumento do volume de cada nó. Em redes estáticas apenas é necessário obter a informação de localização uma vez, o que torna a adição a cada nó de hardware específico para esta tarefa extremamente ineficiente. Em [16] é proposto o algoritmo *Ad Hoc Positioning System* (APS), que permite minorar os problemas referidos anteriormente. O APS é um algoritmo distribuído que consegue determinar a localização de todos os nós de uma rede onde apenas alguns dos nós possuem mecanismos de localização próprios.

Em [17], [18] e [19] são propostos sistemas de localização que utilizam nós com posições previamente conhecidas (*beacon nodes*). O sistema proposto em [17] utiliza a força do sinal rádio proveniente de vários pontos de acesso para localizar nós móveis dentro de edifícios. Este sistema tem uma resolução média de 2 a 3 metros utilizando medidas empíricas e modelos de propagação de ondas rádio. Em [18] é proposto um método semelhante ao anterior mas que utiliza *beacon nodes* desenvolvidos especificamente para sistemas de localização. Estes *beacon nodes* utilizam uma combinação de sinais rádio com ultra-sons para obter resoluções espaciais de alguns centímetros. Em [19] é descrito um sistema de localização adaptado a redes de sensores instaladas ao ar livre. Este sistema utiliza a força do sinal rádio para calcular a distância entre nós da rede e um sistema de triangulação para obter

a posição relativa de cada nó. Para determinar a localização de um nó é necessário que este tenha pelo menos dois nós vizinhos, devido ao facto de ser utilizada a técnica de triangulação.

Em [20] é proposto um algoritmo de localização ideal para redes de sensores instaladas aleatoriamente. Este algoritmo não utiliza nem nós equipados com GPS nem *beacon nodes* com posições previamente definidas. Os nós da rede começam por se auto-organizarem em grupos (*clusters*). Para cada *cluster* é nomeado um nó coordenador (*master node*) que utiliza mecanismos de triangulação para estabelecer um sistema de coordenadas local para o seu *cluster*. Depois de todos os sistemas de coordenadas locais se encontrarem definidos é escolhido apenas um destes sistemas para se manter fixo. Todos os outros *master nodes* têm de reorientar os seus sistemas de coordenadas para que a rede convirja para um sistema de coordenadas global. Este mecanismo distribuído baseado em *clusters* torna possível o estabelecimento de um sistema de coordenadas global em redes *ad hoc* instaladas aleatoriamente em locais remotos sobre os quais não existe qualquer informação de localização preliminar.

## 2.3 Reactividade

A reactividade de uma rede de sensores pode ser definida como a capacidade que esta tem de reagir a alterações no ambiente onde está instalada modificando o seu comportamento, tal como descrito em [21]. As frequências de medição de parâmetros ou de transmissão da informação recolhida são exemplos de atributos de uma rede de sensores que podem ser alterados. Normalmente as medições ou são realizadas a intervalos regulares definidos previamente ou são despoletadas por acções realizadas pelo utilizador. Um exemplo de uma aplicação onde a capacidade da rede se adaptar ao ambiente poderá ser especialmente útil é o da monitorização da humidade do solo. Este parâmetro ambiental varia muito rapidamente durante períodos de chuva (ou rega), enquanto fora destes períodos se altera mais lentamente. Será por isso útil modificar a frequência com que é medida a humidade do solo consoante o ritmo a que esta se altera. Quando chove, e a humidade do solo se modifica rapidamente, deverão ser realizadas medições frequentes. Enquanto durante os períodos de seca, entre períodos de queda de chuva, deverão ser realizadas menos medições de modo a poupar energia.

O projecto *A Reactive Soil Moisture Sensor Network: Design and Field Evaluation*, descrito em [21], teve como principal objectivo o desenvolvimento e implementação de uma rede de sensores reactiva para a monitorização da humidade do solo. Esta rede reage a tempestades de chuva aumentando a frequência com que mede a humidade do solo. Para atingir este objectivo um dos nós da rede (*rain node*) encontra-se ligado a um pluviómetro que permite detectar a ocorrência de chuva. Este nó verifica a cada 12 segundos se o pluviómetro indica a queda de chuva e se tal se verificar envia uma mensagem (*rate-is-wet*) aos nós que medem a humidade do solo. Se o *rain node* deixar de detectar a presença de chuva durante duas horas, envia uma mensagem (*rate-is-dry*) indicando aos restantes nós que a chuva já parou. Este

mecanismo permite aos nós que medem a humidade do solo alterar a frequência de medição tendo em conta o facto de estar, ou não, a chover.

## 2.4 Robustez

A robustez de uma rede de comunicação pode ser definida como a capacidade da rede manter a sua funcionalidade na presença de condições adversas. Ou seja, uma rede robusta deverá manter-se em pleno funcionamento, sem interrupções indesejadas, durante o tempo de vida definido previamente.

As características especiais de uma rede de sensores aplicada à monitorização de parâmetros ambientais fazem com que a robustez global deste tipo de redes resulte de um conjunto alargado de factores. O facto de estas redes serem instaladas ao ar livre torna essencial a adopção de soluções que protejam os nós da rede das condições ambientais. A adopção de mecanismos de gestão energética que permitam maximizar o tempo de vida da rede de sensores é também essencial em redes cujos nós são alimentados por baterias. A utilização de nós e ligações redundantes na rede pode ser uma forma de permitir o seu funcionamento em caso de falha de um dos nós ou de perda de uma das ligações.

Resumindo, para garantir a robustez de uma rede de sensores de monitorização de parâmetros ambientais é necessário equacionar aspectos que vão desde a protecção física de cada um dos seus nós até à adopção de mecanismos de redundância e de protocolos eficientes.

## 2.5 Proactividade

Os sistemas que actuam sobre o ambiente com base na informação recolhida por uma rede de sensores sem a necessidade de serem activados por intervenção humana são designados por proactivos. Este tipo de sistemas é útil para lidar com problemas que necessitam de uma reacção imediata ou que requeiram a realização de actividades demoradas que sobrecarreguem os trabalhadores.

Foi neste contexto que surgiram as redes sem fios de sensores/actuadores. Este tipo de redes utiliza um conjunto de sensores e actuadores, que comunicam através de ligações sem fios, para criar um sistema de controlo distribuído. A informação recolhida pelos sensores é processada pelo sistema que utiliza os actuadores para realizar acções sobre o ambiente monitorizado.

Em [22] encontram-se definidas duas arquitecturas que podem servir como base para construir aplicações de controlo utilizando redes sem fios de sensores/actuadores. Estas duas arquitecturas representadas na Figura 4 diferem apenas na existência de entidades de controlo explícitas dentro da rede, designadas por controladores.

Na Figura 4.A não existem entidades de controlo explícitas na rede sem fios de sensores/actuadores. Nesta situação os algoritmos de controlo responsáveis por tomar decisões e desencadear acções sobre o ambiente são executados nos nós actuadores. Os dados recolhidos pelos nós sensoriais são enviados para os nós actuadores que processam a informação utilizando algoritmos pré-definidos.

O ciclo de controlo para esta arquitectura encontra-se representado na Figura 4.B. Como os nós actuadores são também responsáveis pelo controlo, apenas é necessário enviar os dados recolhidos dos nós sensoriais para os nós actuadores. Os comandos de controlo não têm de ser transmitidos pela rede, visto que os controladores e os actuadores se encontram integrados no mesmo nó.

Na Figura 4.C encontra-se representado um segundo tipo de arquitectura onde existem entidades controladoras dentro da rede sem fios de sensores/actuadores. Nesta arquitectura os sensores enviam os dados recolhidos para os nós controladores que executam algoritmos de controlo e produzem comandos que são posteriormente enviados para os actuadores. Os actuadores apenas são responsáveis por receber comandos e realizar acções. Neste tipo de arquitectura quer os dados recolhidos pelos nós sensoriais quer os comandos de controlo gerados pelos nós controladores têm de ser transmitidos pela rede. O ciclo de controlo utilizado pelas aplicações baseadas neste tipo de arquitecturas encontra-se representado na Figura 4.D.

No âmbito da gestão da actividade agrícola, a activação do sistema de rega de uma plantação quando for detectado que a humidade do solo atingiu determinados limiares ou a aplicação automática de pesticidas quando as medições realizadas indicarem que o risco de infestação é elevado, são exemplos de aplicações possíveis de uma rede sem fios de sensores/actuadores.

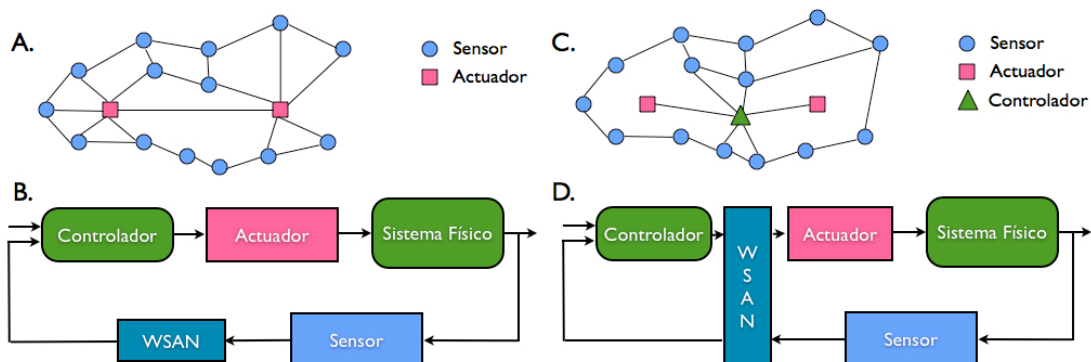


Figura 4 – Arquitecturas de redes sem fios de sensores/actuadores [22]





### **3. Estado da Arte**

Neste capítulo é apresentado o actual estado da arte da aplicação de redes de sensores sem fios à monitorização de parâmetros ambientais com especial enfoque na sua contribuição para a gestão da rega. Em primeiro lugar são caracterizados os métodos actualmente utilizados para otimizar a gestão da rega que não recorrem à utilização de redes de sensores. Depois de uma descrição genérica de como as redes de sensores são aplicadas à monitorização de parâmetros ambientais, são descritos alguns dos projectos considerados mais relevantes nesta área. Segue-se uma discussão comparativa da forma como os diferentes projectos abordam os desafios tecnológicos que se lhes colocam.

#### **3.1 Gestão da Rega sem redes de sensores**

Actualmente todos os sectores de actividade são obrigados a aumentar a sua eficiência para terem sucesso numa economia cada vez mais global e competitiva. O sector agrícola não é excepção. Para aumentar a produtividade agrícola é necessário reduzir o consumo das plantações e/ou aumentar a sua produção. Sendo o recurso mais consumido pelas plantações agrícolas a água, a optimização do seu consumo tem um grande impacto na produtividade agrícola.

Para realizar uma boa gestão da rega é necessário saber como, quando e quanto regar [23]. A escolha do método de rega a utilizar depende essencialmente do tipo de solo e da topografia do terreno. Para responder à questão de quando deve ser realizada a rega é necessário determinar as necessidades hídricas das plantas e as reservas de água de que elas podem dispor. A quantidade de água a aplicar em cada rega pode ser calculada tendo como base os consumos da cultura no período precedente, a capacidade de retenção de água do solo e o sistema de rega utilizado.

Existem três tipos de métodos que são utilizados para realizar a gestão da rega. Os métodos preditivos procuram simular a evolução das disponibilidades hídricas a partir de modelos representativos do balanço hídrico. Os métodos reactivos utilizam indicadores medidos no campo como por exemplo a humidade ou temperatura do solo. Os métodos preditivo-reativos utilizam as medições efectuadas nos métodos reactivos para calibrar e rectificar os modelos representativos do balanço hídrico utilizados nos métodos preditivos.

O teor de humidade do solo é o parâmetro que mais influencia as decisões tomadas na gestão da rega podendo ser medido através de tensiómetros ou sensores da capacitância do solo. Como forma de validar os resultados obtidos por estes sensores é possível recorrer-se ao método gravimétrico que consiste na recolha e pesagem de uma amostra de solo antes e depois de se proceder à sua secagem em estufa a 105°. Através da diferença entre os pesos obtidos é possível determinar o teor de água do solo.

Os dados relativos à humidade do solo podem ser complementados com a informação recolhida por estações meteorológicas que medem uma grande variedade de parâmetros tais como: temperatura do ar, precipitação, humidade relativa, radiação, humidade foliar, temperatura do solo, velocidade e direcção do vento.

Existem ainda outros métodos que permitem determinar as necessidades hídricas das plantações que se baseiam na observação de sintomas visíveis nas plantas, na variação das dimensões dos seus órgãos ou na medição da temperatura das folhas.

Toda esta informação recolhida no campo pode ser utilizada como *input* em modelos de apoio à gestão agrícola, tais como os descritos em [24][25][26], que auxiliam os agricultores na optimização da rega.

### **3.2 Aplicação de redes de sensores à monitorização de parâmetros ambientais**

O conceito de redes de sensores, tal como descrito em [1], torna possível a utilização de sensores em áreas onde a instalação de sistemas de monitorização tradicionais era impossível ou economicamente inviável. Com a evolução tecnológica e produção em massa dos componentes utilizados é espectável que os custos de implementação deste tipo de redes decresçam significativamente. Com a redução de custos aumenta o número e variedade de aplicações onde a utilização de redes de sensores se torna rentável.

Existem diversos projectos na área da monitorização de parâmetros ambientais que utilizam redes de sensores sem fios como auxílio à gestão da actividade agrícola ou para fins estritamente científicos. Os objectivos específicos de cada projecto determinam os parâmetros a monitorizar, sendo os mais comuns a humidade, a temperatura e a pressão atmosférica, a humidade e a temperatura do solo, a luminosidade e as vibrações sísmicas.

Na Figura 5 encontra-se representada a arquitectura genérica das redes de sensores utilizadas nestes projectos. Os nós remotos são instalados nas zonas que se pretende monitorizar. O número de nós, a densidade com que são instalados e a topologia da rede de sensores utilizada (e.g. estrela, árvore, *mesh*, *single-hop*, *multi-hop*) dependem dos requisitos da aplicação. Cada nó remoto pode controlar um ou mais sensores que poderão medir diferentes parâmetros ou o mesmo parâmetro em diferentes zonas ou profundidades. Tal como pode ser observado na Figura 5, a comunicação entre nós remotos e entre estes e os nós *sink* é sempre realizada recorrendo a protocolos de comunicação sem fios. A comunicação entre os nós *sink* e o nó final de processamento varia consoante as características de cada projecto podendo ser feita utilizando cabos ou tecnologias sem fios de maior alcance como GPRS ou 802.11.

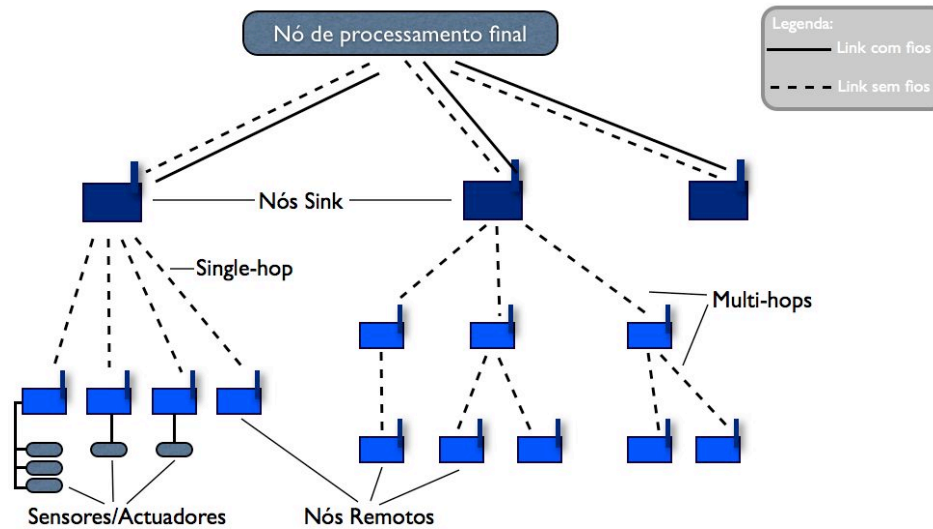


Figura 5 – Arquitectura genérica das redes de sensores

Nas secções seguintes será feita uma descrição geral dos projectos considerados mais relevantes na área das redes de sensores aplicadas à monitorização de parâmetros ambientais.

### 3.2.1 Vineyard Computing

O projecto *Vineyard Computing: Sensor Networks in Agricultural Production*, descrito em [12], começou por efectuar uma análise das necessidades e prioridades de todos os intervenientes na cadeia de valor da produção vinícola com o objectivo de responder às seguintes perguntas:

- Que informação deveria ser recolhida e com que frequência?
- Que nível de tratamento/interpretação deveria ser aplicado aos dados recolhidos?
- Qual a melhor forma de apresentar a informação ao utilizador?
- Quando é que o sistema deve actuar de forma automática e quando é que deve esperar por ordens do utilizador?

As respostas a estas questões, para além de estarem dependentes das capacidades do equipamento e das condições ambientais do local a ser estudado, estão fortemente relacionadas com as necessidades dos futuros utilizadores do sistema desenvolvido. Este estudo inicial permitiu identificar as melhores formas de aplicar o conceito de redes de sensores sem fios à gestão da produção agrícola.

Os requisitos de um projecto deste tipo são muito diferentes dos de projectos de investigação científica, tais como os descritos em [27] e [28]. Os sistemas desenvolvidos

deverão facilitar, e não complicar mais, o trabalho dos profissionais do sector não os obrigando a realizar uma análise complexa dos dados recolhidos. Os trabalhadores agrícolas pretendem obter apenas informação relevante e já tratada que lhes permita identificar facilmente os próximos passos a seguir de modo a aumentarem a produtividade das suas culturas.

O levantamento de requisitos descrito anteriormente levou ao desenvolvimento de sistemas que permitem efectivamente auxiliar a gestão da produção agrícola. Um exemplo foi a criação de um mapa onde podiam ser identificadas as zonas da vinha e os respectivos níveis de risco de contaminação pela doença *powdery mildew*. Um mapa deste tipo permite ao agricultor identificar facilmente em que zonas deve aplicar pesticida. É possível criar este mapa de risco recorrendo apenas à informação das temperaturas recolhidas nas diferentes zonas da vinha durante um período de tempo, no entanto, a disponibilização desta informação sem um tratamento adequado seria de pouco valor para o agricultor.

Este projecto leva o conceito de tratamento da informação mais longe ao introduzir sistemas proactivos que actuam automaticamente com base na informação recolhida sem intervenção humana. Estes sistemas serão abordados com maior detalhe no capítulo 3.3.5 relativo à proactividade.

A arquitectura proposta, representada na Figura 6, recorre a nós móveis que recolhem os dados dos nós instalados nas vinhas e os transportam para o sistema final de processamento localizado nas instalações da quinta. Os nós móveis podem ser instalados em diferentes objectos, pessoas ou animais que façam habitualmente trajectos entre a zona das vinhas onde os dados são recolhidos e o local onde se encontra o sistema de processamento final da informação. Este tipo de configuração tem a vantagem de permitir uma instalação mais espaçada dos nós pela vinha visto que não existe a necessidade dos nós vizinhos comunicarem. O facto dos nós estáticos terem de estar constantemente a escutar o meio de modo a detectarem a passagem dos nós móveis é uma desvantagem deste tipo de arquitectura com reflexos ao nível dos consumos de energia de cada nó.

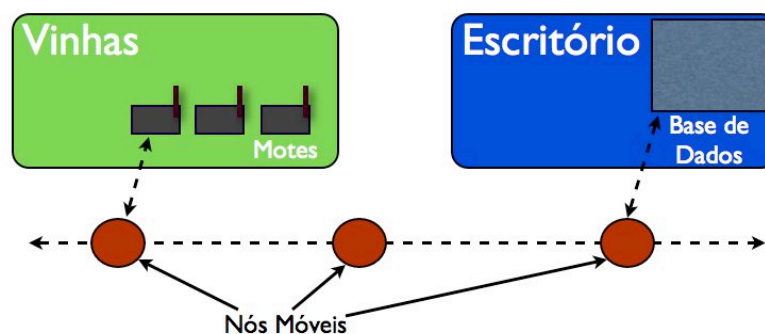


Figura 6 – Arquitectura do projecto *Vineyard Computing* [12]

### 3.2.2 Life Under Your Feet

O projecto *Life Under your Feet*, descrito em [27], consiste na aplicação de uma rede de sensores ao estudo da ecologia do solo. É um esforço conjunto de três departamentos da *Johns Hopkins University* (*Earth and Planetary Sciences*, *Physics* e *Computer Science*) e da *Microsoft Research* e tem como objectivo compreender os efeitos das condições ambientais no ecossistema do solo. Este projecto teve como preocupação causar o mínimo de perturbações na área estudada.

A arquitectura do sistema desenvolvido encontra-se representada na Figura 7. É constituída por um subsistema de recolha de dados (*motes + base station*) e por uma base de dados. Cada mote está ligado a quatro sensores. A placa de aquisição MTS101 da *Crossbow* inclui sensores de luz ambiente e temperatura e portos para ligar sensores externos. A estes portos estão ligados um sensor de humidade e outro de temperatura do solo. A *MicaZ* fornece 512KB de memória *flash* que é utilizada para guardar as medições efectuadas. Visto que cada mote recolhe 23KB de dados por dia, só é absolutamente necessário transferir esta informação de 22 em 22 dias. Na prática as medições guardadas nos motes são recolhidas semanalmente. Cada mote efectua o *broadcast* do seu *status* (número de amostras recolhidas e carga da bateria) a cada 2 minutos. A mensagem que contém esta informação é retransmitida múltiplas vezes durante o período de um segundo durante o qual a *Base Station* pode iniciar a recolha das medições guardadas na memória *flash*.

Os dados recolhidos pelos sensores são complementados com informações obtidas a partir de fontes externas, tais como repositórios online, no formato CSV. Esta informação inclui temperatura, precipitação, humidade, pressão atmosférica e eventos meteorológicos (e.g. chuva, neve, trovoadas).

O cenário de teste foi implementado numa floresta urbana no campus da Universidade Johns Hopkins. Foram instalados 10 motes separados por uma distância de 2 metros que comunicam com uma *base station* instalada dentro de um edifício. Uma informação interessante, que foi possível obter através dos dados recolhidos por esta rede de sensores, foi a de que apesar da temperatura ambiente ter sido por diversas vezes inferior a 0°, o solo nunca congelou. Este facto pode ser explicado pelo efeito isolante da neve que cobre a superfície e pelo calor gerado pelos processos metabólicos da ecologia subterrânea.

A informação recolhida neste projecto será utilizada por biólogos para prever onde e quando ocorrerá actividade microbiana ou de organismos invertebrados do solo. Esta actividade está intimamente relacionada com o processo de respiração do solo que é um componente importante, mas pouco estudado, do ciclo do carbono. A monitorização continua do ecossistema do solo permitirá compreender melhor a sua contribuição nestes processos de larga escala.

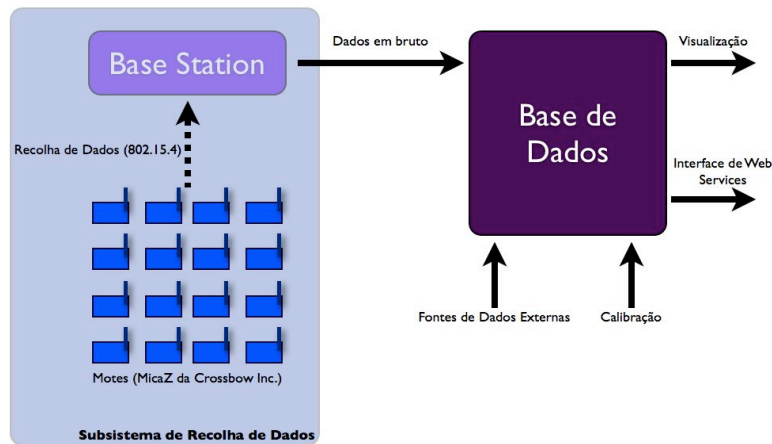


Figura 7 – Arquitectura do projecto *Life Under Your Feet* [27]

### 3.2.3 Wireless Sensor Network for Variable Rate Irrigation in Citrus

O projecto *Wireless Sensor Network for Variable Rate Irrigation in Citrus*, descrito em [29], utiliza uma rede de sensores e actuadores para irrigar plantações de citrinos no estado brasileiro de São Paulo. Este estado possui uma das maiores áreas de produção de citrinos do mundo. Actualmente a maior parte desta área não possui qualquer sistema de irrigação, mas as alterações climáticas e o aparecimento de novas doenças irão obrigar a uma alteração deste cenário. Os escassos recursos hidrológicos da região tornarão indispensável o desenvolvimento e implementação de métodos de conservação de água.

O sistema proposto utiliza uma rede de sensores e actuadores fixos que comunicam através de ligações sem fios para gerir todo o processo de irrigação.

O facto dos sistemas de redes de sensores disponíveis comercialmente serem ainda demasiado dispendiosos para os países em vias de desenvolvimento e não se encontrarem adaptados ao uso em ambientes agrícolas tornou necessário o desenvolvimento de um novo sistema de monitorização e controlo da irrigação. O sistema é constituído por nós sensoriais, actuadores, uma ou várias *Field Stations* e uma *Base Station* tal como ilustrado na Figura 8.

Os nós sensoriais utilizam sensores capacitivos para medir a humidade do solo, enquanto os nós actuadores encontram-se ligados a válvulas electromecânicas que permitem controlar o sistema de irrigação.

Cada *Field Station* tem uma cobertura de aproximadamente 100 hectares, o que significa que pode controlar 400 nós remotos separados por uma distância de 50 metros. Tendo em conta a dimensão média das propriedades agrícolas desta região brasileira estima-se que serão necessárias 10 *Field Stations* em média. Cada *Field Station* é constituída por um CPU, uma mini estação meteorológica, uma interface *WLAN 802.11b*, e um dispositivo de comunicação de dados proprietário que permite comunicar com os nós remotos. Todos

estes equipamentos são alimentados por duas baterias de 55Ah recarregadas por um painel solar foto voltaico de 70 watts.

A *Base Station* é composta por um computador pessoal e um ponto de acesso *WLAN* 802.11b que realiza a comunicação com todas as *Field Stations*. A partir da *Base Station* é possível aceder a toda a informação recolhida, gerir o funcionamento do sistema e controlar os nós actuadores.

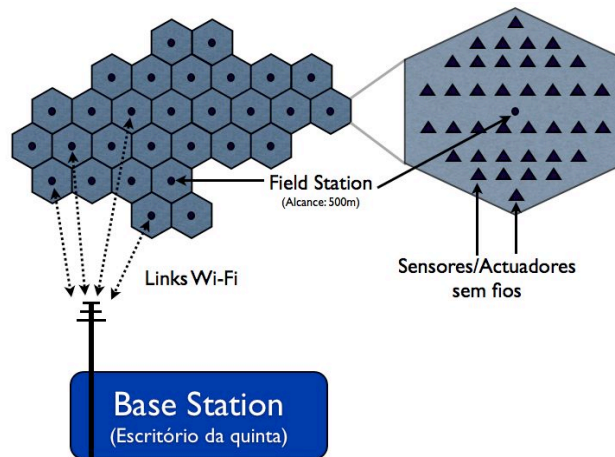


Figura 8 – Arquitectura do projecto Wireless Sensor Network for Variable Rate Irrigation in Citrus [29]

### 3.2.4 COMMON-Sense Net

O projecto *COMMON-Sense Net: Improved Water Management for Resource-Poor Farmers via Sensor Networks*, descrito em [30], tem como objectivo o desenho e implementação de uma rede de sensores que auxilie a gestão agrícola em Países em vias de desenvolvimento. Estes Países situam-se sobretudo nas regiões semi-áridas dos trópicos onde a precipitação é escassa e imprevisível e as populações rurais não possuem os recursos necessários para se adaptarem às variações climáticas. O desenvolvimento de sistemas que permitam otimizar a utilização da água poderá ser essencial para a sobrevivência destas populações. Foi com este objectivo que o projecto COMMON-Sense desenvolveu um sistema de suporte à decisão, adaptado às necessidades das populações agrícolas com poucos recursos, utilizando o conceito de redes de sensores para monitorização de parâmetros ambientais.

A arquitectura utilizada neste projecto encontra-se representada na Figura 9. São utilizadas pontes 802.11 para interligar os diferentes *clusters* da rede. Esta solução permite aumentar a abrangência e escalabilidade da rede instalada. O sistema desenvolvido é constituído por 6 subsistemas que serão descritos de seguida.

O subsistema de **Sensing** é responsável pela medição de parâmetros ambientais. É utilizada a placa MTS400 da Crossbow para a medição de temperatura, humidade, luz ambiente e pressão barométrica. Visto que estes parâmetros meteorológicos não variam significativamente na área monitorizada apenas dois nós estão equipados com esta placa, por razões de redundância. A humidade do solo tem uma grande variabilidade espacial e temporal pelo que, no primeiro protótipo, é medida a cada 5 minutos por 10 nós, utilizando sensores ECH<sub>2</sub>O ligados a placas de aquisição MTS300.

O subsistema de **Data Collection** utiliza um modelo centralizado onde os nós remotos realizam um processamento mínimo dos dados antes de os enviarem para um servidor central através de uma *base station* (802.11b). Devido ao facto da distância entre nós ser superior a 100 metros, a grande maioria destes não consegue contactar com a *base station* directamente sendo por isso utilizada uma topologia *multi-hop*. A frequência de transmissão, sendo sempre inferior à de medição (de 5 em 5 minutos), é ajustada automaticamente ao nível dos nós dependendo da variabilidade dos parâmetros medidos.

O subsistema de **Data Transit** utiliza ligações sem fios 802.11b para interligar os diferentes clusters da rede. Estas ligações utilizam PC's adaptados e pontos de acesso que se encontram ligados à rede eléctrica. Esta solução, para além de cara, está dependente da existência de instalações eléctricas, pelo que está a ser estudada a utilização de um modulo embebido série – 802.11b.

O subsistema de **Data Logging and Network Management** utiliza uma interface Java que possibilita a extracção de dados da rede de sensores ou o envio de comandos que permitem modificar parâmetros da rede, tais como a potência de transmissão ou os canais rádio utilizados.

O subsistema de **Data Processing** tem como objectivo a utilização dos dados recolhidos pela rede de sensores como input para modelos de simulação do crescimento das plantações como o *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT) [31] ou o *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM) [24,25].

O subsistema de **Data Access** utiliza uma interface Web que permite visualizar os dados processados ou em bruto. Como a maior parte dos agricultores da região estudada não têm acesso à Internet, são impressos gráficos e tabelas que lhes são disponibilizados.



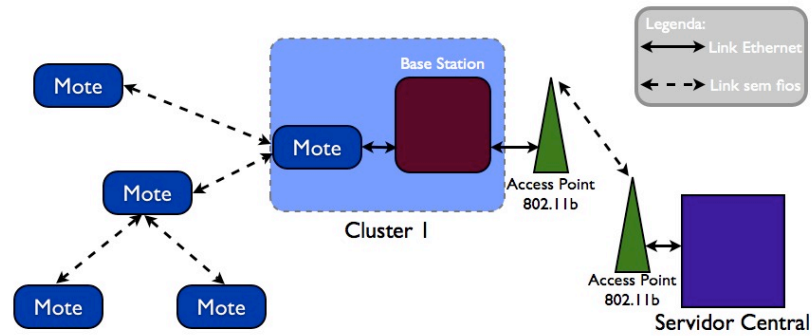


Figura 9 – Arquitectura do projecto *COMMON-Sense Net* [30]

### 3.2.5 PermaSense

O projecto *PermaSense: Investigating Permafrost with a WSN in the Swiss Alps*, descrito em [28], utiliza uma rede de sensores para medir parâmetros físicos do solo congelado com o objectivo de compreender o seu comportamento perante as alterações climáticas. Permafrost é definido como o solo que permanece a temperaturas inferiores a 0° durante todo o ano. A sua ocorrência é frequente nas regiões mais frias do planeta (junto aos pólos ou a grandes altitudes). O aquecimento global tem levado a que algumas áreas constituídas por este tipo de solo atinjam temperaturas mais elevadas do que o habitual. Em zonas montanhosas, como é o caso dos Alpes Suíços, a subida da temperatura torna o solo permafrost menos consistente podendo originar a libertação de material rochoso. Este fenómeno pode causar danos em infra-estruturas construídas pelo homem como estâncias turísticas, estradas ou linhas ferroviárias.

De modo a que seja possível construir modelos que permitam prever o comportamento do solo congelado é necessária uma medição contínua dos parâmetros representativos do estado deste solo. Um sistema de monitorização permanente destes parâmetros é essencial para alertar as autoridades responsáveis para o risco de derrocadas resultantes do descongelamento do solo permafrost.

Devido às dificuldades de acessibilidade a estas zonas montanhosas a utilização de uma rede de sensores tradicional (com fios) não seria adequada para esta aplicação. Durante 7 a 8 meses do ano as condições meteorológicas extremas não permitem qualquer tipo de acesso às zonas a monitorizar. Devido a estes factores o projecto *PermaSense* tem como objectivo a construção de uma rede de sensores auto-organizada e que se mantenha em funcionamento durante alguns anos sem necessitar de manutenção.

A arquitectura utilizada neste projecto encontra-se representada na Figura 10. São utilizados um, ou vários, nós GSM/GPRS que permitem ligar a rede de sensores à Internet. Cada nó remoto mede em tempo “quase” real quatro temperaturas e quatro condutividades que permitem aferir a humidade e estado físico do solo. É utilizada uma topologia *multi-hop* para encaminhar os dados até ao nó que contém o módulo GPRS (Siemens Wireless

Module TC65). Os dados recolhidos pela rede de sensores são enviados para uma base de dados que corre num servidor Linux. Este servidor contém uma interface Web que permite gerar relatórios e gráficos a partir dos dados recolhidos.

A periodicidade com que a temperatura e condutividade têm de ser medidos depende da estação do ano e altura do dia. Enquanto durante o dia (ou noite) as medições poderão ser pouco frequentes, nas transições dia/noite (aquecimento/arrefecimento) a sua periodicidade terá de ser mais elevada. Devido ao facto da rede de sensores se encontrar inacessível durante longos períodos de tempo foram criados mecanismos que permitem modificar remotamente o comportamento da rede de sensores através do envio de comandos ou parâmetros em *run-time*.

Em Agosto de 2006 foram instalados 10 nós remotos em Jungfrauoch, 3500 metros acima do nível do mar, nos Alpes Suíços. Este cenário de teste foi testado durante vários meses com sucesso visto que a rede de sensores se manteve a enviar uma *stream* continua de dados em tempo “quase” real. Está prevista a realização de vários upgrades a esta rede com a adição de mais nós remotos e de novos sensores que permitam medir a dilatação de fendas ou a ocorrência de micro-vibrações sísmicas.

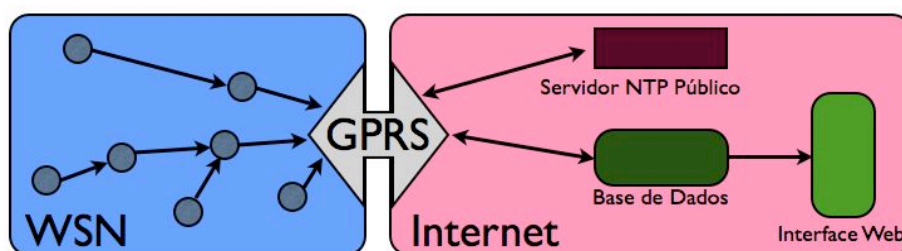


Figura 10 – Arquitectura do projecto *PermaSense* [28]

### 3.2.6 Wireless Underground Sensor Networks (WUSN)

O projecto *Wireless Underground Sensor Networks*, descrito em [32], diferencia-se dos restantes ao propor que os nós sensoriais (e respectivas antenas) se encontrem totalmente soterrados. A comunicação sem fios é portanto realizada através do solo e não utilizando o meio ar tradicional. Nos projectos de monitorização de parâmetros do solo descritos anteriormente os sensores encontram-se no subsolo mas as antenas são instaladas a cima da superfície, onde a comunicação sem fios é tipicamente realizada. Este tipo de configuração requer que os diferentes componentes de um nó remoto (sensores, mote e antena) sejam ligados através de cabos, o que torna a sua instalação complexa.

A solução apresentada neste projecto torna possível a criação de dispositivos que contêm todos os componentes de que um nó remoto necessita para funcionar (sensores, memória, processador, rádio, antena e fonte de energia). O facto de cada nó ser constituído apenas por um dispositivo facilita a sua instalação por pessoal não especializado. O processo de

instalação consiste apenas em colocar o dispositivo no local que se pretende monitorizar e garantir que este se encontra a uma distância dos restantes nós que permita a comunicação.

A instalação de todo o equipamento no subsolo garante que este se encontra protegido de possíveis danos causados por intempéries, animais ou equipamentos agrícolas como tractores ou cortadores de relva. A invisibilidade garantida por esta solução tem a vantagem adicional de facilitar a sua utilização em jardins ou campos desportivos (e.g. futebol, golfe, etc.) visto que não existem equipamentos acima do solo que interfiram com a prática desportiva ou com a estética destes locais. Em locais públicos esta invisibilidade é também benéfica visto que torna os equipamentos menos susceptíveis a roubos ou vandalismo.

Apesar de todas as vantagens descritas anteriormente existem alguns problemas que terão de ser ultrapassados para que a aplicação do conceito de *Wireless Underground Sensor Network* (WUSN) seja possível na prática. A comunicação sem fios no subsolo é incomparavelmente mais complexa e menos estudada do que a comunicação sem fios através do ar. Este facto combinado com as maiores dificuldades de troca ou recarga das baterias devido a estas se encontrarem soterradas obrigará à revisão das arquitecturas e protocolos actualmente utilizados nas redes de sensores.

Os autores deste projecto propõem duas topologias diferentes:

- **Subterrânea:** Consiste em instalar todos os nós sensórias no subsolo com excepção do nó sink que poderá ser instalado no subsolo ou a cima da superfície. Os nós poderão ser instalados todos à mesma profundidade ou a profundidades diferentes dependendo da aplicação. Os nós instalados mais perto da superfície poderão utilizar o canal solo-ar-solo que deverá apresentar menos perdas que o canal solo-solo. Esta topologia tem a vantagem de minimizar (ou eliminar, no caso de o nó sink também ser instalado no subsolo) a instalação de equipamento a cima da superfície (ver Figura 11).
- **Híbrida:** Esta topologia utiliza alguns nós instalados à superfície que proporcionam uma comunicação a maiores distâncias, com menos perdas e menos exigente em termos energéticos do que os nós instalados no subsolo. Os nós terrestres permitem uma recarga ou substituição das baterias mais simples, pelo que deverão ser utilizados preferencialmente para realizar as operações energeticamente mais exigentes. Esta topologia introduz as desvantagens inerentes à instalação de nós a cima da superfície (ver Figura 12).

Em [33] foi testada a comunicação no subsolo com motes MicaZ da Crossbow utilizando uma frequência de 2.4GHz e uma potência de transmissão de 1mW. Os testes realizados permitiram concluir que, utilizando estes equipamentos, apenas é possível a comunicação

entre nós soterrados e nós terrestres a distâncias muito curtas. Nesta situação a distância máxima de comunicação conseguida foi de 7 metros com o nó instalado no subsolo a uma profundidade de 6 centímetros. A comunicação entre dois nós instalados no subsolo revelou-se impraticável.

Devido aos maus resultados obtidos utilizando ondas electromagnéticas para comunicações no subsolo são propostas outras alternativas como a utilização de indução magnética [34] ou ondas sísmicas [35]. A indução magnética apresenta-se como a alternativa mais credível visto que, sendo a permeabilidade magnética do solo similar à do ar, a taxa de atenuação dos campos magnéticos é aproximadamente a mesma em ambos os meios. No entanto a força dos campos magnéticos decresce como função de  $1/R^3$ , onde  $R$  é a distância ao transmissor, comparado com  $1/R$  ou  $1/R^2$  para as ondas EM. A comunicação utilizando ondas sísmicas requer quantidades de energia incompatíveis com nós alimentados por baterias.



Figura 11 – Topologia Subterrânea



Figura 12 – Topologia Híbrida

### 3.3 Análise Comparativa na perspectiva dos aspectos tecnológicos relevantes

Como pode ser verificado através do estudo dos projectos descritos anteriormente, a aplicação do conceito de redes de sensores ao mundo real enfrenta desafios tecnológicos que são abordados de forma diferente por cada projecto. O facto de não existirem soluções universais que possam ser utilizadas com sucesso em todas as diferentes aplicações das redes de sensores torna cada projecto único. Nas secções seguintes é realizado um estudo comparativo da forma como os projectos descritos anteriormente abordam os principais desafios tecnológicos que se lhes colocam, listados no capítulo 2.

### 3.3.1 Eficiência Energética

O projecto *Life Under Your Feet* [27], descrito anteriormente, utiliza duas baterias alcalinas AA com uma capacidade de 2100mAh para alimentar os nós remotos (motes MicaZ). Durante um ciclo de 2 minutos o rádio é ligado durante 1 segundo (consumindo 23mA) e os sensores são activados duas vezes (cada leitura dura meio segundo consumindo 0.6mA). Durante o resto do tempo o mote permanece em *low power mode* consumindo (0.16mA). A corrente média consumida é por isso aproximadamente 0.35mA.

Depois de 70 dias em funcionamento a tensão de alimentação fornecida pelas baterias caiu de 3V para 2.6V. Utilizando o modelo linear de descarga proposto é possível determinar que uma queda de tensão de 0.4V (0.2V por bateria) corresponde a um consumo de 600mAh. Este valor encontra-se muito próximo dos 595mAh calculados através do consumo médio do mote (a diferença pode ser explicada pela energia consumida durante os downloads de dados a partir dos motes, que não foram contabilizados no cálculo do consumo médio). Os autores deste projecto defendem que este modelo pode ser utilizado para estimar o tempo de vida de uma rede de sensores dada a frequência de medição, ou inversamente, calcular a frequência máxima de medição dado o tempo de vida que se pretende que a rede de sensores consiga atingir.

As especificações do processador ATMEGA128, utilizado no mote MicaZ, recomendam a utilização de uma tensão de alimentação entre 2.7V e 3.6V. No entanto, os autores deste projecto, defendem que testes por si realizados, demonstraram que os motes permanecem em funcionamento com tensões até aos 2.2V (quando a memória flash deixa de funcionar correctamente). Tendo este facto em conta o tempo de vida estimado para a rede de sensores implementada neste projecto é de aproximadamente 5 meses e meio.

O projecto *Wireless Sensor Network for Variable Rate Irrigation in Citrus* [29], descrito anteriormente, utiliza uma bateria de lítio de 3.6V e com uma capacidade de 1000mAh para alimentar os nós sensoriais. Os nós actuadores são alimentados por 4 baterias NiCd de 1.2V e uma capacidade de 800mAh associadas a um painel solar foto voltaico de 1 Watt. As *Field Stations* são alimentadas por duas baterias com uma capacidade de 55Ah recarregadas por um painel solar foto voltaico de 70 watts.

Apesar de não ter sido disponibilizada informação relativa à performance energética do sistema proposto neste projecto, será espectável que o tempo de vida dos equipamentos que possuem baterias recarregáveis através de painéis solares esteja dependente das condições meteorológicas (radiação solar) da região a monitorizar. Os nós sensoriais, que utilizam baterias não recarregáveis, permanecem a maior parte do tempo em *sleep mode*, sendo activados apenas a cada 15 minutos para aquisição de dados. O tempo de vida esperado para estes nós é de pelo menos 6 meses.

O projecto *COMMON-Sense Net* [30], descrito anteriormente, definiu como objectivo que os nós remotos permanecessem em funcionamento durante toda a época em que é

necessário irrigar as plantações (aproximadamente 6 meses). No entanto, os primeiros testes realizados revelaram que os nós sensoriais de temperatura/pressão/humidade permaneciam em funcionamento durante aproximadamente 2 meses e os nós sensoriais de humidade do solo tinham uma duração média de 1 mês. Estes resultados levaram os autores deste projecto a realizarem algumas optimizações ao software desenvolvido, como por exemplo reduzir o tempo de excitação dos sensores de humidade do solo de 50ms para 10ms. Encontra-se também em estudo a utilização de painéis solares como fonte alternativa de energia para alimentar os nós sensoriais.

O projecto *PermaSense* [28], descrito anteriormente, utiliza baterias de lítio (Li-SOCl<sub>2</sub>) para alimentar os nós sensoriais remotos visto que este tipo de baterias é mais estável a baixas temperaturas do que as alcalinas. Para alimentar o nó GPRS são utilizadas 6 baterias Li-SO<sub>2</sub> (3 pares em paralelo de 2 unidades em série). Este tipo de baterias pode produzir correntes de até 2.5A que são necessárias para alimentar os nós GPRS durante as transmissões. A utilização de painéis solares revelou-se impraticável devido à formação de gelo nos painéis que bloqueia a radiação solar.

Os nós remotos utilizados pelo projecto *PermaSense* são os *TinyNode-584* da *Shokwave*, descritos em [36], que utilizam um processador MSP430 de 8MHz da *Texas Instruments* e um rádio de 868MHz (Xemics XE1205). Depois de uma optimização de todo o hardware e software utilizados e de algumas alterações ao código fonte do TinyOS foi possível reduzir o consumo de energia dos nós remotos em sleep mode de 400µA para 12µA. Durante as transmissões estes nós consomem 14mA. Na Tabela 1 podem ser comparados os consumos energéticos dos nós remotos *TinyNode-584* [36] da *Shokwave* com os do projecto *Life Under Your Feet* que utiliza a plataforma *MicaZ* [37] da *CrossBow*. Nos nós GPRS as optimizações efectuadas permitiram reduzir o seu consumo de energia em modo standby de 5.8mA para 22µA. Com os valores referidos os autores deste projecto estimam que a rede de sensores instalada permaneça em funcionamento durante 4-5 anos sem necessidade de substituir baterias.

No projecto *Wireless Underground Sensor Networks* [32], descrito anteriormente, o facto dos nós remotos se encontrarem soterrados torna o processo de substituição de baterias complexo e dispendioso e inviabiliza a utilização de painéis solares. São por isso apresentadas algumas soluções para obtenção de energia a partir de fontes menos convencionais tais como vibrações sísmicas [5][6] ou gradientes térmicos [7]. Estando este projecto ainda numa fase conceptual, a viabilidade das soluções apresentadas ainda se encontra por apurar.

	Sleep Mode	Transmission Mode
Life Under Your Feet (MicaZ [37])	0.16mA	23mA
PermaSense (TinyNode-584 [36])	0.012mA	14mA

Tabela 1 – Consumos de Energia de Life Under Your Feet e PermaSense<sup>2</sup>

### 3.3.2 Localização

Todos os projectos descritos na secção 3.2 referem a necessidade de associar aos dados adquiridos pelos nós sensoriais informação relativa ao local onde estes foram recolhidos. Actualmente os elevados custos associados a cada nó remoto e a sua reduzida robustez são factores que inviabilizam a sua instalação aleatória e posterior auto-organização tal como definido no conceito de redes de sensores [1]. Hoje em dia, nos projectos que utilizam redes de sensores para monitorizar parâmetros ambientais, cada nó remoto é instalado individualmente e a associação entre a identificação de cada nó e a sua localização geográfica é realizada de forma manual.

A evolução da tecnologia associada às redes de sensores deverá permitir, num futuro próximo, a produção de nós remotos a preços reduzidos e com uma robustez estrutural que permita tornar realidade a visão de redes de sensores instaladas aleatoriamente (e.g. lançadas a partir de aviões sobre locais remotos). Num cenário deste tipo as técnicas de auto-localização serão de extrema utilidade.

No projecto Wireless Sensor Network for Variable Rate Irrigation in Citrus [29], descrito anteriormente, foi desenvolvido um kit de instalação que tem como objectivo facilitar a instalação e manutenção do sistema proposto. Este kit é composto por um PDA ligado a um receptor GPS e dois módulos de software que são executados na Base Station e no PDA. O processo de instalação começa com uma instalação virtual dos nós remotos utilizando o software da Base Station. Posteriormente a informação relativa à localização e configuração de cada nó remoto é transferida da Base Station para o PDA. O software que é executado no PDA utiliza o receptor GPS para indicar à pessoa que se encontra a realizar a instalação os locais exactos onde deverá instalar cada nó. A informação de configuração de cada nó remoto (ID, informação de encaminhamento, frequência de aquisição e frequência de transmissão) é transferida do PDA para cada um dos nós. Este sistema automatiza o processo de instalação da rede tornando-o mais fácil, rápido e menos susceptível a erros.

---

<sup>2</sup> Os consumos obtidos dependem não só das plataformas utilizadas mas também do software desenvolvido em cada projecto

### 3.3.3 Reactividade

No projecto *Vineyard Computing: Sensor Networks in Agricultural Production* [12], descrito anteriormente, é referida a necessidade de medir a temperatura das vinhas mais frequentemente durante as noites de inverno, quando esta baixa para valores que poderão indiciar um aumento do risco de formação de geada. Nesta situação a rede deverá aumentar a frequência com que realiza medições de temperatura de modo a poder detectar rapidamente a eminência da formação de geada permitindo alertar atempadamente o pessoal responsável. Durante períodos mais quentes, em que a temperatura se encontra afastada dos 0°, poderão ser realizadas medições menos frequentes poupando energia em medições e transmissões.

O projecto *Life Under Your Feet* [27], descrito anteriormente, utiliza um protocolo reactivo que se adapta de forma oportunista às condições do ambiente (ROPE [38]). Este protocolo utiliza as capacidades de processamento e de memória de cada nó da rede para comprimir e guardar localmente os dados recolhidos. Estes dados são transmitidos em *bursts* quando as condições de comunicação forem boas. O protocolo ROPE é particularmente adequado para os sistemas de monitorização de parâmetros ambientais que utilizam redes de sensores instaladas ao ar livre devido ao facto de nestes ambientes o desempenho das comunicações variar consideravelmente com as condições meteorológicas. Ao procurar evitar transmissões quando as condições de comunicação são mais adversas este protocolo minimiza a energia gasta em retransmissões maximizando o tempo de vida útil da rede.

No projecto *COMMON-Sense Net* [30], descrito anteriormente, a frequência com que são realizadas as medições é constante (de 5 em 5 minutos), mas a frequência de transmissão depende da variabilidade dos parâmetros medidos, sendo ajustada automaticamente ao nível dos nós. Quando os parâmetros medidos não se alteram significativamente a frequência de transmissão é reduzida. Pelo contrário, quando se verificam grandes alterações nestes parâmetros a frequência de transmissão aumenta. Esta alteração da frequência de transmissão permite poupar energia, reduzindo o número de transmissões, em períodos em que os parâmetros medidos variam lentamente e ao mesmo tempo manter a capacidade de disseminar rapidamente dados relativos a alterações acentuadas nestes parâmetros.

### 3.3.4 Robustez

A robustez global de uma rede de sensores está dependente de um grande conjunto de factores. A capacidade que os protocolos de comunicação utilizados têm de recuperar de erros, a topologia de rede utilizada, a existência de nós redundantes, a qualidade das transmissões rádio, o tempo de vida de cada nó e a sua robustez física individual são apenas alguns dos factores que influenciam a robustez global da rede. As topologias de rede utilizadas, os protocolos de comunicação e a forma como cada projecto aborda o tema



da eficiência energética já foram descritos anteriormente. Nesta secção apenas será descrita a forma como os projectos estudados garantem a robustez física de cada nó da rede.

No projecto *Wireless Sensor Network for Variable Rate Irrigation in Citrus* [29], descrito anteriormente, os nós remotos encontram-se instalados dentro de caixas de alumínio estanques situadas 50cm acima do solo com a antena instalada no seu topo. Os sensores de humidade do solo encontram-se estruturalmente ligados à caixa que contem o mote através de um tubo de PVC que garante a estanquicidade de todo o sistema e o suporte da caixa de alumínio. O sistema proposto neste projecto tem a vantagem de situar a antena a uma altura do solo superior a 50 cm. A esta altura é possível comunicar a maiores distâncias e com menos perdas do que com a antena instalada junto ao solo.

No projecto *PermaSense* [28], descrito anteriormente, a rede de sensores utilizada para medir parâmetros ambientais encontra-se instalada a 3500 metros de altitude nos Alpes Suíços. As condições meteorológicas adversas que se fazem sentir a estas altitudes obrigam a que sejam desenvolvidos mecanismos específicos para proteger todos os elementos da rede. Os componentes electrónicos do nó remoto são instalados numa caixa de alumínio à prova de água. Adicionalmente é utilizada uma cobertura em aço inoxidável para proteger a caixa de alumínio, a ligação aos sensores e o suporte da antena. Esta cobertura em aço inoxidável é polida para prevenir o aquecimento através da radiação solar e serve como protecção electromecânica contra a queda de pedras ou raios. Todos os componentes electrónicos são revestidos com um gel que os protege da condensação.

Uma das grandes vantagens defendidas pelos autores do projecto *Wireless Underground Sensor Networks* [32], descrito anteriormente, é a da maior protecção conferida aos nós remotos pelo facto de estes se encontrarem instalados abaixo da superfície. O ambiente subterrâneo é, de facto, mais “previsível” do que a superfície, onde se desenrolam a grande maioria das actividades desenvolvidas por pessoas, animais e máquinas agrícolas. Ainda assim, os nós subterrâneos necessitam de mecanismos de protecção física devido ao movimento de organismos que habitam no subsolo, ao crescimento de raízes de árvores e plantas e à água que se infiltra no solo.

### **3.3.5 Proactividade**

No projecto *Vineyard Computing* [12], descrito anteriormente, é referida a necessidade de utilizar sistemas proactivos no combate a certos tipos de pragas que atacam as vinhas. Se, por exemplo, a rede de sensores detectar a presença de pássaros na vinha não fará muito sentido apenas alertar o responsável. Um bando de pássaros poderá causar grandes danos à vinha no espaço de tempo de 1 a 2 minutos. Um sistema proactivo que produza um forte sinal sonoro de modo a afugentar os pássaros seria incomparavelmente mais útil.

Neste projecto são referidos outros tipos de sistemas proactivos que poderão ser aplicados à produção agrícola, como a aplicação automática de pesticida quando é detectado o risco de infecção ou um sistema de irrigação que racionalize a água existente.

Em zonas com recursos hidrológicos escassos a realização de uma rega selectiva consoante as necessidades das plantas de cada uma das zonas da plantação permite otimizar a utilização da água. A utilização de sistemas proactivos para efectuar este tipo de gestão da rega traz a vantagem adicional de facilitar o trabalho dos agricultores, libertando-os para outras tarefas.

No projecto *Wireless Sensor Network for Variable Rate Irrigation in Citrus* [29], descrito anteriormente, é implementado um sistema constituído por sensores e actuadores com o objectivo de realizar uma gestão eficiente e proactiva da rega. Os dados recolhidos pelos sensores são utilizados para determinar as necessidades hídricas das diferentes zonas das plantações de citrinos. Esta informação é processada de forma a determinar a quantidade de água que deverá ser fornecida a cada zona. A rede de actuadores permite que o sistema active a rega de forma diferenciada em cada uma destas zonas. Uma implementação deste tipo, depois de testada e bem calibrada, permitirá uma irrigação eficiente e sem a necessidade de intervenção humana.

### **3.4 Conclusões**

Este capítulo apresenta uma descrição do actual estado da arte da aplicação de redes de sensores sem fios à monitorização de parâmetros ambientais. São descritos os projectos considerados mais relevantes nesta área e é discutida a forma como estes abordam os principais desafios tecnológicos que se lhes colocam. Desta discussão é possível concluir que cada projecto adopta soluções diferentes para problemas semelhantes. As características únicas do conceito de redes de sensores fazem com que pequenas variações nos requisitos de cada projecto obriguem ao desenvolvimento de soluções completamente diferentes. Numa fase ainda embrionária de desenvolvimento tecnológico são poucas as soluções universais que podem ser utilizadas com sucesso em todas as aplicações das redes de sensores. Por este motivo um dos maiores desafios inerentes ao desenvolvimento de aplicações nesta área prende-se com a escolha das soluções que melhor se adaptam aos requisitos de cada aplicação.

## 4. Análise de Requisitos e Concepção da Solução

Neste capítulo é descrito o processo de concepção da aplicação de monitorização ambiental desenvolvida no âmbito desta dissertação. Em primeiro lugar é relatado todo o processo de análise de requisitos efectuado com a colaboração de especialistas na área da agronomia e responsáveis pela gestão de campos de golfe. Este processo de análise permitiu compreender como funciona actualmente um campo de golfe e quais as necessidades dos responsáveis pela sua manutenção que podem ser cumpridas por um sistema de monitorização ambiental distribuído. Posteriormente são apresentados os resultados de um estudo que teve o objectivo de caracterizar a comunicação sem fios entre os nós remotos disponibilizados para este trabalho (motes MicaZ, descritos em [37]) num campo de golfe real. De seguida é apresentada a arquitectura proposta para o sistema, que teve em linha de conta não só a análise de requisitos efectuada mas também as características da comunicação sem fios entre motes. Finalmente, é descrito o algoritmo de medição e actuação desenvolvido que permite controlar o comportamento da rede de sensores.

### 4.1 Requisitos e Objectivos

O primeiro passo para identificar os requisitos que este projecto deverá cumprir foi estudar o funcionamento de um campo de golfe real e do seu sistema de rega. O campo de golfe *Oeiras Golf & Residence* serviu como caso de estudo para este propósito. A contribuição dos responsáveis pela manutenção do relvado deste campo de golfe foi fundamental na caracterização do seu funcionamento actual e na identificação dos requisitos que uma aplicação de auxílio à gestão da rega deverá cumprir.

Segue-se uma breve descrição do funcionamento do sistema de rega de um campo de golfe típico e dos mecanismos utilizados para adequar a quantidade de água utilizada nas regas às necessidades da relva em cada momento. Posteriormente serão listados os requisitos funcionais identificados.

#### 4.1.1 Situação Actual

O sistema de rega do campo de golfe estudado é constituído por quatro componentes fundamentais: bombas de água, satélites de controlo, aspersores e tubagens.

As bombas de água são utilizadas para extrair água do subsolo e para conferir pressão ao sistema de rega. Neste campo de golfe existem dois tipos de bombas de água com funções diferentes. Um primeiro conjunto de bombas é responsável por extrair a água do subsolo para lagos artificiais existentes no campo de golfe. Esta água é posteriormente bombeada para o sistema de rega através de um segundo conjunto de bombas.

Os satélites de controlo, representados na Figura 13.A, são pequenas estações fixas espalhadas pelo campo de golfe que permitem controlar o funcionamento dos aspersores, representados na Figura 13.B. No campo de golfe estudado existem 15 destes satélites,

aproximadamente um por cada *green*. É possível controlar o tempo que cada zona do campo de golfe permanece em irrigação através destes satélites. Os satélites de controlo encontram-se permanentemente alimentados com 220V de tensão AC enquanto que os aspersores são alimentados por 24V DC apenas quando se encontram ligados.

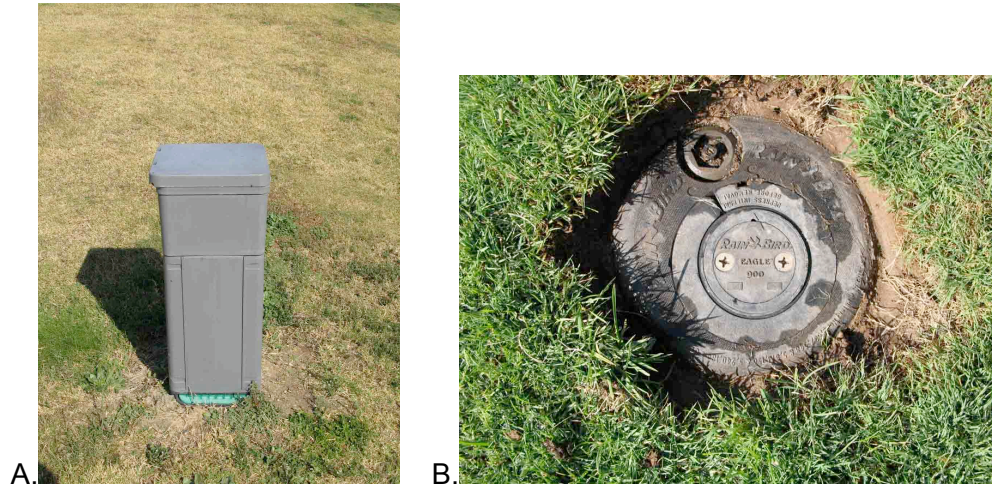


Figura 13 – Satélite de Controlo e Aspersor do Campo de Golfe estudado

O número de aspersores que se podem encontrar em modo de rega simultaneamente encontra-se limitado pela pressão da água existente no sistema. Devido a este facto cada zona do campo de golfe tem de ser regada separadamente. Actualmente não existe nenhuma forma de controlo centralizada sobre o sistema, o que implica que alguém tem de percorrer todos os satélites e definir manualmente o tempo que os aspersores controlados por cada satélite deverão permanecer em modo de rega.

Com o objectivo de determinar a quantidade de água que cada zona do campo de golfe necessita o responsável pela manutenção da relva, designado por *greenkeeper*, utiliza a informação recolhida por uma estação meteorológica. Esta informação é utilizada em modelos agronómicos que permitem determinar aproximadamente os consumos de água da cultura no período precedente. Devido ao facto de se encontrar num local fixo, a estação meteorológica apenas pode medir parâmetros gerais sobre as condições ambientais do campo de golfe como um todo. Não existe informação precisa sobre as condições da relva em cada zona do campo de golfe. Esta falta de informação não permite ao *greenkeeper* fazer distinções precisas sobre as necessidades de água de cada zona do campo o que pode resultar na definição de tempos de rega iguais para todas as zonas. Para manter todo o campo em boas condições os tempos de rega são definidos de modo a irrigar correctamente as zonas com maiores necessidades de água. Aquelas zonas que não necessitam de tanta água são excessivamente irrigadas, o que resulta num desperdício de água.

Segundo os responsáveis do campo de golfe *Oeiras Golf & Residence*, o seu consumo médio de água por dia varia entre os 1700m<sup>3</sup> e os 2000m<sup>3</sup>. Visto que um campo de golfe tem de ser regado durante aproximadamente seis meses ao longo do ano, o seu consumo anual de água deverá rondar os 330.000m<sup>3</sup>, ou 330.000.000 de litros por ano.

Tal como pode ser consultado na Tabela 2, a manutenção da relva dos *Greens* consome praticamente o dobro da água utilizada na relva dos *Fairway*. Por este motivo um sistema de monitorização ambiental instalado num campo de golfe deverá ter como prioridade otimizar a água utilizada na rega dos *Greens*.

	Zona	
	<i>Green</i>	<i>Fairway</i>
<b>Substrato</b>	Artificial (Areia e Turfa)	Natural (Argila)
<b>Altura da Relva</b>	0,4 cm	1,5 cm
<b>Profundidade das Raízes</b>	12 cm	8 cm
<b>Consumo médio de água</b>	7 – 10 litros/m <sup>2</sup> por dia	4 – 5 litros/m <sup>2</sup> por dia

Tabela 2 – Características das zonas relvadas de um campo de golfe

#### 4.1.2 Requisitos Funcionais

Nesta secção são apresentados os requisitos funcionais para este projecto. O levantamento de requisitos envolveu uma interacção contínua com os responsáveis pela manutenção da relva do campo *Oeiras Golf & Residence*. Visto que são estes os “clientes” deste projecto, a identificação dos seus problemas e necessidades foi vital na análise de requisitos de uma aplicação que se espera que um dia venha a ser aplicada em campos de golfe reais. A contribuição do Professor Pedro Leão do Instituto Superior de Agronomia foi também essencial na identificação dos melhores métodos de monitorização das necessidades hídricas de uma plantação.

Segue-se uma descrição de cada um dos requisitos funcionais deste projecto.

##### 1. Medir a humidade do solo

- A humidade do solo deverá ser medida a três profundidades diferentes ao longo da zona radicular da relva. Estas profundidades deverão ser escolhidas de modo uniforme para que seja possível obter dados sobre a forma como a água se infiltra no solo. Visto que as raízes da relva do *Putting Green* do campo estudado se estendem aproximadamente até aos 12 cm de profundidade, a humidade do solo deverá ser medida às seguintes profundidades: 2cm, 7cm, 12cm. As raízes da relva da zona do

*Fairway* apenas se estendem até aos 8 cm de profundidade, pelo que a humidade do solo deverá ser medida às seguintes profundidades: 2 cm, 5 cm e 8 cm.

- A humidade do solo deverá ser medida em cada uma das zonas controladas por um Satélite, com especial atenção para os *Putting Greens*.
- A humidade do solo deverá ser medida nas zonas identificadas como tendo uma maior necessidade de água.

## **2. Medir a temperatura ao nível do solo**

- A temperatura deverá ser medida a 2cm de profundidade aproximadamente nos mesmos locais onde é medida a humidade do solo, identificados anteriormente.

## **3. Medir o nível de tensão das baterias que alimentam os nós remotos**

- O nível de tensão das baterias deverá ser medido regularmente para permitir à aplicação alertar o utilizador sobre a eminente necessidade de trocar as baterias.

## **4. Medir os parâmetros a intervalos regulares**

- A humidade do solo e a temperatura deverão ser medidas a intervalos regulares controlados pelo utilizador.
- Deverão existir dois modos de medição: durante o período de rega e fora deste período. Durante o período de rega as medições deverão ser mais frequentes do que fora deste período.
- As frequências de medição dentro e fora do período de rega deverão ser parametrizáveis pelo utilizador da aplicação.

## **5. Transmitir os dados recolhidos a intervalos regulares**

- Os dados recolhidos pela rede de sensores deverão ser transmitidos para a aplicação a intervalos regulares controlados pelo utilizador.
- Deverão existir dois modos de transmissão: durante o período de rega e fora deste período. Durante o período de rega o envio de dados para a aplicação deverá ser mais frequente do que fora deste período.
- As frequências de transmissão dentro e fora do período de rega deverão ser parametrizáveis pelo utilizador da aplicação.

## **6. Cada nó da rede de sensores deverá encontrar-se num de dois estados: Modo Normal ou Modo de Rega**

- O estado individual de cada nó da rede de sensores deverá poder ser controlado pelo utilizador final da aplicação de modo a que no futuro este

sistema venha a ser utilizado para controlar directamente o sistema de rega.

#### **7. O consumo energético dos nós remotos deverá ser optimizado**

- Cada nó da rede deverá permanecer em funcionamento, sem que seja necessário substituir ou recarregar baterias, durante o máximo de tempo possível. Idealmente este tempo deverá ser superior a 6 meses (duração da época durante a qual é necessário regar os campos de golfe).

#### **8. O equipamento instalado não deverá interferir com a prática do jogo**

- Todo o equipamento que for necessário instalar no campo de golfe não poderá interferir com a prática do jogo ou com a estética do campo.
- Idealmente todo o equipamento deverá ser instalado de forma invisível para os utilizadores do campo.

## **4.2 Estudo de Instalação dos nós sensoriais num campo de golfe**

Apesar de já existirem alguns estudos que documentam o comportamento da comunicação entre nós remotos em diversos ambientes, não foi possível encontrar nenhum estudo que caracteriza-se devidamente a comunicação entre motes MicaZ no ambiente específico de um campo de golfe. O estudo descrito neste capítulo pretende suprir essa lacuna.

A performance de uma rede de sensores instalada num ambiente real pode ser afectada pelas características desse mesmo ambiente. Numa comunicação sem fios o sinal recebido pelo receptor não é uma cópia exacta do sinal transmitido pelo emissor. Ao longo do seu percurso o sinal pode sofrer distorções devido ao efeito de vários fenómenos como a atenuação, reflexão, refacção, difracção e dispersão. Para além de todos estes fenómenos há que contar também com os efeitos do ruído e de interferências externas (o rádio do *mote MicaZ* opera na banda de frequências dos 2.4GHz também utilizada por protocolos como o *Bluetooth*, 802.11b e 802.11g).

O impacto que todos os efeitos descritos anteriormente têm no sinal de uma comunicação sem fios está fortemente dependente das características do ambiente onde esta comunicação se processar. Deste modo o planeamento e projecto de uma rede de sensores real tem obrigatoriamente de ser precedido de um estudo das condições de comunicação entre os nós remotos no local a monitorizar. Devido ao facto das condições de instalação de redes de sensores em ambientes reais ao ar livre, como é o caso de um campo de golfe, se encontrarem ainda pouco documentadas, optou-se por realizar um estudo que pudesse servir de base a uma futura instalação.

Para além das condições de comunicação com os restantes nós da rede, podem ser identificados mais dois factores que influenciam a escolha dos locais onde deverão ser instalados os nós remotos de uma rede de sensores numa aplicação real:

- Local que se pretende monitorizar
- Restrições funcionais (e.g. estética, segurança física dos nós)

O nó sensorial remoto tem obviamente de ser instalado junto ao local que se pretende monitorizar. Poderão eventualmente ser utilizados cabos para ligar os sensores ao nó remoto mas o seu comprimento nunca poderá ser muito grande sob pena de comprometer uma das principais vantagens de uma rede de sensores: facilidade de instalação devido à ausência de cabos.

Existem muitas vezes restrições de ordem prática que não permitem a instalação dos nós remotos em todos os locais. Num campo de golfe não é possível instalar equipamentos acima do nível do solo em zonas de relva onde a prática do golfe seja provável (*Green e Fairway*). Também não será aconselhável instalar nós remotos em locais onde estes fiquem visíveis devido a motivos de ordem estética e/ou por os tornarem mais susceptíveis a roubos.

De modo a otimizar uma futura instalação de uma rede de sensores, este estudo procurou caracterizar de forma precisa as condições de comunicação sem fios entre nós remotos *MicaZ* num campo de golfe. Devido às restrições apresentadas anteriormente, procurou estudar-se a comunicação entre nós remotos com estes colocados em locais onde a sua futura instalação será mais conveniente (junto aos locais a monitorizar e em locais que não perturbem a prática do jogo ou a estética do campo).

Foram assim realizados testes a várias distâncias, alturas relativas e em diversas situações. Para cada teste efectuado foram trocados 10 pacotes entre um nó emissor e um nó receptor à potência de transmissão máxima e medidos os seguintes parâmetros:

- Potência recebida média
- Percentagem de pacotes recebidos

Segue-se uma descrição dos testes realizados e dos resultados obtidos.

#### **4.2.1 Superfície plana com relva de green**

Como primeiro cenário de testes foi escolhida uma zona plana de um green do campo de golfe (ver Figura 14.A). Neste cenário de teste foi feita variar a distância entre nós, desde os 0.5 metros até aos 10 metros, a incrementos de meio metro. Este teste foi repetido para cinco diferentes alturas relativas (0cm, 50cm, 100cm, 150cm, 200cm) entre os nós receptor e emissor (ver Figura 14.B).



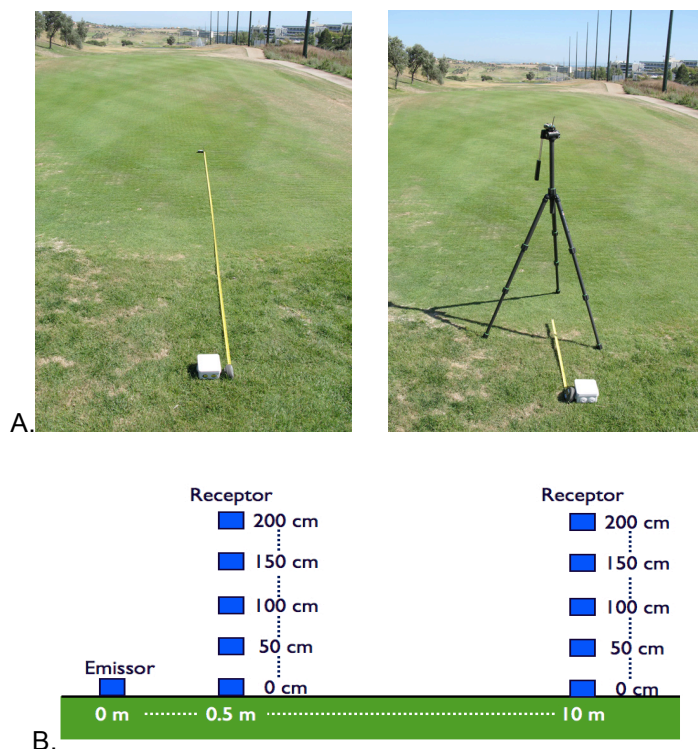


Figura 14 – Cenário de testes com relva de green em superfície plana

Na Figura 15.A encontram-se expressas as potências recebidas médias para diferentes distâncias e alturas relativas. A primeira conclusão que é possível extrair destes resultados é a de que a potência média recebida decresce com o aumento da distância entre nós. Esta diminuição da potência recebida é mais acentuada quando o receptor se encontra mais próximo do solo (0cm e 50cm), provavelmente devido aos efeitos do solo e da relva no sinal transmitido (atenuação, difracção, reflexão). Colocando os dois nós remotos junto da relva à mesma altura relativa (0 cm) a potência recebida decresce muito rapidamente com o aumento da distância entre os nós. Nesta situação a partir dos 2,5 metros já não existiu qualquer comunicação entre os nós, tal como pode ser comprovado no gráfico da Figura 15.B que mostra as percentagens de pacotes recebidos.

Colocando o nó receptor a uma altura do solo de 50 cm a potência recebida também decresce rapidamente até aos 7 metros, distância a partir da qual o receptor já não recebeu qualquer pacote. É possível observar na Figura 15.B que até aos 4 metros de distância horizontal não existiu nenhum pacote perdido. A partir desta distância a percentagem de pacotes recebidos vai diminuindo progressivamente até atingir os 0% para os 7,5 metros.

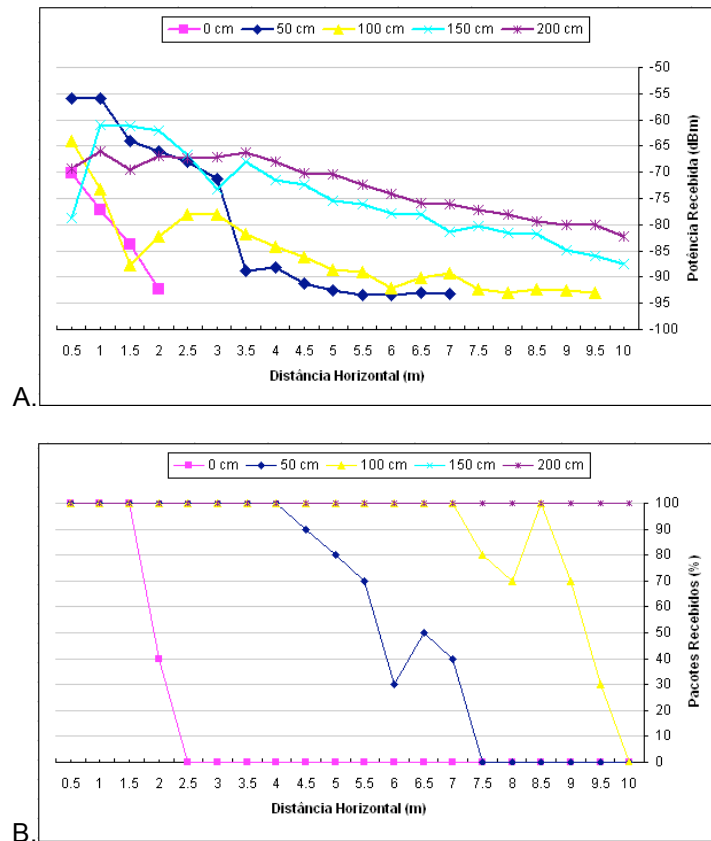


Figura 15 – Potência recebida e percentagem de pacotes recebidos

Com o receptor instalado a 100 cm do solo a percentagem de pacotes recebidos mantém-se nos 100% até aos 7 metros de distância entre nós. A partir desta distância começa a aumentar a taxa de pacotes perdidos até que para uma distância de 10 metros já não foi recebido qualquer pacote.

Instalando o nó receptor a alturas mais elevadas (150 cm e 200 cm) a diminuição da potência recebida com o aumento da distância entre nós não é tão acentuada. Nestas condições a percentagem de pacotes recebidos manteve-se sempre nos 100% para todas as distâncias, o que permite concluir que instalando um dos nós num plano sobrelevado relativamente ao outro é possível atingir distâncias razoáveis de comunicação estável. Num campo de golfe existem diversas oportunidades para instalar nós em planos superiores ao relvado tais como árvores, postes, ou equipamentos pertencentes ao sistema de rega (ver Figura 16).



Figura 16 – Possíveis locais para a instalação de nós num campo de golfe

#### 4.2.2 Receptor no *Satélite* do sistema de rega

Tal como foi referido na secção 4.1.1, o sistema de rega utilizado no campo de golfe em estudo utiliza um conjunto de satélites que controlam os aspersores permitindo ligar ou desligar a rega. Estes satélites encontram-se distribuídos por todo o campo de golfe e são alimentados com uma tensão de 220V pelo que podem ser utilizados por equipamentos da rede de sensores que necessitem de alimentação externa. Uma possibilidade será a de utilizar a energia disponibilizada por estes satélites para alimentar nós da rede de sensores com “capacidades especiais” que utilizem um protocolo de comunicação de maior alcance tal como 802.11.

Deste modo é interessante estudar como se comporta a comunicação entre um nó instalado sobre um satélite com outro nó colocado ao nível da relva. Tal como pode ser observado na Figura 17 o receptor foi colocado em cima do satélite, a uma altura de 77 cm, enquanto o emissor foi colocado dentro de uma caixa de PVC sobre a relva. A distância do emissor ao receptor foi feita variar até aos 10 metros a incrementos de 0.5 metros.



Figura 17 – Receptor instalado sobre o satélite

Na Figura 18.A encontra-se representada a potência recebida média em dBm para as diversas distâncias estudadas. Esta potência diminui progressivamente com a distância. A percentagem de pacotes recebidos, apresentada na Figura 18.B, mantém-se praticamente sempre nos 100% excepto para as distâncias de 15 e 17 metros.

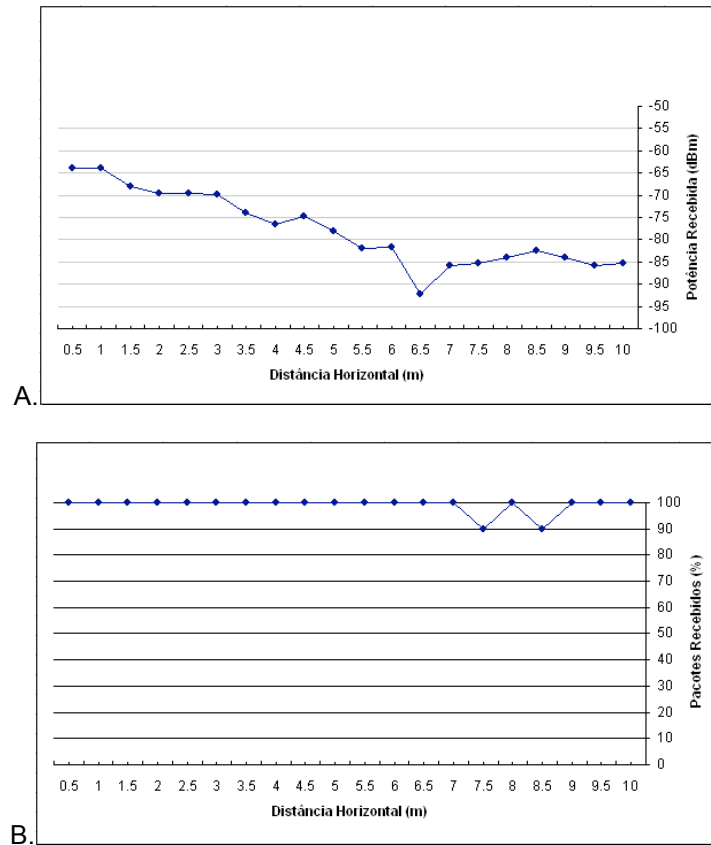


Figura 18 – Potência recebida e percentagem de pacotes recebidos

O facto de os resultados obtidos neste teste terem sido melhores do que os resultados do teste da secção 4.2.1 para uma diferença de altura de 1 metro pode ser explicado pela inclinação do terreno onde foi realizado o teste. Esta inclinação levou a que à medida que a distância horizontal entre o nó receptor e o nó emissor aumentava, a altura relativa entre estes dois nós também aumentava. Tal como pode ser comprovado pelos resultados da secção 4.2.1 o aumento da altura relativa entre nós é benéfico para a qualidade da comunicação sem fios num cenário deste tipo.

### 4.2.3 Emissor dentro de caixa de sistema de rega

Num campo de golfe os *greens* são os locais onde é mais importante que a relva se encontre em excelentes condições. Devido a grande parte de um jogo de golfe decorrer dentro do *green* não podem existir neste quaisquer objectos que possam perturbar a prática deste desporto. Por este motivo, do ponto de vista deste projecto, são ao mesmo tempo os



locais que mais interessa monitorizar mas sobre os quais não pode ser instalado qualquer equipamento.

Tendo como objecto de estudo o campo *Oeiras Golf & Residence* é possível concluir que a solução para este problema poderá passar por instalar os nós remotos em caixas de PVC normalmente utilizadas para alojar equipamentos do sistema de rega como por exemplo electrovalvulas. Estas caixas de PVC poderão ser instaladas nas proximidades de cada green a curtas distâncias deste (~1 metro).

É, por isso, interessante estudar como se comporta a comunicação entre um nó instalado dentro de uma destas caixas com outro nó instalado no exterior. Tendo como base os resultados da secção 4.2.1 é possível concluir que para obter distâncias de comunicação razoáveis entre nós nestas condições é necessário que exista entre eles uma diferença de alturas relativa considerável. Por este motivo optou-se por instalar o receptor a uma distância do solo de 170 cm e fazer variar a distância entre nós até aos 10 metros a incrementos de 0.5 metros. A Figura 19 mostra o emissor instalado dentro de uma caixa de PVC estanque (branca) que por sua vez se encontrava instalada dentro de outra caixa de PVC pertencente ao sistema de rega do campo (verde).



Figura 19 – Emissor dentro de caixa de sistema de rega

O gráfico representado na Figura 20.A mostra as médias da potência recebida para cada um dos testes realizados. A potência média recebida vai decrescendo progressivamente

até que por volta dos 6.5 metros se aproxima dos -95 dBm. A percentagem de pacotes recebidos, apresentada na Figura 20.B, mostra que até aos 6 metros a comunicação se deu sem nenhuma perda de pacotes. A partir desta distância a percentagem de pacotes decresce muito rapidamente.

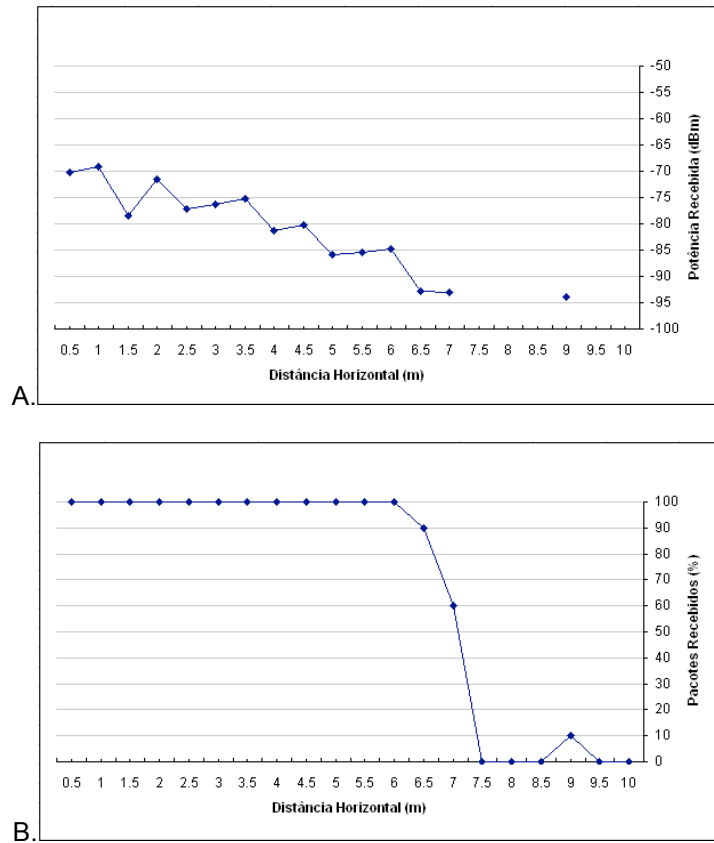


Figura 20 – Potência recebida e percentagem de pacotes recebidos

Se considerarmos as caixas de PVC “transparentes” do ponto de vista da comunicação sem fios, esta queda tão abrupta poderá ser explicada com a perda da “linha de vista” entre os nós a partir dos 6 metros de distância. Ou seja, tal como representado na Figura 21, para distâncias curtas entre os nós a linha de comunicação directa apenas tem de atravessar as caixas de PVC. Enquanto para distâncias superiores esta linha já tem de atravessar o solo.

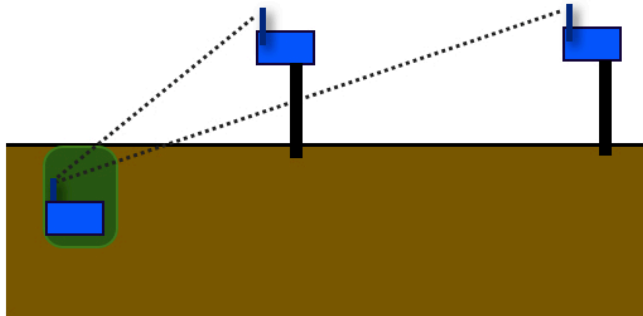


Figura 21 – Comunicação com e sem linha directa entre emissor e receptor

### 4.3 Arquitectura do Sistema

Dos requisitos deste projecto, listados na secção 4.1.2, resulta que os locais do campo de golfe a monitorizar com maior precisão são os *greens*. A importância da qualidade da relva destes locais para a prática do golfe, combinada com a sua maior sensibilidade a variações na quantidade de água disponível, tornam a sua monitorização constante muito mais relevante do que o restante campo.

O formato e dimensão dos *greens* varia consideravelmente. Estes encontram-se espalhados pelo campo de golfe de forma mais ou menos uniforme e estão rodeados por uma zona de relva menos sensível designada por *fairway*. Assim sendo, do ponto de vista da monitorização de parâmetros os locais de interesse (*greens*) podem ser vistos como “ilhas” separadas por um local que não é tão relevante monitorizar (*fairway*).

De acordo com os requisitos do projecto, optou-se por instalar 3 nós remotos em cada *green* a monitorizar e um nó remoto no *fairway* nas imediações do *green*. Esta divisão da rede de sensores em células, instaladas nos locais de interesse, cria um problema comum nas redes de sensores: Como garantir a comunicação de todas as diferentes células com o nó de processamento final? Existem três soluções para este problema:

- Instalar nós remotos em número suficiente para criar uma rede única totalmente interligada.
- Utilizar *agentes móveis* ou MULEs, tal como descrito em [39].
- Instalar *base stations* com capacidade para recolher a informação dos nós remotos de cada célula e transferi-la para o nó de processamento final.

A primeira solução equacionada foi a de utilizar nós remotos (*motes MicaZ*) instalados por todo o campo de golfe, para criar *links* entre as diferentes células e o nó de processamento final. Estes nós remotos não serviriam para medir quaisquer parâmetros. Apenas realizariam a função de garantir a comunicação entre os restantes nós da rede de sensores. Os resultados dos testes de comunicação entre *motes MicaZ* do capítulo 4.2 mostram que as distâncias de

comunicação *Zigbee* 802.15.4 entre motes no ambiente real de um campo de golfe são relativamente curtas. Por este motivo, interligar todo o campo de golfe utilizando nós remotos implicaria a instalação de um grande número de motes *MicaZ*. O campo de golfe Oeiras Golf & Residence tem cerca de 1200 metros de comprimento. De acordo com os testes de comunicação realizados, a distância de comunicação máxima entre motes instalados ao nível do solo é de 2 metros. Seriam assim necessários cerca de 600 motes apenas para cobrir esta distância em linha recta e sem qualquer redundância. O número de motes necessário para interligar eficazmente todos os locais de interesse de um campo de golfe atingiria facilmente os vários milhares. Por este motivo, e numa altura em que o custo de cada nó remoto é ainda elevado, esta solução foi colocada de parte.

Outra possibilidade estudada foi a utilização de agentes móveis, ou MULEs (*Mobile Ubiquitous LAN Extensions*), tal como definido em [39]. Estes agentes móveis possuem rádios de curto alcance que lhes permitem trocar dados com os nós remotos e com o nó de processamento final. Deste modo uma MULE pode recolher os dados de um nó remoto quando se aproximar deste e guardá-los em memória. Posteriormente os dados recolhidos pela MULE ao longo do seu percurso podem ser transferidos para o nó de processamento final. Esta solução permite garantir a comunicação (nos dois sentidos) entre o nó de processamento final e os nós remotos sem a necessidade de utilizar um grande número de nós ou qualquer equipamento adicional visto que uma MULE pode ser um mote *MicaZ* programado para o efeito.

No cenário de um campo de golfe estas MULEs poderiam ser instaladas em equipamentos tais como carros de golfe, sacos de tacos ou tractores corta-relva. Todos estes equipamentos efectuem percursos regulares pelo campo de golfe durante os quais poderiam obter os dados recolhidos pelos nós sensoriais. Depois de serem utilizados estes equipamentos são armazenados num local fixo onde poderia ser instalado o nó de processamento final de modo a que os dados recolhidos pudessem ser finalmente transferidos para este nó.

Um potencial problema desta abordagem poderá ser o aumento do consumo energético dos nós remotos devido ao facto destes terem de escutar o meio para identificarem a passagem de MULEs. Este problema é agravado pelo facto de os motes *MicaZ* consumirem mais corrente em modo de recepção (19.7mA) do que em modo de transmissão (17.4mA).

Ainda assim, o maior problema desta alternativa é o aumento da latência visto que os nós remotos apenas conseguem comunicar quando uma MULE passa na sua proximidade. O facto de não ser possível determinar com exactidão quando é que uma MULE vai passar junto a um nó remoto e voltar ao local onde se encontra o nó de processamento final torna a determinação da latência impossível.

Como este projecto tem o objectivo de controlar o sistema de rega do campo de golfe, a imprevisibilidade da latência torna a utilização de MULEs desadequada. Os requisitos temporais inerentes ao controlo dos períodos de rega obrigam a conhecer com alguma precisão a latência do sistema de comunicação.



O facto de o sistema de rega do campo de golfe apenas permitir a rega simultânea de um número limitado de sectores, devido a limitações relativas à pressão da água, tem como consequência que a decisão de iniciar a rega de determinado sector só é possível conhecendo exactamente quantos sectores se encontram actualmente activos. A utilização de MULEs levaria a que nunca fosse possível ter uma “visão” global e actualizada sobre o estado do sistema de rega do campo de golfe.

A utilização de MULEs é uma solução extremamente interessante para projectos de monitorização ambiental com menores requisitos ao nível da latência de comunicação, tal como o projecto *Vineyard Computing*, descrito no capítulo 3.2.1, onde uma solução baseada em MULEs é utilizada com sucesso. Ainda assim, os requisitos da solução de monitorização e controlo proposta nesta dissertação não toleram a latência inerente à utilização de MULEs.

Uma solução mais razoável é a de utilizar comunicação *Zigbee* 802.15.4 dentro de cada célula apenas entre os nós remotos e um nó com capacidades especiais designado por *sink*. Este nó agregador de informação pode ter duas interfaces de comunicação: uma para comunicar com os nós remotos da sua célula e outra para comunicar com o nó de processamento final. Esta comunicação com o nó de processamento final será realizada recorrendo a uma tecnologia de comunicação que permita um maior alcance.

Existem várias soluções tecnológicas (com e sem fios) que poderão ser utilizadas para garantir a comunicação entre cada uma das células de monitorização e o nó de processamento final:

- **Power line communication** – A tecnologia PLC permite a transferência de dados sobre condutores também utilizados na transmissão de energia eléctrica. Este sistema tem a vantagem de não requerer a instalação de cabos adicionais em locais onde já exista uma instalação eléctrica. O campo de golfe *Oeiras Golf & Residence* tem uma instalação eléctrica de 220V AC que permite alimentar os satélites do sistema de rega que se encontram espalhados pelo campo. Adicionalmente os aspersores são alimentados com 24V DC fornecidos pelos satélites. Segundo os responsáveis deste campo de golfe o sistema de rega utilizado é extremamente frequente nos campos de golfe portugueses, sendo praticamente um standard nos campos mais recentes. A utilização de PLC sobre as instalações eléctricas dos sistemas de rega dos campos de golfe é uma possibilidade em todos os campos que possuam um sistema de rega semelhante ao do *Oeiras Golf & Residence*.
- **Ethernet sobre par entrançado** – Outra possibilidade é a de utilizar tecnologia Ethernet sobre fios de cobre de par entrançado. Nos campos de golfe em fase de construção a instalação de uma infra-estrutura de comunicação baseada em par entrançado não deverá ter um impacto muito relevante no custo final de construção. No entanto esta solução não é adequada a campos já construídos e em funcionamento devido ao facto da instalação de uma infra-estrutura deste tipo ser complexa e dispendiosa quando não for realizada na fase de construção do campo.

- **Wifi 802.11** – A solução de utilizar tecnologia 802.11 para interligar as diferentes células de um sistema de monitorização a um nó de processamento final foi adoptada por dois dos projectos descritos no capítulo 3.2 (ver 3.2.3 e 3.2.4). Esta solução tem a vantagem de poder ser utilizada em qualquer campo de golfe devido ao facto de não requerer a instalação de quaisquer cabos. O seu alcance é algo limitado, principalmente quando não existe linha de vista. O consumo energético da comunicação utilizando 802.11 é muito superior ao consumo dos rádios do mote MicaZ que utilizam 802.15.4. Seria necessário alimentar estes nós com uma fonte de alimentação com maior capacidade.
- **General Packet Radio Service** – GPRS é um serviço de transmissão de dados suportado na rede GSM que cobre praticamente todo o território Português. Esta tecnologia, adoptada no projecto de monitorização ambiental descrito em 3.2.5, é uma hipótese para interligar células distantes a um nó de processamento final. Esta solução será especialmente útil em situações onde a instalação de cabos for impraticável e a tecnologia 802.11 não for eficiente.

Nenhuma das possibilidades listadas anteriormente se destaca particularmente das outras como a solução óptima a adoptar em todas as situações. A melhor solução depende das características do campo de golfe a monitorizar. Quais são as características geográficas do campo de golfe? Se este se encontra em fase de construção ou já em funcionamento? Qual o grau de investimento que se pretende fazer no sistema de monitorização? Estas são algumas das questões que podem determinar qual a melhor solução a adoptar em cada caso, numa futura comercialização de um sistema de monitorização deste tipo.

Dentro do mesmo campo de golfe podem ser adoptadas várias destas tecnologias de forma complementar. Um cenário possível será o de utilizar 802.11 para comunicar com os sistemas de monitorização instalados nos *greens* mais próximos do local onde for instalado o nó de processamento final e GPRS para comunicar com os locais mais distantes onde a comunicação por 802.11 já não for possível.

A arquitectura genérica do sistema de monitorização proposto nesta dissertação encontra-se representada na Figura 22. A rede de sensores encontra-se dividida em células de modo a adaptar a arquitectura da rede à distribuição geográfica dos locais a monitorizar. Cada uma destas células é constituída por quatro nós remotos sensoriais. Três destes nós deverão ser instalados no *green* enquanto um quarto nó deverá ser utilizado para monitorizar a zona do *fairway*. Cada um destes nós remotos sensoriais é constituído por um mote MicaZ, uma placa sensorial e três sensores de humidade do solo.

Todas as células possuem também um nó *sink* responsável por garantir a comunicação entre os nós remotos e o Nó de Processamento Final (NPF). O NPF agrega toda a informação recolhida pela rede de sensores fornecendo-a ao utilizador final do sistema, que poderá ser um

humano ou uma aplicação que utilize os dados recolhidos para controlar directamente o sistema de rega.

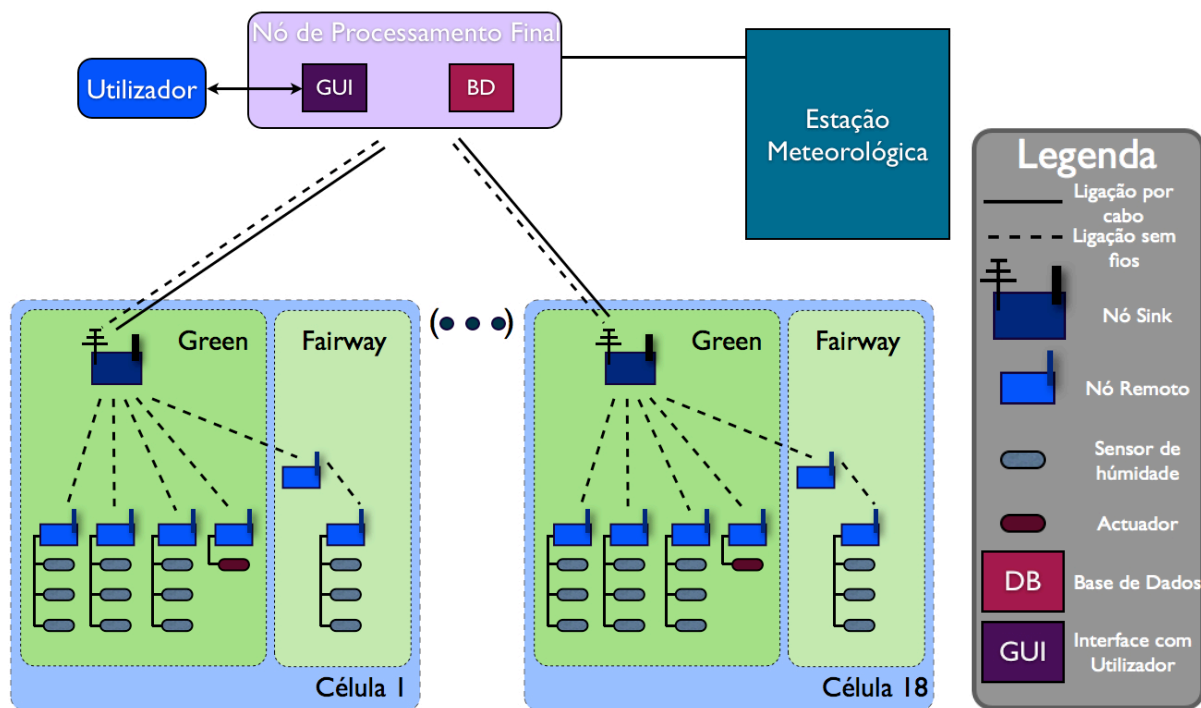


Figura 22 – Arquitectura do Sistema

#### 4.4 Algoritmo de Medição e Actuação

Com o objectivo de obter os dados medidos pela rede de sensores e controlar o seu funcionamento foi desenvolvido e implementado um algoritmo de medição e actuação distribuído. O desenvolvimento deste algoritmo procurou responder a 5 requisitos fundamentais:

- Medir a humidade do solo, temperatura e tensão das baterias a intervalos regulares.
- Enviar os resultados das medições realizadas pela rede de sensores para o nó de processamento final.
- Permitir o controlo do estado (Modo de Rega ou Modo Normal) em que se encontra cada um dos nós da rede de sensores.
- Permitir ao utilizador modificar em tempo de execução os seguintes parâmetros de configuração da rede de sensores: frequência com que são enviados os dados recolhidos pela rede de sensores para o nó de processamento final e número de amostras recolhidas por período de medição.

- Reduzir o tempo que os nós remotos têm de permanecer com o seu rádio ligado ao mínimo indispensável.

Qualquer rede de sensores tem como objectivo monitorizar um ou mais parâmetros que possam ser medidos por sensores. No caso da rede de sensores desenvolvida no âmbito desta dissertação os parâmetros medidos são a humidade do solo, a temperatura e a tensão das baterias. Estes parâmetros são medidos a intervalos regulares e a média das medições realizadas em cada período é posteriormente enviada para o nó de processamento final.

Com o objectivo de no futuro utilizar esta aplicação para controlar o funcionamento do sistema de rega de campos de golfe foi implementado um mecanismo onde os nós remotos se podem encontrar num de dois estados: Modo de Rega e Modo Normal. Em Modo de Rega o sistema de rega do campo de golfe encontra-se activado e a frequência de envio dos dados recolhidos para o nó de processamento final é superior. Em Modo Normal, o sistema de rega encontra-se inactivo e os dados recolhidos são enviados para o nó de processamento final com uma frequência menor. A entrada de cada um dos nós em modo de rega é controlada no nó de processamento final através da inserção de ordens de rega. Uma ordem de rega é constituída por dois campos temporais:

- Tempo em que deve começar o período de rega.
- Duração do período de rega.

Se, por exemplo, for inserida no sistema uma ordem de rega com tempo de início igual a 10 minutos e duração de 15 minutos para um determinado nó da rede, esse nó entrará em Modo de Rega 10 minutos depois da ordem ser inserida e permanecerá neste estado durante 15 minutos.

O algoritmo também permite ao utilizador (ou aplicação que corra sobre ele), modificar em tempo de execução os seguintes parâmetros de funcionamento da rede de sensores:

- Período de actualização em Modo de Rega.
- Período de actualização em Modo Normal.
- Número de amostras recolhidas em cada intervalo.

Para além destas funcionalidades este algoritmo permite aos nós remotos (alimentados por baterias) manterem o seu rádio desligado durante grande parte do tempo.

Este é um algoritmo distribuído que se encontra dividido por três plataformas:

- Placa *daughterboard* com processador PIC, descrita em 5.1.1.2
- Mote MicaZ da Crossbow com processador Atmega128, descrito em 5.1.1.1
- Nó de processamento final (PC)

Na Figura 23 encontra-se representado o diagrama de actividade da aplicação *GolfSense* que se executa no nó de processamento final. Quando esta aplicação recebe um pacote de medições proveniente de um nó remoto da rede de sensores envia os dados recebidos para a aplicação *GolfWater* e escreve esses mesmos dados para um ficheiro guardado localmente. De seguida verifica se existia uma ordem de rega pendente para o nó remoto que acabou de enviar o pacote de medições. Se não existe nenhuma ordem pendente é enviado um pacote para o nó remoto contendo apenas os parâmetros de configuração da rede de sensores. Se existir uma ordem de rega pendente é calculado o tempo em que tem de se iniciar e terminar a rega. Se por exemplo a ordem de rega tiver sido inserida no sistema há 5 minutos (300 segundos) com os seguintes parâmetros:

- StartTime = 15 minutos (900 segundos).
- Duration = 30 minutos (1800 segundos).

A ordem de rega enviada para o nó remoto terá um tempo de início igual a 600 segundos (900 segundos – 300 segundos) e um tempo de fim igual a 1500 segundos (1800 segundos – 300 segundos). Ou seja, é subtraído aos tempos inseridos na ordem de rega o tempo que decorreu desde que a ordem foi inserida até esta ser efectivamente enviada para o nó remoto. Deste modo é garantido que o nó remoto entrará em Modo de Rega durante o período que o utilizador inseriu no sistema. Finalmente é enviado para o nó remoto um pacote contendo os parâmetros de configuração da rede de sensores e a ordem de rega.

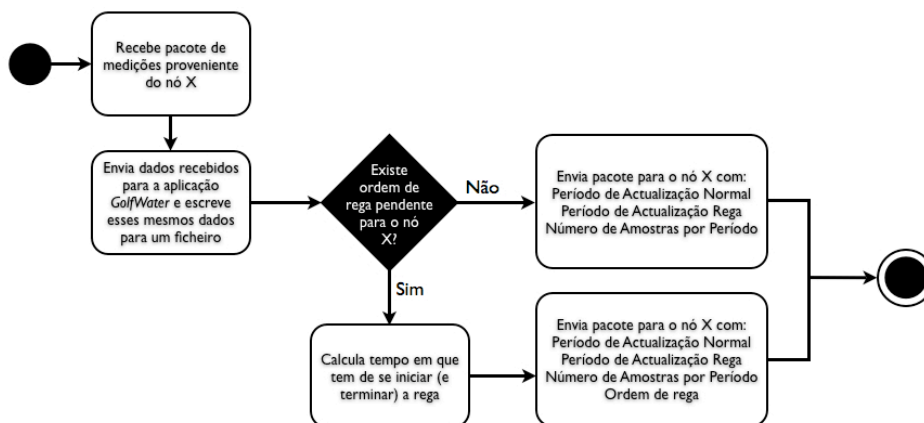


Figura 23 – Diagrama de actividade da aplicação *GolfSense* que se executa no NPF

Na Figura 24 encontra-se representado um diagrama de actividades que contem o conjunto de eventos que ocorrem no nó remoto (*MicaZ*) quando o *timer* de sincronização dispara. Neste caso, a primeira acção tomada pelo programa que se executa no nó remoto é obter as médias dos parâmetros (humidade, temperatura e tensão) calculadas pela placa sensorial descrita em 5.1.1.2. Depois de obter estes dados o nó remoto activa a sua interface rádio e envia os dados recolhidos para o NPF. Posteriormente o nó remoto escuta o meio até receber uma mensagem

proveniente do NPF ou ocorrer um *timeout*. Se for recebida uma mensagem do NPF esta é analisada para verificar se houve alguma alteração nas configurações da rede de sensores ou se existe uma nova ordem de rega. No final é novamente desliga a interface rádio do mote MicaZ.

Através deste mecanismo a interface rádio apenas é ligada durante um curto período durante o qual o nó remoto envia os dados recolhidos para o NPF e espera (durante um tempo limitado) por uma mensagem de configuração proveniente desse nó. É assim introduzida alguma latência no sistema de controlo da rede de sensores visto que o NPF apenas pode enviar para o nó remoto mensagens de configuração durante o período que se segue ao envio de uma mensagem de dados do nó remoto para o NPF. Esta latência é compensada pelo facto de permitir que os nós remotos mantenham a sua interface rádio desligada durante a maior parte do tempo poupando energia.

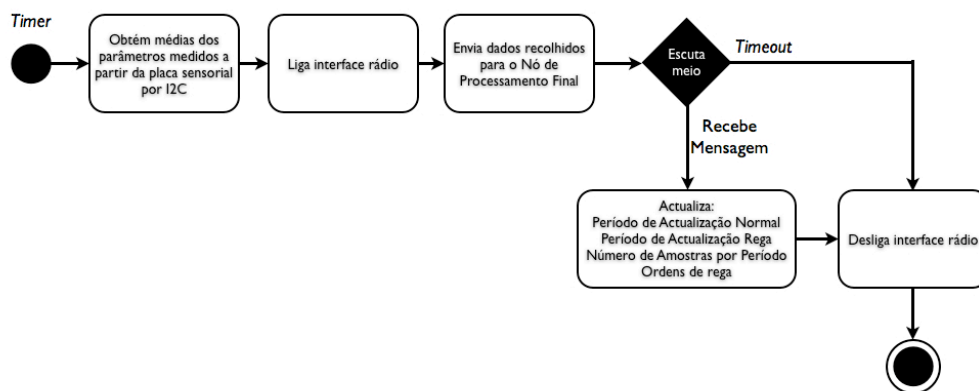


Figura 24 – Diagrama de actividade da aplicação *GolfSense* que se executa no nó remoto

Os eventos descritos na Figura 24 são despoletados pelo *timer* de sincronização que se executa periodicamente com um período igual ao “Período de actualização em Modo Normal” ou ao “Período de actualização em Modo de Rega” consoante o estado em que se encontra o nó remoto. Para controlar o estado em que se encontra o nó remoto existem mais dois *timers* (*timer\_inicio\_rega* e *timer\_fim\_rega*) que são criados quando uma nova ordem de rega chega ao nó remoto.

Quando o *timer\_inicio\_rega* dispara o período de actualização é alterado para o modo de rega e o mote MicaZ envia para a placa sensorial (por I<sup>2</sup>C) um novo período de medição. Quando o *timer\_fim\_rega* dispara é reposto o período de actualização normal e a placa sensorial volta a ser informada do novo período de medição.

O programa que se executa no PIC da placa sensorial tem as seguintes funções:

- Receber do mote MicaZ o período com que deverá realizar medições.
- Efectuar as medições utilizando um conjunto de ADCs.

- Efectuar os cálculos necessário para transformar as medidas dos ADCs em valores reais de tensão, temperatura e humidade do solo.
- Juntar os valores calculados a uma tabela de médias que é periodicamente lida (e reiniciada) pelo mote MicaZ por I<sup>2</sup>C.





## 5. Implementação de Referência

Neste capítulo encontra-se descrita a implementação de referência desenvolvida no âmbito desta dissertação. Esta implementação teve como objectivo validar, e permitir avaliar, a solução de monitorização de parâmetros ambientais descrita no capítulo anterior. Em primeiro lugar são descritos os componentes que constituem a arquitectura implementada. Posteriormente é descrita a forma como a aplicação desenvolvida no âmbito desta dissertação comunica com a aplicação *GolfWater*, descrita anteriormente.

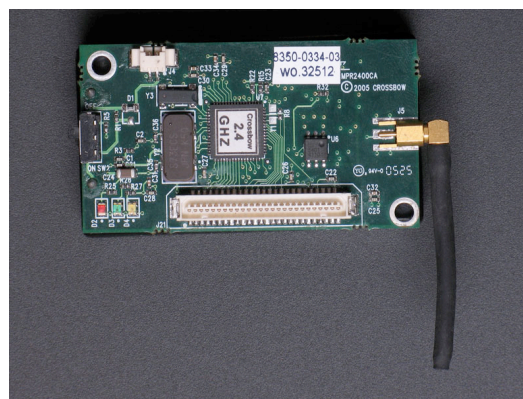
### 5.1 Arquitectura de Referência

De modo a permitir validar a arquitectura conceptual representada na Figura 22 foi necessário escolher (ou desenvolver) alguns dos seus componentes. Como nó remoto foi escolhido o mote MicaZ da Crossbow [37]. Para sensores de humidade do solo foram escolhidos os sensores capacitivos ECH<sub>2</sub>O EC-5 da Decagon Devices<sup>3</sup>. Adicionalmente foi desenvolvida no âmbito da cadeira de Redes de Sensores e desta dissertação uma placa sensorial multifunções. Estes três componentes são descritos em maior detalhe nos capítulos seguintes.

#### 5.1.1 Componentes

##### 5.1.1.1 Mote MicaZ

O mote MicaZ da Crossbow [37] é um modulo composto por um micro-controlador AVR de 8 bits, o *Atmel ATmega128L* e um transceptor compatível com a norma IEEE 802.15.4, o *Chipconn CC2420* a operar na frequência dos 2.4GHz. Este mote possui uma ficha *Hirose* de 51 pinos que permite a ligação de diferentes tipos de placas sensoriais. Podem ser ligadas placas sensoriais passivas com sensores que são medidos directamente utilizado os portos ADC do processador *ATmega128L* ou placas sensoriais com microprocessadores próprios que podem comunicar com o processador do mote MicaZ através de barramentos SPI ou I<sup>2</sup>C.



<sup>3</sup> [http://www.decagon.com/soil\\_moisture/ec5/](http://www.decagon.com/soil_moisture/ec5/)

Figura 25 – Mote MicaZ da Crossbow [37]

#### 5.1.1.2 Placa Sensorial com co-Processador

A placa sensorial desenvolvida, no âmbito da cadeira de Redes de Sensores e desta dissertação, liga-se ao mote MicaZ através de uma ficha Hirose de 51 pinos. Esta placa utiliza um processador PIC24FJ64GA002 para controlar o funcionamento de um conjunto de sensores, efectuar cálculos e comunicar com o processador Atmega128 do mote MicaZ.

A placa desenvolvida encontra-se representada na Figura 26.

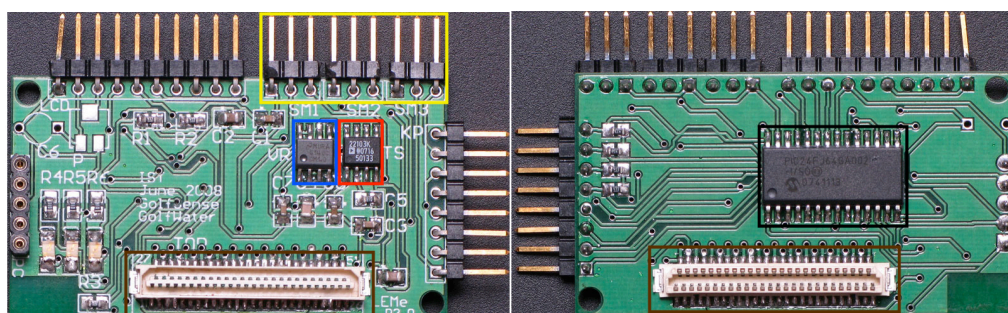


Figura 26 – Placa Sensorial frente e verso

A utilização de duas fichas Hirose (destacadas por rectângulos castanhos na Figura 26) em ambos os lados da placa sensorial permite a sua ligação ao mote MicaZ sem comprometer a possibilidade de adicionar outras placas ao conjunto.

O processador PIC, distinguido por um rectângulo preto na Figura 26, possui um conjunto de ADCs que permitem ler sensores analógicos. Esta placa utiliza três tipos de sensores que medem humidade do solo, temperatura e tensão das baterias que alimentam o nó remoto.

Os sensores de humidade do solo EC-5, descritos em maior detalhe em 5.1.1.3, podem ser ligados a esta placa sensorial utilizando conectores de três pinos. Este conector permite ligar a excitação do sensor EC-5 a um porto de saída do PIC, a saída do sensor EC-5 a um ADC do PIC e as terras de ambos os dispositivos. Os três conectores que permitem ligar sensores de humidade do solo a esta placa encontram-se destacados por um rectângulo amarelo na Figura 26.

Para medir a temperatura ambiente foi adicionado à placa sensorial um circuito integrado com a função de sensor de temperatura, tal como pode ser visto na Figura 26 (rectângulo vermelho). O sensor escolhido foi o AD22103 da *Analog Devices* por ser considerado um bom compromisso entre precisão (erro máximo de 2.5%) e preço. O seu tamanho reduzido (encapsulamento soic-8 com cerca de 19mm de área) foi também

essencial para produzir uma placa sensorial com as mesmas dimensões do mote MicaZ. A equação utilizada para obter a temperatura a partir da tensão de saída do sensor AD22103 foi a seguinte:

$$\text{Temp} = (((V_{\text{out}} \cdot 3,3) / V_{\text{in}}) - 0,25) / 0,028 \quad (1)$$

Onde  $V_{\text{out}}$  é a tensão de output do sensor de temperatura AD22103 e  $V_{\text{in}}$  é a tensão de alimentação deste sensor que é igual à tensão das baterias que alimentam o nó remoto.

Com o objectivo de determinar a tensão das baterias que alimentam o nó remoto foi também adicionada uma tensão de referência à placa sensorial, destacada por um rectângulo azul na Figura 26. A tensão de referência escolhida foi a LM4140CCM-1.0 da *National Semiconductor*. Este modelo pode receber como input uma tensão entre os 1,8V e os 5,5V e tem uma tensão de output fixa de 1,024V. Como a tensão de alimentação do nó remoto é utilizada pelos ADCs do PIC como máximo na conversão de valores analógicos para digitais é possível calcular o seu valor utilizando um destes ADCs para medir uma tensão previamente conhecida. A tensão previamente conhecida é fornecida pela tensão de referência LM4140CCM-1.0. Recorrendo à seguinte equação é possível obter o valor de tensão das baterias que alimentam o nó remoto:

$$V_{\text{bat}} = (\text{ADC\_Max} \cdot V_{\text{ref}}) / \text{ADC\_Res} \quad (2)$$

Onde  $V_{\text{bat}}$  é a tensão das baterias,  $\text{ADC\_Max}$  é o valor máximo do ADC (no caso do PIC24  $\text{ADC\_Max}$  é igual a 1023),  $V_{\text{ref}}$  é a tensão de output da tensão de referência LM4140CCM1.0 (1,024V) e  $\text{ADC\_Res}$  é o resultado obtido pelo ADC quando utilizado para medir  $V_{\text{ref}}$ . Substituindo os valores previamente conhecidos ficamos com:

$$V_{\text{bat}} = (1023 \cdot 1,024) / \text{ADC\_Res} \quad (3)$$

De modo a permitir que esta placa também cumprisse os objectivos do projecto da cadeira de Redes de Sensores, foram também adicionadas ligações que permitem a conexão de um *keypad* de 4 linhas por 4 colunas e de um LCD de duas linhas de 32 caracteres cada.

As linhas do *keypad* foram ligadas a 4 portos digitais de saída do PIC (RB0 a RB3), tal como pode ser consultado no esquemático em anexo. As 4 colunas do *keypad* foram ligadas directamente a portos digitais de entrada do PIC. Estas colunas foram também ligadas à tensão de alimentação através de 4 resistências de pull-up de 47kohm.

Utilizando este circuito o teclado é lido por varrimento, ou seja, os portos do PIC correspondentes às 4 linhas, que normalmente se encontram a 1, são colocados a 0 um de cada vez. Deste modo se o PIC detectar que algum dos portos onde estão ligadas as

colunas do teclado (que normalmente se encontram a 1 devido às resistências de pull-up) for “puxado” a 0, significa que a tecla correspondente à linha colocada a 0 e à coluna onde o 0 foi detectado foi pressionada.

Para controlar o LCD foram utilizados 5 portos digitais de saída do PIC (RB10 a RB15). Estes portos permitem que o PIC envie para o LCD comandos de 5 bits que possibilitam a escrita de quaisquer caracteres no LCD.

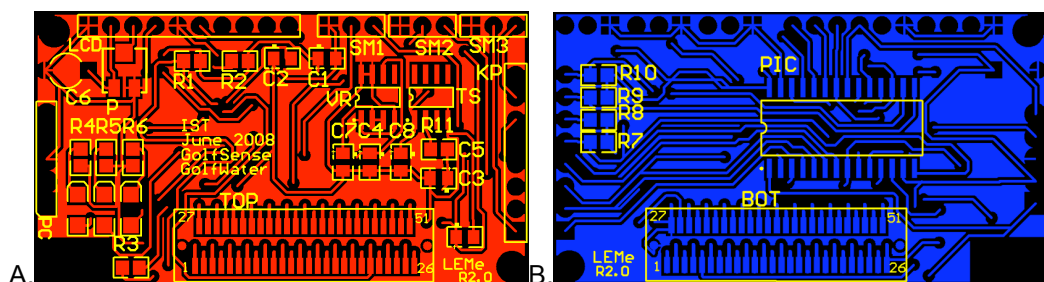
A utilização destes dois periféricos (*keypad* e LCD) possibilitou o desenvolvimento de uma aplicação que permite obter leituras dos sensores conectados à placa directamente no LCD. Esta aplicação, para além de ter facilitado a fase de testes deste projecto, também permite transformar a placa desenvolvida num leitor de temperatura e humidade do solo portátil. Este leitor será útil para a fase de instalação da rede de sensores no campo de golfe, visto que permite obter rapidamente os valores de humidade do solo e identificar as zonas com maiores necessidades hídricas.

Na Figura 27 encontram-se representados alguns dos passos de desenvolvimento desta placa sensorial. Na Figura 27.A encontra-se o desenho, realizado com o programa Protel DXP 2004, da face superior da placa. As zonas a vermelho são aquelas que na placa real irão dar lugar ao material condutor (cobre), enquanto que a amarelo se encontram representadas as zonas que darão lugar à tinta. Na Figura 27.B encontra-se o mesmo desenho mas para a face inferior da placa. Neste caso o material condutor encontra-se representado a azul.

Na Figura 27.C e Figura 27.D encontra-se representada a placa depois de construída ainda sem os componentes soldados. É possível apenas observar as pistas de cobre e os *footprints* onde serão soldados os componentes.

Finalmente na Figura 27.E e Figura 27.F encontra-se a placa já finalizada com os componentes soldados.

O esquemático da placa, o seu dimensionamento e a lista completa dos componentes utilizados encontram-se em anexo a esta dissertação.



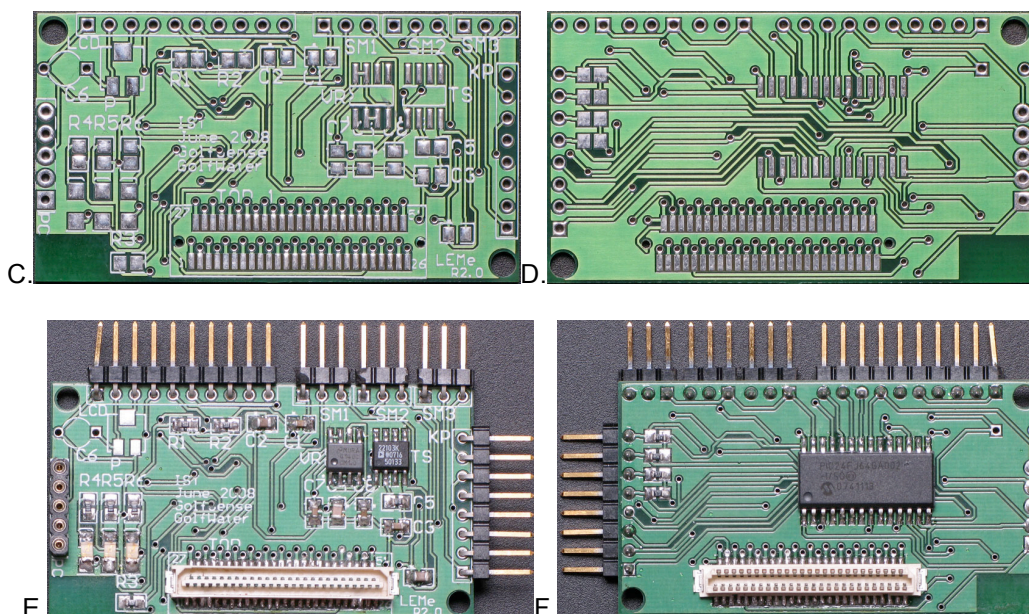


Figura 27 – Desenvolvimento da Placa Sensorial

### 5.1.1.3 Sensores de Humidade do Solo

Os sensores de humidade escolhidos foram os sensores capacitivos ECH<sub>2</sub>O EC-5 da Decagon Devices, representados na Figura 28.



Figura 28 – Sensor Capacitivo ECH<sub>2</sub>O EC-5

Este tipo de sensores utiliza o solo como parte do dielétrico do condensador do sensor capacitivo. O circuito equivalente do sensor EC-5 encontra-se representado na Figura 29, onde  $V_{in}$  e  $V_{out}$  são a tensão de alimentação e a tensão de saída respectivamente,  $R$  é uma resistência,  $C$  é a capacidade do meio,  $C_s$  é a capacidade parasita e  $G$  representa a energia perdida devido a condutividade iónica. O circuito inclui um oscilador electrónico que produz uma onda rectangular com uma frequência de 70MHz. A capacidade total do sensor é igual à soma da capacidade do meio ( $C$ ) com a capacidade parasita ( $C_s$ ). Para transformar a corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC) é utilizado um conversor RMS na saída do circuito.



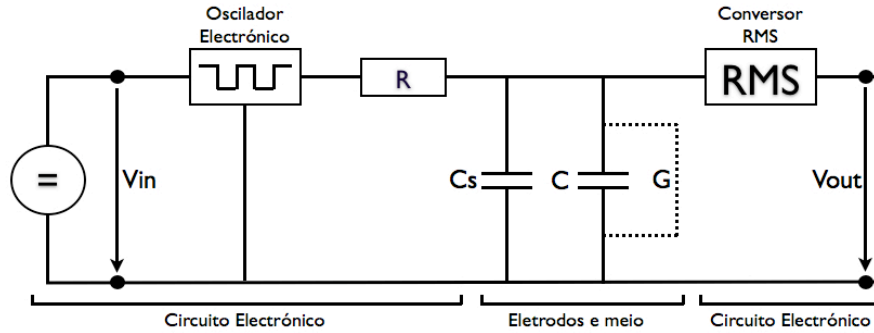


Figura 29 – Circuito equivalente do sensor capacitivo ECH<sub>2</sub>O EC-5

Este circuito tem como objectivo medir a permissividade do meio (solo) no qual se encontra inserido. Esta permissividade pode ser determinada medindo o tempo de carga (t) a partir de uma tensão inicial (Vi) até uma tensão definida (V) com uma tensão aplicada (Vf) de um condensador que utiliza o solo como dieléctrico. O tempo de carga do condensador (t) está relacionado com a capacidade através da seguinte fórmula, se considerarmos a resistência R e as tensões Vf e Vi constantes:

$$t = -RC \cdot \ln( (V - Vf + Vi) / (Vi - Vf) ) \quad (1)$$

A capacidade é uma função da permissividade dieléctrica do meio ( $\epsilon$ ) e de um factor geométrico g que está associado à forma do campo electromagnético que penetra o meio:

$$C = g\epsilon \quad (2)$$

A permissividade dieléctrica do meio ( $\epsilon$ ) pode então ser calculada através da seguinte fórmula:

$$1/\epsilon = (1/t) \cdot ( Rg \cdot \ln( (V - Vf + Vi) / (Vi - Vf) ) ) \quad (3)$$

Através da Figura 30 é possível compreender melhor o funcionamento deste tipo de sensores. O tempo que o condensador leva a recarregar depende da permissividade dieléctrica do meio e consequentemente da percentagem de água existente no solo.

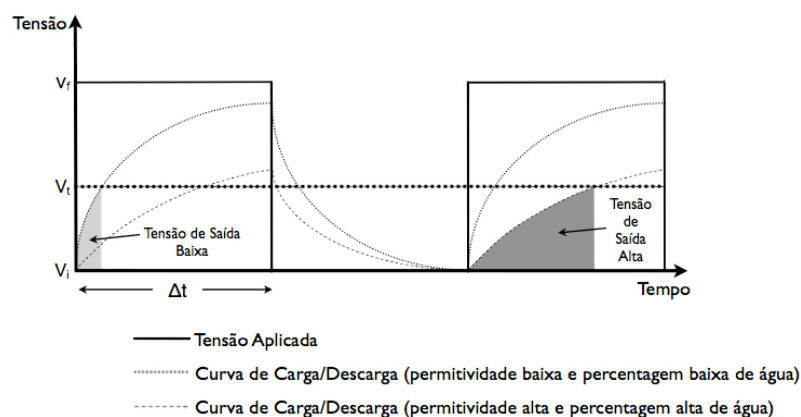


Figura 30 – Curvas de carga/descarga de dois condensadores com diferentes permissividades

Num solo com uma grande percentagem de água o condensador será carregado mais lentamente sendo por isso a curva de carga mais linear que num solo com uma baixa percentagem de água.

Isto implica que num solo molhado o condensador irá atingir uma determinada tensão de threshold ( $V_t$ ) mais tarde do que num solo seco.

A tensão de saída do sensor está directamente relacionada com a tensão média durante o período  $\Delta t$ . Desta forma um solo com um alto teor de água irá resultar numa tensão de saída elevada enquanto um solo com um baixo teor de água irá resultar numa tensão de saída baixa.

Em [40] é realizado um estudo que procura encontrar funções de regressão que permitem obter a percentagem de água presente no solo a partir da tensão de saída dos sensores EC-5.

Como vimos anteriormente os sensores capacitivos permitem calcular a permissividade do meio onde estão inseridos. Do ponto de vista da gestão da rega o teor de humidade do solo é muito mais facilmente interpretável do que a sua permissividade. Para obter o teor de humidade do solo a partir da permissividade pode ser utilizada a seguinte relação empírica:

$$\Theta_v = - (5,3 \cdot 10^{-2}) + (\epsilon \cdot 2,92 \cdot 10^{-2}) - (\epsilon^2 \cdot 5,5 \times 10^{-4}) + (\epsilon^3 \cdot 4,3 \cdot 10^{-6}) \quad (4)$$

Os sensores EC-5 recebem como input uma tensão contínua ( $V_{in}$ ) e têm como output uma tensão também contínua ( $V_{out}$ ) que varia com a permissividade do solo ( $\epsilon$ ). A relação entre a permissividade ( $\epsilon$ ) e a tensão de saída dos sensores ( $V_{out}$ ) é dada pela seguinte equação:

$$\epsilon(V_{out}) = \gamma + (1 / [\alpha + (\beta / (V_{out}^2))]) \quad (5)$$

Onde  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são parâmetros de regressão que dependem da tensão de alimentação ( $V_{in}$ ). Para uma tensão de alimentação de 3V (tensão de funcionamento aproximada dos motes MicaZ):  $\alpha=321788$ ,  $\beta=321321$ ,  $\gamma=321321$ .

Os nós de uma rede de sensores são normalmente alimentados por fontes de alimentação irregulares tais como baterias ou painéis solares. Este tipo de fontes de alimentação não produzem uma tensão de alimentação fixa pelo que é necessário considerar que a tensão com que serão alimentados os sensores não será sempre a mesma ao longo do tempo de vida da rede de sensores. Devido a este facto os autores de [40] propuseram uma melhoria ao modelo definido na equação 5 onde  $\alpha$  é substituído por  $\alpha(\omega)$  e  $\beta$  por  $\beta(\omega)$ :

$$\varepsilon(V_{out}, \omega) = \gamma + (1 / [\alpha(\omega) + (\beta(\omega) / (V_{out}^2))]) \quad (6)$$

$$\alpha(\omega) = -0,00837\omega^5 + 0,148\omega^4 - 1,0111\omega^3 + 3,318\omega^2 - 5,182\omega + 3.009 \quad (7)$$

$$\beta(\omega) = 0,00462\omega^5 - 0,0835\omega^4 + 0,584\omega^3 - 1,953\omega^2 + 3,139\omega - 1.904 \quad (8)$$

Onde  $\omega$  é a tensão com que é alimentado o sensor.

Outro factor que afecta as medições do teor de humidade do solo realizadas por sensores capacitivos é a temperatura do solo. O modelo representado pela equação 6 foi definido para uma temperatura de 20°C. Os autores de [40] estimaram que o erro máximo devido ao efeito da temperatura ocorre a 40°C quando o teor de humidade do solo obtido pelo modelo ultrapassa o teor de humidade real em 1.8%vol. A 5°C o teor de humidade obtido pelo modelo é 1.1% inferior ao real.

Para suprir os efeitos das variações de temperatura foi proposta uma correcção ao modelo anterior onde a permissividade corrigida ( $\varepsilon_c$ ) é igual à soma da permissividade obtida anteriormente ( $\varepsilon$ ) com um factor de correcção ( $\varepsilon_{ct}$ ):

$$\varepsilon_{ct} = 0,0002217 \cdot T^3 - 0,01442 \cdot T^2 + 0,1175 \cdot T + 1,6403 \quad (9)$$

Este conjunto de equações recebe como parâmetros a tensão com que são alimentados os sensores ( $\omega$ ), a tensão de saída dos sensores ( $V_{out}$ ) e a temperatura ( $T$ ), permitindo calcular o teor de humidade do solo.

Toda a computação necessária para transformar a tensão de saída do circuito do sensor EC-5 em teor de humidade do solo através dos modelos descritos anteriormente é realizada no co-processador da placa sensorial descrita no capítulo 5.1.1.2.



## 5.2 Interface com o programa *GolfWater*

Tal como foi referido anteriormente, o trabalho proposto nesta dissertação faz parte de um projecto mais vasto no qual também se inclui a dissertação “*GolfWater* - Sistema de gestão de rega de campos de Golfe com redes de sensores”.

Para que todo o sistema funcione a aplicação desenvolvida no âmbito desta dissertação, sucintamente designada por *GolfSense*, tem de enviar os dados ambientais recolhidos pela rede de sensores para a aplicação *GolfWater* e receber desta os dados de configuração da rede de sensores e as ordens de rega, tal como pode ser consultado na Figura 31.

De modo a permitir a comunicação entre as aplicações desenvolvidas nos projectos *GolfSense* e *GolfWater* foi utilizada uma arquitectura do tipo cliente/servidor baseada em *sockets* TCP. A aplicação *GolfSense* actua como servidor que aceita conexões TCP de clientes *GolfWater*.

Para criar um nível de abstracção entre as duas aplicações foi mutuamente aceite a especificação de um formato fixo de mensagens que esta aplicação cria com os dados recolhidos pela rede de sensores e que a aplicação desenvolvida no projecto *GolfWater* lê. Esta solução permite uma independência total entre as duas aplicações visto que o único aspecto em que ambas têm de estar concordantes é no formato das mensagens trocadas. No futuro até será possível substituir uma das aplicações por outra construída numa linguagem de programação totalmente diferente. Desde que esta cumpra o mesmo formato de mensagens a comunicação continuará a realizar-se da mesma forma.

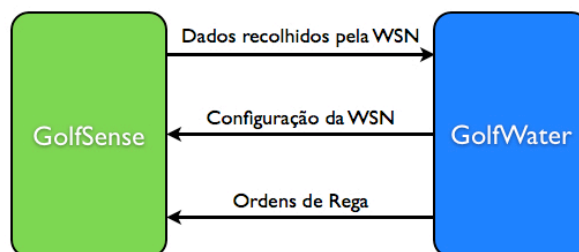


Figura 31 – Comunicação *GolfSense/GolfWater*

Segue-se um exemplo de uma mensagem enviada da aplicação *GolfSense* para a aplicação *GolfWater* com os dados recolhidos por um nó da rede de sensores:

```
Nodeld:1;TimeStamp:1218976555382;Voltage:2.929V;Temperature:33.49C°;SM1:14.8%;SM2:7.4%;SM3:1.5%;
```

Cada mensagem contém um conjunto de campos separados pelos seguintes identificadores:

- *Nodeld* – Identificador do nó que enviou os dados.
- *TimeStamp* – Instante em que foram recebidos os dados (em milissegundos desde 1 de Janeiro de 1970, 00:00:00 GMT).
- *Voltage* – Tensão média das baterias que alimentam o nó remoto (em Volts).

- Temperature – Temperatura média medida pelo nó remoto (em graus centígrados).
- SM1, SM2 e SM3 – Humidades médias do solo medidas pelo nó remoto a três profundidades diferentes (em VWC).

Estas mensagens para além de serem enviadas para a aplicação *GolfWater* são também escritas para um ficheiro guardado na máquina onde se executar a aplicação *GolfSense*. A escrita para este ficheiro tem como objectivo possibilitar a recuperação dos dados recolhidos pela rede de sensores no caso de por algum motivo falhar a comunicação entre as aplicações *GolfSense* e *GolfWater*. Segue-se um excerto de um ficheiro deste tipo gerado pela aplicação *GolfSense*:

```
Nodeld:1;TimeStamp:1218976555382;Voltage:2.929V;Temperature:33.49C°;SM1:14.8%;SM2:7.4%;SM3:1.5%;
Nodeld:2;TimeStamp:1218976558364;Voltage:2.834V;Temperature:32.84C°;SM1:12.9%;SM2:7.4%;SM3:0.5%;
Nodeld:1;TimeStamp:1218976647912;Voltage:2.912V;Temperature:33.21C°;SM1:16.4%;SM2:9.4%;SM3:1.7%;
Nodeld:2;TimeStamp:1218976649492;Voltage:2.821V;Temperature:33.12C°;SM1:13.4%;SM2:8.1%;SM3:0.9%;
```

Com o objectivo de permitir à aplicação *GolfWater* configurar certos parâmetros de funcionamento da rede de sensores a aplicação *GolfSense* aceita mensagens como a seguinte:

```
NormalModePeriod:600s;IrrigationModePeriod:120s;SamplesPerPeriod:4;
```

Estas mensagens contêm 3 campos separados pelos seguintes identificadores:

- NormalModePeriod – Período de actualização em Modo Normal.
- IrrigationModePeriod – Período de actualização em Modo de Rega.
- Número de amostras recolhidas em cada intervalo.

A aplicação *GolfWater* também pode enviar para a aplicação *GolfSense* mensagens com ordens de rega como a seguinte:

```
Nodeld:1;StartTime:120s;Duration:600s;
```

Estas mensagens contêm os seguintes identificadores:

- Nodeld – Identificação do Nó para o qual se pretende enviar a ordem de rega.
- StartTime – Tempo em que se deve iniciar a ordem de rega.
- Duration – Duração da ordem de rega.

## 6. Teste e Avaliação

Nesta secção são descritos vários testes que permitem verificar o correcto funcionamento das funcionalidades e avaliar o desempenho do sistema desenvolvido. A arquitectura utilizada para a realização destes testes encontra-se representada na Figura 32. Foram utilizados três motes MicaZ, descritos em 5.1.1.1, aos quais foram ligadas placas sensoriais, descritas em 5.1.1.2. Cada uma destas placas, para além de permitir medir a tensão das baterias que alimentam o nó remoto e a temperatura ambiente, possibilita a ligação de três sensores de humidade do solo, descritos em 5.1.1.3. Visto que à altura da realização destes testes apenas se encontravam disponíveis três sensores de humidade do solo apenas foi ligado um sensor em cada nó remoto. Para realizar a comunicação entre os nós remotos e o NPF foi utilizada uma MIB600 que funciona como gateway entre a rede de sensores e a rede onde se encontra o nó de processamento final. A MIB600 possui uma interface *Hirose* de 51 pinos que torna possível a ligação de um mote MicaZ e uma porta Ethernet (10/100 Base-T) que lhe permite comunicar com qualquer LAN TCP/IP. O mote MicaZ ligado à MIB600 executa um programa simples que envia qualquer pacote recebido da rede de sensores para a porta Ethernet e vice-versa. Como NPF foi utilizado um portátil ACER 1300XC com as seguintes características: processador Athlon XP 1400+, 512 MB de memória RAM e sistema operativo Xubuntu 7.04 (Feisty).

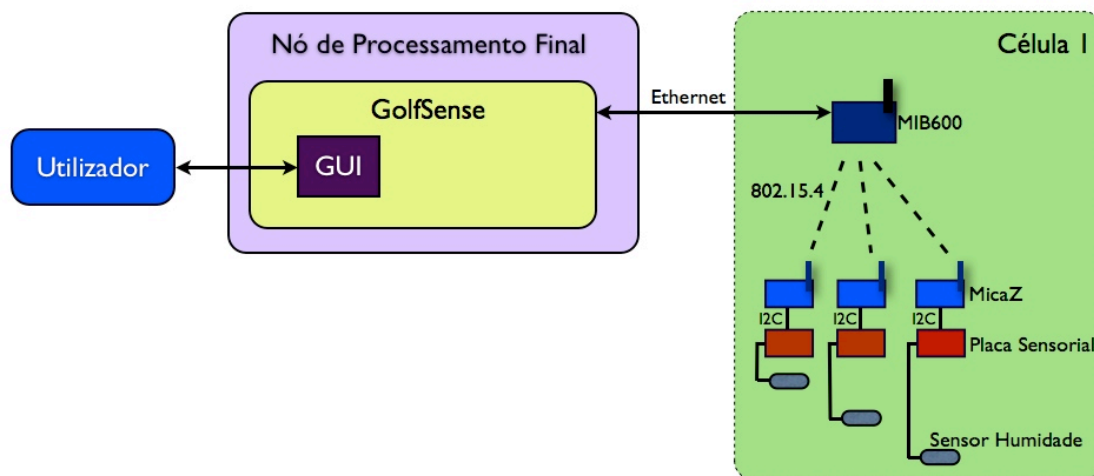


Figura 32 – Arquitectura do Cenário de Testes

Devido ao facto de ter sido impossível desenvolver e testar simultaneamente as aplicações *GolfSense* e *GolfWater* foi desenvolvida uma interface gráfica, recorrendo à plataforma de desenvolvimento *Java Swing*, que permite testar as funcionalidades da aplicação *GolfSense* de forma isolada. Esta interface gráfica encontra-se representada na Figura 33.

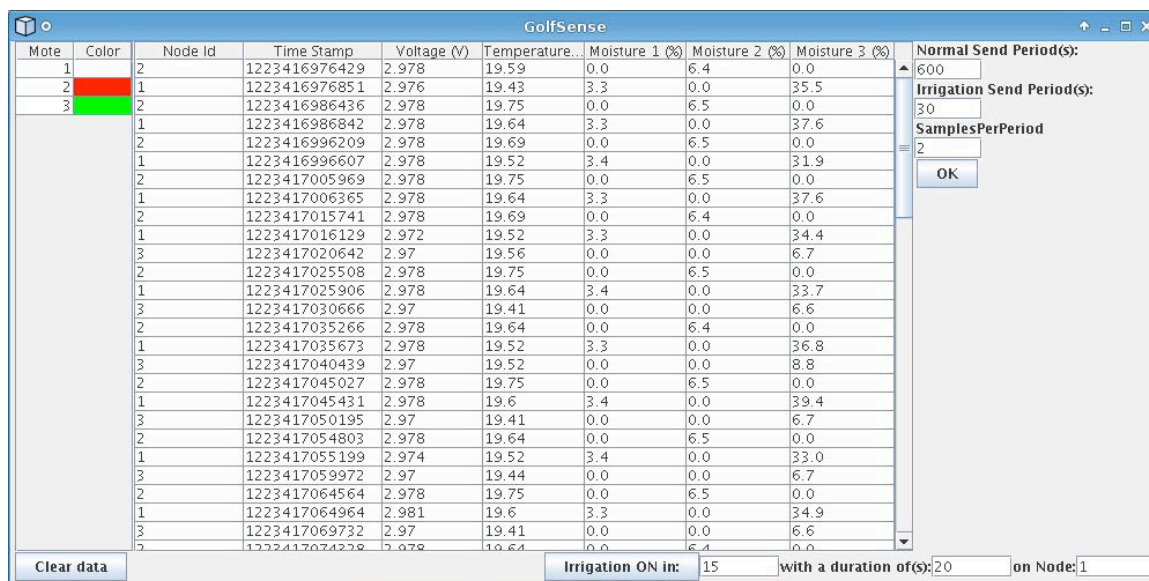


Figura 33 – Interface Gráfica *GolfSense*

Do lado esquerdo existe uma lista dos nós activos da rede de sensores. Ao centro uma tabela com os dados recolhidos pela rede de sensores (que contem a mesma informação enviada para a aplicação *GolfWater* descrita anteriormente). Do lado direito encontram-se um conjunto de campos e botões que permitem alterar a configuração da rede de sensores e gerar ordens de rega. Ao permitir observar em tempo real a recepção dos dados recolhidos pela rede de sensores esta interface gráfica facilitou o teste e a correcção das funcionalidades do algoritmo descrito anteriormente.

Todos os testes descritos de seguida foram realizados num dos jardins interiores do Instituto Superior Técnico do Taguspark, com a excepção do teste descrito na secção 6.4, que foi efectuado num jardim ao ar livre.

## 6.1 Testes funcionais ao algoritmo de medição e actuação

Os testes descritos neste capítulo tiveram como objectivo comprovar o correcto funcionamento das funcionalidades do algoritmo de medição e actuação desenvolvido. O algoritmo de medição e actuação, descrito em 4.4, permite controlar o estado (Modo Normal ou Modo Rega) em que se encontra cada um dos nós remotos que constituem a rede de sensores e também modificar em tempo de execução os seguintes parâmetros de configuração da rede de sensores: frequência com que são enviados os dados recolhidos pela rede de sensores para o nó de processamento final e número de amostras recolhidas por período de medição.

Na Tabela 3 encontra-se uma descrição dos testes funcionais realizados assim como os resultados obtidos. Tal como pode ser observado nesta tabela todos os testes realizados obtiveram resultado positivo pelo que é possível concluir que as funcionalidades do algoritmo de medição e actuação se encontram correctamente implementadas.

Nº	Descrição do Teste	Resultado
1	<p>Inserção e execução de ordens de rega para cada um dos nós da rede de sensores. Com a rede de sensores configurada para enviar os dados recolhidos para o NPF de 10 em 10 segundos em Modo Normal e de 2 em 2 segundos em Modo Rega foram inseridas as seguintes ordens de rega no sistema:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Liga Modo Rega dentro de 15 segundos com duração de 20 segundos para o Nó 1.</li> <li>• Liga Modo Rega dentro de 30 segundos com duração de 30 segundos para o Nó 2.</li> <li>• Liga Modo Rega dentro de 60 segundos com duração de 120 segundos para o Nó 4.</li> </ul>	<b>OK</b> – Os nós remotos permaneceram em modo de rega durante os períodos de tempo previstos.
2	Alteração do período com que a rede de sensores envia os dados recolhidos para o NPF. Este período foi modificado dos 10 segundos (configuração inicial) para os 30 segundos e posteriormente para os 1800 segundos.	<b>OK</b> – Todos os nós cumpriram as configurações definidas.
3	Alteração do número de amostras que a rede de sensores recolhe por cada período de medição. Este número de amostras foi modificado de 4 (configuração inicial) para 2 e posteriormente para 8.	<b>OK</b> – Todos os nós cumpriram as configurações definidas.

Tabela 3 – Resultados dos testes funcionais ao algoritmo descrito em 4.4

## 6.2 Medição e Transmissão de valores de Humidade do Solo

O objectivo deste teste foi o de apurar a capacidade que o sistema desenvolvido tem para medir correctamente a humidade do solo a diversas profundidades e transmitir os valores medidos até ao NPF. Pretendia-se também verificar se este sistema era capaz de, através das medições realizadas pelos sensores de humidade do solo, detectar rapidamente o início (e final) de períodos de rega ou de chuva.

Este teste procurou caracterizar o funcionamento do sistema num cenário próximo daquele onde este será utilizado no futuro (campo de golfe). Para tal a rede de sensores representada na Figura 32 foi instalada num dos jardins do campus do IST no *Taguspark*. O sistema de rega instalado nestes jardins permitiu testar o sistema durante períodos de seca e de rega simulando situações normais na rega de plantações.

O objectivo deste teste foi o de realizar medições de humidade do solo antes, durante e depois de períodos de rega. A duração total do teste foi de aproximadamente quatro horas durante as quais o sistema de rega foi activado por três vezes. A primeira vez que o sistema de rega foi ligado foi entre os 25 e os 35 minutos deste teste, tal como pode ser observado na Tabela 4. Posteriormente o sistema foi activado por mais duas vezes durante 2 minutos, entre os minutos 39 e 41 e novamente durante 10 minutos, entre os minutos 42 e 52. Finalizado este período de rega continuaram a ser realizadas medições durante aproximadamente 170 minutos.

Estas constantes alterações entre períodos de rega e períodos durante os quais o sistema se encontrou desactivado tiveram como objectivo avaliar a capacidade do sistema para detectar períodos de rega (ou chuva).

Duração Total	~240 minutos
Período de Rega 1	25 – 35 minutos
Período de Rega 2	39 – 41 minutos
Período de Rega 3	42 – 52 minutos
Frequência de Envio	1 minuto
Número de Amostras por período	4

Tabela 4 – Parâmetros do teste de medição da humidade do solo

Tal como pode ser observado na Tabela 4 o sistema foi configurado para enviar os dados recolhidos com uma frequência de 1 minuto durante o qual deveriam ser recolhidas 4 medições de humidade do solo.

No gráfico da Figura 34 encontram-se representados os valores de humidade do solo medidos pelos 3 sensores de humidade do solo colocados a 3 profundidades diferentes. O Sensor 1 encontrava-se a uma profundidade de 2 cm, o Sensor 2 a uma profundidade de 5 cm e o sensor 3 a uma profundidade de 10 cm. As barras verticais azuis representam os períodos durante os quais a rega se encontrou activada.

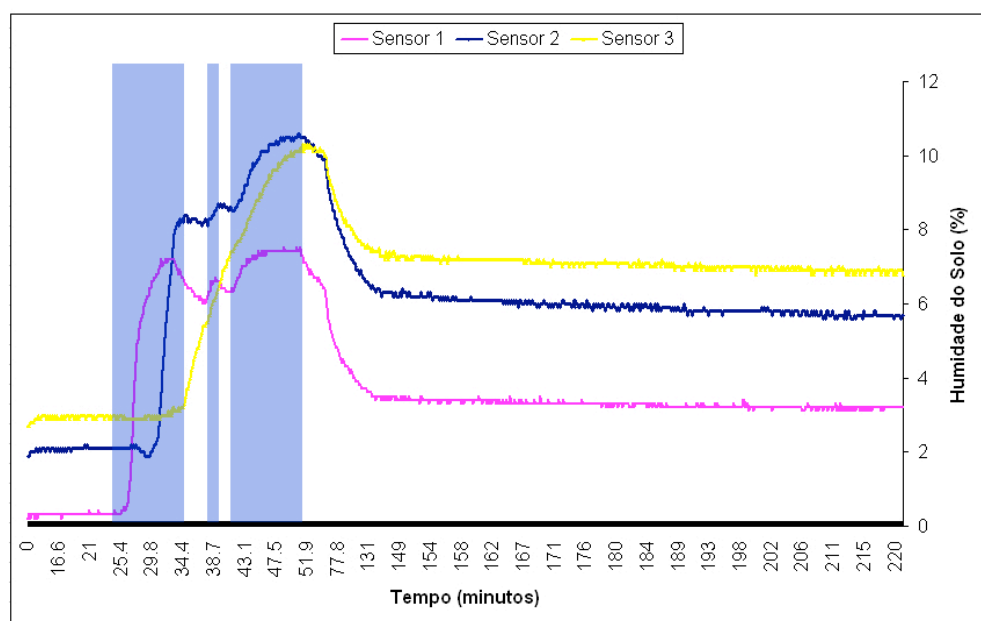


Figura 34 – Variação da humidade do solo a 3 profundidades diferentes

Através da observação deste gráfico é possível concluir que este sistema de monitorização da humidade do solo é eficaz a detectar períodos de rega visto que aproximadamente 1 minuto depois do sistema de rega ter sido activado verificou-se um aumento brusco nos valores de humidade do solo medidos pelo Sensor 1. Como era espectável as humidades do solo medidas pelos Sensores 2 e 3 só começam a aumentar alguns minutos depois, devido ao tempo que a água demora a infiltrar-se no solo e a atingir a profundidade a que se encontram estes sensores.

É também possível observar que os dois sensores que se encontram mais perto da superfície são muito mais sensíveis ao facto da rega se encontrar ou não activa do que o 3º sensor, que se encontra a maior profundidade. De facto, as medições realizadas pelos dois sensores que se encontram mais próximos da superfície reflectem quase imediatamente as alterações ao estado em que se encontra o sistema de rega (activo ou inactivo).

É também interessante comparar os valores de humidade do solo reportados pelos 3 sensores no início e no final deste teste. Em ambos os momentos o sensor que mede uma maior humidade do solo é o que se encontra a maior profundidade, seguindo-se o que se encontra no meio e finalmente o que está mais à superfície reporta os valores mais baixos de humidade do solo. Esta situação pode ser explicada pelo facto de os solos mais superficiais reterem menos água devido a fenómenos de evaporação e infiltração.

## **6.3 Medição da Tensão das Baterias**

O objectivo deste teste foi verificar a qualidade das medições da tensão das baterias realizadas pela placa sensorial desenvolvida. Para tal foram utilizados dois multímetros (Univolt DT-64 e Langois UT71C). As medições realizadas pela placa sensorial foram comparadas com as medições efectuadas por estes dois multímetros. A precisão com que o nó remoto mede a tensão das baterias que o alimentam é importante não só para informar o utilizador do sistema de que deverá proceder à substituição das baterias mas também porque os cálculos dos valores de temperatura e humidade do solo utilizam como parâmetro a tensão das baterias. Por este motivo a precisão dos valores de temperatura e humidade do solo reportados pelo nó sensorial depende directamente da precisão com que este mede a tensão das baterias que o alimentam.

Foram realizadas 10 medições para 10 conjuntos diferentes de duas baterias alcalinas AA com tensões que variaram entre aproximadamente os 2.2V e os 3.2V. Durante o funcionamento normal do nó remoto a tensão das baterias deverá variar entre estes valores de tensão. Visto que, utilizando duas baterias alcalinas AA novas se obtêm tensões de aproximadamente 3.2V, mas quando a tensão de alimentação do nó remoto se aproxima dos 2.2V o rádio do mote MicaZ deixa de funcionar correctamente.

Os resultados obtidos encontram-se representados na Tabela 5.

Placa Sensorial	Univolt DT-64	Módulo da Diferença	Langois UT71C	Módulo da Diferença
2.299V	2.32V	0.021V	2.315V	0.016V
2.432V	2.45V	0.018V	2.444V	0.012V
2.634V	2.67V	0.036V	2.663V	0.029V
2.766V	2.76V	0.006V	2.760V	0.006V
2.814V	2.82V	0.006V	2.816V	0.002V
2.987V	2.98V	0.007V	2.976V	0.011V
3.013V	3.01V	0.003V	3.008V	0.005V
3.045V	3.04V	0.005V	3.036V	0.009V
3.137V	3.14V	0.003V	3.136V	0.001V
3.196V	3.19V	0.006V	3.190V	0.006V

Tabela 5 – Resultados do teste de medição da tensão das baterias

Na primeira coluna encontram-se as tensões medidas pela Placa Sensorial. Na segunda e quarta coluna encontram-se as tensões medidas pelos multímetros DT-64 e UT71C respectivamente. Na terceira e quinta coluna encontram-se os módulos das diferenças entre as tensões medidas pela Placa Sensorial e pelos dois multímetros.

Como é possível observar pelos resultados da Tabela 5 as diferenças entre as tensões medidas pelos multímetros e pela placa sensorial variam entre 0.001V e 0.036V. Ou seja, a diferença máxima observada foi de 0.036V. A diferença média entre os valores de tensão medidos pela placa sensorial desenvolvida e os dois multímetros foi de 0.0104V, valor que se pode considerar bastante aceitável e que não deverá afectar significativamente o cálculo das restantes medições (humidade do solo e temperatura) efectuadas pelo nó sensorial.

## 6.4 Teste de Longa duração em Jardim ao Ar Livre

O teste descrito nesta secção teve como objectivo aferir o comportamento do sistema desenvolvido num ambiente o mais próximo possível da realidade para a qual este foi concebido. Na impossibilidade de testar o sistema num campo de golfe este foi instalado num jardim ao ar livre. Ao contrário dos jardins interiores do IST-Taguspark, onde foram realizados os testes descritos anteriormente, um jardim exterior encontra-se exposto a uma série de factores climáticos que são importantes de considerar numa futura utilização deste sistema. A exposição directa à luz solar, a natural variação da temperatura durante o dia e a noite, a chuva e o vento são factores que podem influenciar as medições realizadas.

Com o objectivo de testar o comportamento do sistema face a estes factores climáticos foi realizada uma instalação semelhante à da Figura 32 num jardim exterior. Foram utilizados três



nós remotos cada um dos quais constituído por um Mote MicaZ, uma placa sensorial, descrita em 5.1.1.2, e um sensor de humidade do solo descrito em 5.1.1.3. Os sensores de humidade do solo foram colocados a uma profundidade de 3 cm. Cada um destes nós remotos foi instalado num local com características específicas com o objectivo de determinar a forma como estas características influenciam as medições realizadas. Segue-se uma descrição de cada um dos locais onde foram instalados os nós remotos:

**Local 1:** Próximo do aspersor do sistema de rega, em zona plana.

**Local 2:** Em zona plana, um pouco mais afastada do aspersor do sistema de rega e com a influência (sombra) de uma árvore.

**Local 3:** Em zona de declive acentuado, no limite do alcance do aspersor do sistema de rega.

Os três nós remotos foram configurados para reportarem as medições para o NPF de 30 em 30 minutos. Durante cada período de 30 minutos os nós remotos realizaram quatro medições de humidade do solo, temperatura e tensão das baterias.

Em cada um dos dias durante os quais decorreu o teste foi definido um período de rega com início às 17:30 e duração de 5 minutos. Durante estes períodos de rega o sistema foi configurado para que os nós remotos enviassem os dados recolhidos de 30 em 30 segundos continuando a realizar quatro medições por cada período de envio.

Na Figura 35 encontra-se representado o gráfico das temperaturas medidas pelos 3 nós remotos ao longo dos 3 dias durante os quais decorreu o teste. As barras azuis verticais destacam os períodos em que o sistema se encontrou em modo de rega.

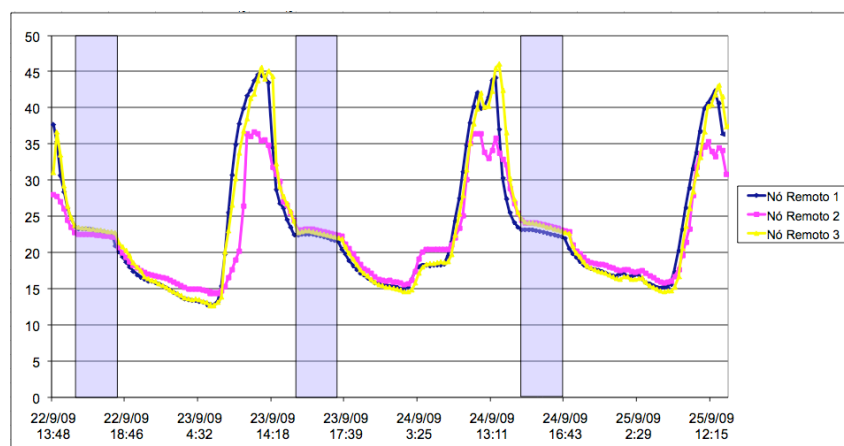


Figura 35 – Temperaturas medidas pelos 3 nós remotos em graus Celsius (°C)

Como é possível observar no gráfico da Figura 35 a temperatura medida pelos 3 nós remotos teve um gradiente de variação bastante elevado. Durante as noites foram medidos valores de temperatura bastante baixos (na ordem dos 12.7°), enquanto durante o dia chegaram a ser atingidos valores na ordem dos 46.1°.

Outro facto interessante de constatar é o de que a temperatura do nó remoto 2 nunca atinge temperaturas tão elevadas como as medidas pelos restantes nós. A temperatura máxima

medida pelo nó remoto 2 foi de 36.7°. Este comportamento pode ser explicado devido ao nó remoto 2 ter sido instalado junto a uma árvore o que fez com que este tivesse ficado à sombra durante os períodos de maior calor.

Em dias de forte exposição solar (como foi o caso dos dias em que foi realizado o teste) a medição da temperatura em diferentes zonas permite determinar quando é que cada uma destas zonas passa a estar protegida do sol. Visto que a rega deverá ser idealmente realizada numa altura em que os locais a regar já não se encontrem sob exposição directa da luz solar, a informação das temperaturas recolhidas pelo sistema poderá ser muito útil para determinar quando deverá ser regada cada zona. As medições de temperatura ao nível do solo poderão também ser utilizadas por agrónomos para prever a taxa de evaporação de água nas diferentes zonas. É possível concluir que a medição da temperatura nas diferentes zonas de um campo de golfe (ou de qualquer outra exploração agrícola) poderá transmitir informações muito úteis aos responsáveis pela gestão da rega.

Na Figura 36 encontra-se representado o gráfico da variação das humidades do solo, medidas nos locais descritos anteriormente, com o tempo.

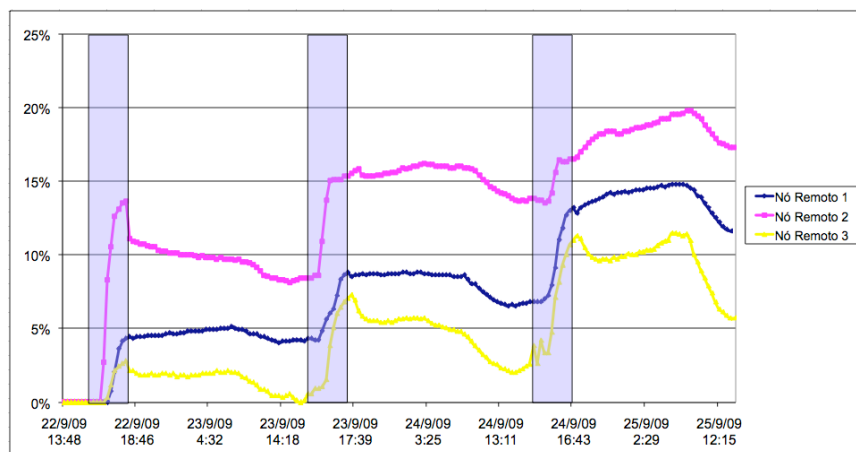


Figura 36 – Humidades medidas pelos 3 nós remotos em %

Tal como pode ser observado no gráfico da Figura 36 os locais onde foram instalados os nós remotos encontravam-se inicialmente totalmente secos. Por este motivo os valores de humidade relativa do solo reportados foram de 0%. O primeiro período de rega ocorreu às 17:30 do primeiro dia e teve uma duração de 5 minutos. Como pode ser observado no gráfico a humidade do solo aumentou para os 3 nós remotos a esta hora. O nó remoto 2 (instalado a uma distância intermédia do aspersor do sistema de rega e próximo de uma árvore) foi aquele que registou um aumento mais rápido e acentuado da humidade do solo. Este facto pode ser explicado por este nó remoto ter sido instalado aproximadamente a meio do raio de acção do aspersor, zona onde se deposita a maior parte da água proveniente do sistema de rega. Os nós remotos 1 e 3, respectivamente o nó remoto mais próximo e o mais afastado do aspersor, registaram aumentos de humidade menos significativos.

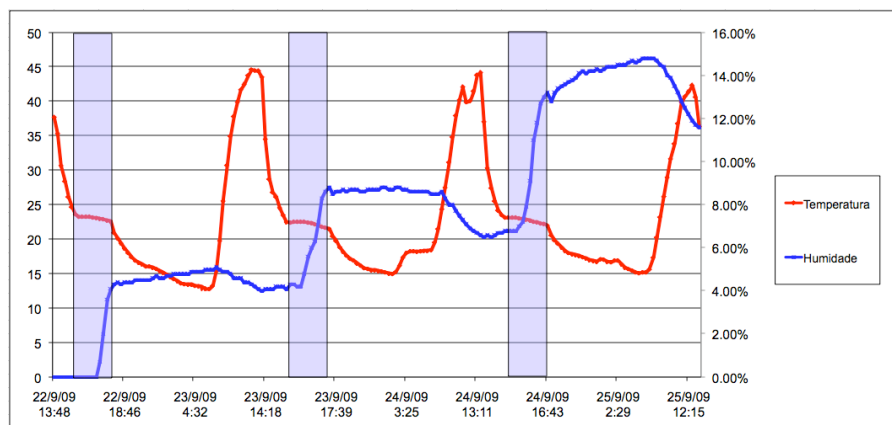


Figura 37 – Relação entre a humidade (%) e a temperatura (°C) medidas pelo Nó Remoto 1

É interessante notar que a velocidade com que a humidade do solo diminui está directamente relacionada com a temperatura que se fazia sentir nesse momento. Observando a Figura 37 é possível concluir que quanto mais alta é a temperatura mais depressa a humidade do solo diminui. Durante os períodos nocturnos, em que a temperatura medida foi mais baixa (e a humidade ambiente terá sido presumivelmente mais elevada) as humidades do solo praticamente não diminuíram, chegando mesmo a subir ligeiramente no 1º e no 3º dia provavelmente devido à infiltração da água proveniente da rega.

## 6.5 Performance Energética

O objectivo deste teste foi avaliar a performance energética do algoritmo de medição e actuação descrito em 4.4. Um dos principais objectivos do algoritmo de medição e actuação desenvolvido foi o de otimizar o consumo energético dos nós remotos maximizando a sua vida útil. Para atingir este objectivo este algoritmo cria oportunidades para desligar a interface rádio dos motes MicaZ e colocar o processador Atmega128 em modo *idle*.

Neste teste foram utilizados dois nós remotos constituídos por motes MicaZ e placas sensoriais (descritas em 5.1.1.2). Ambos os nós remotos foram programados para se sincronizarem com o Nó de Processamento Final, enviando os dados recolhidos pelos seus sensores e recebendo parâmetros de configuração, de 10 em 10 minutos (600 segundos).

O Nó Remoto 1 foi programado para tirar partido das oportunidades criadas pelo algoritmo descrito em 4.4. Deste modo este nó remoto apenas liga a sua interface rádio e activa o processador Atmega128 quando pretende comunicar com o Nó de Processamento Final (de 10 em 10 minutos). O tempo máximo durante o qual a interface rádio e o processador do mote MicaZ se encontram activos é de 2 segundos por cada período de sincronização. O *duty cycle* do rádio do Nó Remoto 1 é assim de 2/600 ou 1/300.

O Nó Remoto 2 mantém o seu rádio permanentemente activo e não utiliza qualquer funcionalidade de poupança de energia oferecida pelo processador Atmega128, como a sua colocação em modo *idle*.

No gráfico da Figura 38 é possível comparar a forma como varia a tensão das baterias de ambos os nós com o tempo. Através da análise deste gráfico verifica-se que a tensão das baterias que alimentaram o Nó Remoto 2 decresceu de forma muito mais rápida e acentuada do que a tensão das baterias que alimentaram o Nó Remoto 1.

O Nó Remoto 2 atingiu a sua tensão mínima (2.126V) passadas aproximadamente 77.5 horas. Depois deste tempo deixaram de chegar ao Nó de Processamento Final pacotes provenientes do Nó Remoto 2.

O Nó Remoto 1 permaneceu em funcionamento durante aproximadamente 318.8 horas ao fim das quais atingiu a tensão de (2.128V) e deixou de comunicar com o Nó de Processamento Final.

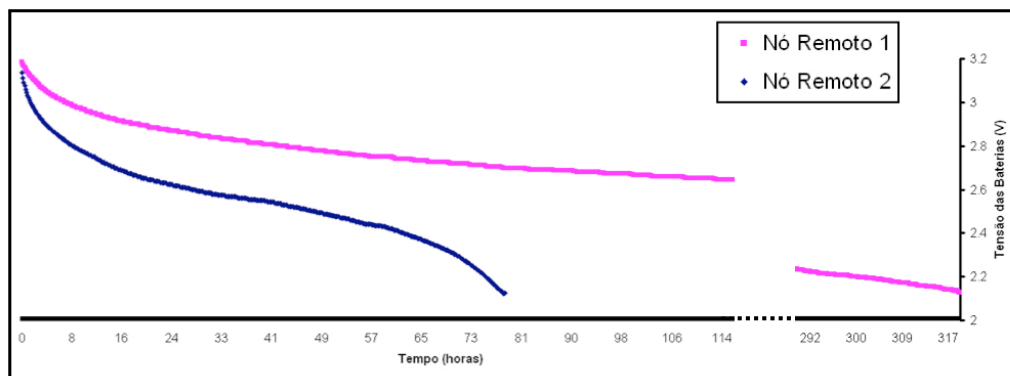


Figura 38 – Comparação da performance energética de dois nós remotos

É assim possível verificar que a utilização do algoritmo descrito em 4.4, permitiu multiplicar por 4 o tempo de vida útil de um nó remoto. Este facto pode ser explicado pelo grande impacto que o rádio do mote MicaZ tem no consumo energético do nó remoto mesmo quando este não se encontra a transmitir mas apenas a escutar o meio. Pelo facto de permitir que os nós remotos saibam exactamente quando devem esperar transmissões provenientes do NPF, o algoritmo proposto nesta dissertação permite que os nós remotos mantenham os seus rádios desligados durante grande parte do tempo, melhorando assim significativamente a sua performance energética.

## 7. Conclusões

Esta dissertação propõe uma aplicação de monitorização ambiental baseada no conceito de redes de sensores adaptada às necessidades específicas da gestão da rega de um campo de golfe. O principal objectivo desta dissertação foi o de criar uma aplicação que fosse efectivamente útil para os responsáveis pela gestão de um campo de golfe. Ao oferecer uma “visão” mais precisa sobre as reais necessidades hídricas da relva em todas as zonas de um campo de golfe esta aplicação deverá permitir otimizar o consumo de água destes recintos desportivos.

Os campos de golfe foram escolhidos como cenário para esta primeira abordagem à optimização da gestão agrícola, utilizando o conceito de redes de sensores, devido ao facto de estes empreendimentos consumirem quantidades de água muito elevadas mas ao mesmo tempo possuírem recursos financeiros suficientes para investir em sistemas de optimização da rega. Deste modo, uma poupança de água na ordem dos 10% poderá ser suficiente para justificar o investimento inicial inerente à instalação de um sistema de monitorização ambiental. Ou seja, os campos de golfe deverão ser os primeiros locais onde a instalação de um sistema deste tipo será economicamente rentável. Posteriormente, e se o esperado aumento da utilização de redes de sensores levar a que os custos dos equipamentos diminuam, o sistema de monitorização proposto nesta dissertação poderá ser facilmente adaptado para auxiliar a gestão de outras explorações agrícolas.

O trabalho proposto nesta dissertação procurou aplicar o conceito de redes de sensores desenvolvendo uma aplicação de monitorização de parâmetros ambientais que, ao optimizar a produtividade de explorações agrícolas, pudesse vir a ser proveitosa de um ponto de vista socioeconómico. Os estudos desenvolvidos no âmbito desta dissertação, nomeadamente a análise de requisitos efectuada com a colaboração de especialistas em agronomia e responsáveis pela rega de campos de golfe e o estudo de instalação de motes MicaZ num campo de golfe real, poderão servir como demonstração da viabilidade da aplicação de redes de sensores à gestão agrícola.

A implementação de referência desenvolvida, com base numa concepção mais geral de uma aplicação de monitorização ambiental, permitiu validar o conceito pondo-o à prova em cenários reais. O conjunto de testes realizados sobre este protótipo permite concluir que este é eficaz a medir, quer a humidade do solo quer a temperatura, e que estas medições podem ser muito úteis no auxílio à gestão da rega. Os períodos de rega (ou de chuva) são detectados rapidamente pelo sistema de monitorização e os gradientes térmicos medidos são extremamente úteis para determinar quais as melhores alturas para irrigar cada zona de um campo de golfe.

Também o algoritmo de medição e actuação desenvolvido mostrou-se eficaz a controlar os parâmetros de funcionamento da rede de sensores (período de sincronização, número de amostras recolhidas por período e ordens de rega) e a optimizar o consumo energético dos nós remotos.

## 7.1 Trabalho Futuro

Apesar da rede de sensores desenvolvida neste projecto não poder ser ainda designada por rede sem fios de sensores/actuadores devido ao facto de não possuir quaisquer actuadores, o algoritmo de medição e actuação desenvolvido prevê a futura utilização de interfaces que permitam controlar as electroválvulas de um sistema de rega. Ao garantir que cada nó da rede de sensores se encontra num de dois estados: “Modo Normal” ou “Modo de Rega” e que o estado de cada nó pode ser controlado pelo utilizador final da aplicação, apenas será necessário dotar alguns nós da rede de sensores com as interfaces físicas necessárias para obter um sistema de monitorização e controlo funcional. A lógica computacional já existe e encontra-se em funcionamento mas faltam as interfaces físicas que irão permitir que os nós da rede de sensores possam controlar as electroválvulas do sistema de rega.

Seria também útil dotar os nós da rede de sensores de um mecanismo de obtenção de energia alternativo às baterias. Visto que a rede de sensores proposta nesta dissertação deverá ser instalada ao ar livre a solução mais óbvia seria a de equipar os nós remotos com painéis solares que permitissem recarregar a energia dos nós, tal como proposto em [4]. Para armazenar a energia recolhida pelos painéis solares existem duas alternativas: baterias electroquímicas ou super-condensadores.

A evolução recente na área dos super-condensadores torna viável a sua utilização como sistema de armazenamento de energia de uma solução deste tipo. Os super-condensadores têm a vantagem de suportar um número virtualmente ilimitado de ciclos de carga/descarga. No entanto a sua baixa densidade energética, quando comparada com as baterias, e o seu preço ainda elevado poderão tornar os nós da rede de sensores demasiado volumosos e dispendiosos. Existem também soluções híbridas que utilizam os super-condensadores como buffers para reduzir o número de ciclos a que as baterias estão sujeitas aumentando assim a sua vida útil.

## Referências

1. I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey", *Computer Networks*, 38(4): 393-422, Março, 2002
2. L. Horrigan, R. S. Lawrence, P. Walker, "How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture", *Environmental Health Perspectives*, 110, pp. 445-456, 2002
3. X. Jiang, J. Polastre, D. Culler, "Perpetual environmentally powered sensor networks" in Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005
4. T. Voigt, H. Ritter, J. Schiller, "Utilizing solar power in wireless sensor networks", in *IEEE Local Computer Networks*, 2003
5. S. Roundy, P. Wright, J. Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes", 2003
6. J. Pan, B. Xue, Y. Inoue, "A self-powered sensor module using vibration-based energy generation for ubiquitous systems", in 6th International Conference on ASIC, vol. 1, 2005
7. M. Stordeur, I. Stark, "Low power thermoelectric generator – self-sufficient energy supply for micro systems", in International Conference on Thermoelectronics, 1997
8. J. Paradiso, T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics", *IEEE Pervasive Computing* 4 (1), 2005
9. D. Ganesan, A. Cerpa, W. Ye, Y. Yu, J. Zhao and D. Estrin, "Networking Issues in Wireless Sensor Networks", *Journal on Parallel and Distributed Computing*, vol. 64, 2004
10. Alessio Falchi, "Sensor networks: Performance measurements with motes technology." Master's thesis, Dept. Of Information Engineering, University of Pisa, 2004

11. D. Culler, D. Estrin, M. Srivastava, "Overview of Sensor Networks", 2004
12. J. Burrell, T. Brooke, R. Beckwith, "Vineyard Computing: sensor networks in agricultural production", IEEE Pervasive Computing 3(1): 38-45
13. I. Stojmenovic, X. Lin, "GEDIR: Loop-free location based routing in wireless networks" Proc. IASTED Int. Conf. on Parallel and Distributed Computing and Systems, Nov. 3-6, 1999, Boston, MA, USA, 1025-1028
14. J. Navas, T. Imielinski, "Geographic addressing and routing", MobiCom'97, Budapest, Hungary, September 26-30 1997
15. Y. Koand, N. Vaidya, "Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks", in MobiCom'98, October 1998
16. D. Niculescu, B. Nath, "Ad hoc positioning system (APS)", in Proceedings of GLOBECOM, San Antonio, November 2001
17. P. Bahl, V. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF based user location and tracking system", Proceedings of IEEE INFOCOM, pp. 775-784, Tel Aviv, Israel, March, 2000
18. N. Priyantha, A. Chakraborty, H. Balakrishnan, "The cricket location-support system," Proceedings of ACM MOBICOM, pp. 32-43, Boston, MA, August 2000
19. N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin, "GPS-less low cost outdoor localization for very small devices", IEEE Personal Communications, vol. 7, no. 5, pp. 28-34, October 2000
20. R. Iyengar, B. Sikdar, "Scalable and distributed GPS free positioning for sensor networks", ICC '03. IEEE International Conference on Communications, 2003. Volume 1, 11-15 May 2003 Page(s):338 - 342 vol.1
21. R. Cardell-Oliver, K. Smettem, M. Kranz, K. Mayer, "A Reactive Soil Moisture Sensor Network: Design and Field Evaluation", International Journal of Distributed Sensor Networks, pp. 149 – 162, Volume 1, Number 2, April-June, 2005

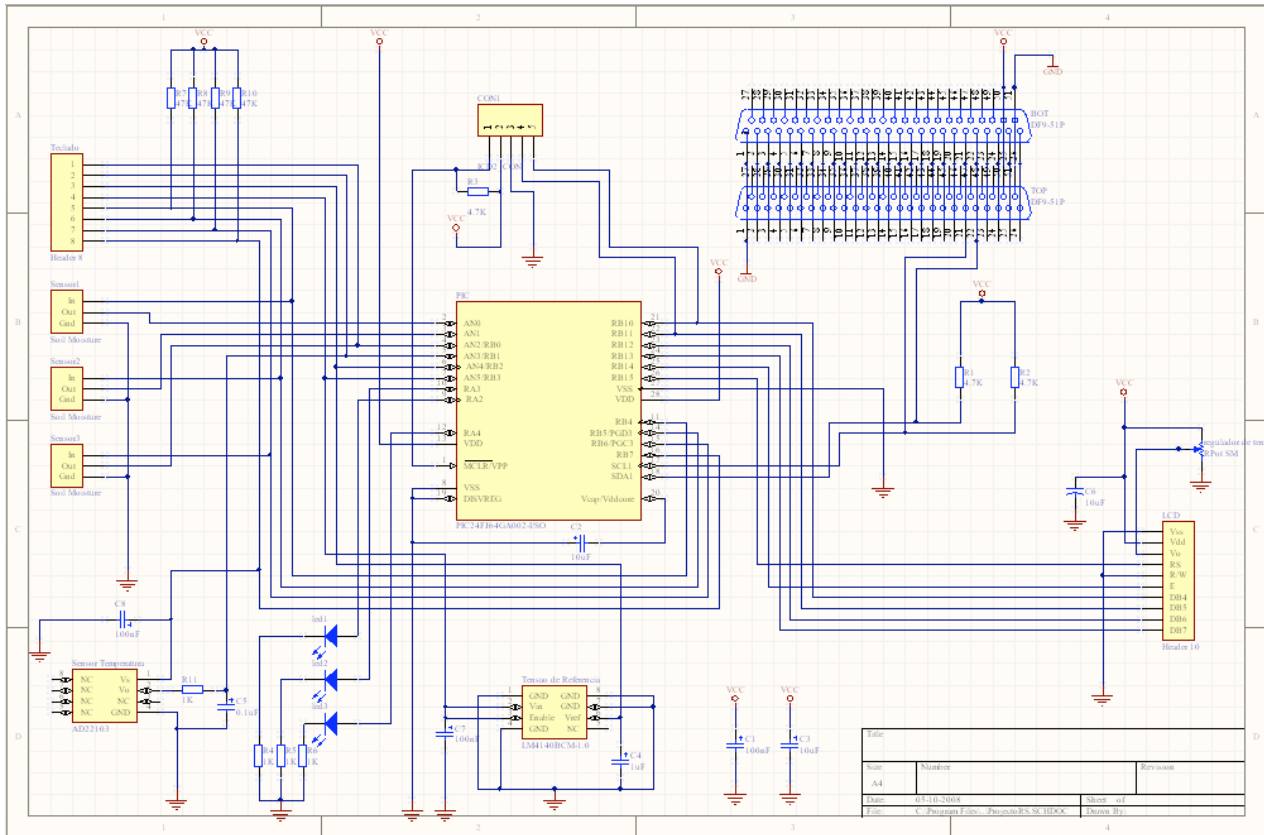


22. F. Xia, Y. Tian, Y. Li, Y. Sun, "Wireless Sensor/Actuator Network Design for Mobile Control Applications", *Sensors* 7(10):pp. 2157-2173, 2007
23. L. S. Pereira, "Necessidades de Água e Métodos de Rega", Publicações Europa América, 2004
24. B.A. Keating et al., "An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation", *European Journal of Agronomy*, vol. 18, pp. 267–288, January 2003
25. R. McCown, G. Hammer, J. Hargreaves, D. Holzworth, D. Freebairn, "APSIM: a Novel Software System for Model Development, Model Testing and Simulation in Agricultural Systems Research," *Agricultural Systems*, vol. 50, no. 3, pp. 255–271, 1996
26. L. S. Pereira, P. R. Teodoro, P. N. Rodrigues, J. L. Teixeira, "Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG", *Water Science And Technology Library*, vol. 44, pp. 161-180, 2003
27. R. Musaloiu-E., A. Terzis, K. Szlavecz, A. Szalay, J. Cogan, J. Gray, "Life Under your Feet: A Wireless Soil Ecology Sensor Network", *Proceedings of 3rd Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2006)*, Maio 2006
28. Talzi, A. Hasler, S. Gruber, C. Tschudin, "PermaSense: Investigating Permafrost with a WSN in the Swiss Alps", 2007
29. A. Torre-Neto, R. Ferrarezi, D. Razera, E. Speranza, W. Lopes, T. Lima, L. Rabello, C. Vaz, "Wireless sensor network for variable rate irrigation in citrus", *INFORMATION & TECHNOLOGY, SUSTAINABLE FRUIT & VEGETABLE PRODUCTION - FRUIT, NUT AND VEGETABLE PRODUCTION ENGINEERING SYMPOSIUM*, 7, 2005, Montpellier. Resumos, 2005. p. 118-118.
30. J. Panchard, S. Rao, T.V. Prabhakar, H.S. Jamadagni, J. Hubaux, "COMMON-Sense Net: Improved Water Management for Resource-Poor Farmers via Sensor Networks", 2006
31. R. Matthews, W. Stephens, Eds., "Crop-Soil Simulation Models: Applications in Developing Countries", *CaB Intl*, 2002

32. I. Akyildiz, E. Stuntebeck, "Wireless Underground Sensor Networks: Research Challenges," *Ad Hoc Networks Journal*, November 2006
33. E. Stuntebeck, D. Pompili, T. Melodia, "Underground wireless sensor networks using commodity terrestrial nodes", Georgia Institute of Technology, April 2006
34. J. Sojdehei, P. Wrathall, D. Dinn, "Magneto-inductive (MI) communications", *OCEANS*, 2001, MTS/IEEE Conference and Exhibition, vol. 1, 2001, pp. 513–519
35. K. Ikraht, W. Schneider, "Communications via seismic waves employing 80-Hz resonant seismic transducers", *IEEE Transactions on Communications*, 1968, pp. 439–444
36. H. Dubois-Ferriere, R. Meier, L. Fabre, P. Metrailler, "TinyNode: A Comprehensive Platform for Wireless Sensor Network Applications", Lausanne, Switzerland, 2006
37. J. Hill, D. Culler, "Mica: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks", *IEEE Micro*, 22(6):12–24, Nov. 2002
38. R. Cardell-Oliver, "ROPE: A Reactive, Opportunistic Protocol for Environment Monitoring Sensor Networks", In *Proceedings of the 2nd EmNets Workshop*, May 2005
39. R. Shah, S. Roy, S. Jain, W. Brunette, "Data MULEs: Modeling a Three-tier Architecture for Sparse Sensor Networks", *IEEE SNPA Workshop*, Maio 2003
40. H. R. Bogen, J.A. Huisman, C. Oberdorster, H. Vereecken, "Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications", *Geophysical Research Abstracts*, 2007

# Anexos

## Anexo 1: Esquemático da Placa Sensorial Desenvolvida



## Anexo 2: Dimensionamento da Placa Sensorial Desenvolvida

Para que o microprocessador funcione correctamente é necessário adicionar resistências de pull-up aos pinos MCLR, SCL e SDA. Quando o microprocessador não está a ser programado o pino MCLR está (idealmente) a VDD (3V). Nesta situação podemos limitar a corrente a +/- 5uA com uma queda de tensão de apenas 23.5mV utilizando uma resistência de 4.7KΩ (R3). Este valor da resistência de pull-up no pino MCLR foi considerado um bom equilíbrio visto que de acordo com o manual do PIC a tensão no pino MCLR pode variar entre Vss – 0.3V e Vdd + 0.3V.

O microprocessador utilizado nesta placa sensorial necessita também de resistências de pull-up nos pinos Serial Clock (SCL) e Serial Data (SDA) do bus I2C. É possível calcular o valor das resistências de pull-up que devem ser utilizadas através da seguinte equação:

$$R_{PULL\_UP} = (t_R / (2,2 \cdot C_{BUS}))$$

A carga capacitiva máxima permitida no bus I2C (CBUS) é de 400pF. O tempo tR corresponde ao tempo que um sinal leva a mudar de 0 para 1 no bus I2C e só pode ser calculado depois de construída a placa. Por este motivo o valor das resistências utilizadas (4,7KΩ) foi escolhido com base no dimensionamento de placas semelhantes a esta que também utilizam processadores PIC24FJ e comunicação I2C.

Os condensadores C1 (100nF), C3 (10uF), C4 (1uF), C5 (100nF), C6 (10uF), C7 (100nF) e C8 (100nF) são utilizados como filtros para eliminar as naturais oscilações de tensão. O condensador C2 (10uF) serve para manter a estabilidade do regulador de tensão do PIC sendo a sua utilização recomendada pelo manual do PIC.

É utilizada uma resistência variável no pino Vo do LCD que permite modificar o seu contraste.

Foram ainda adicionadas 4 resistências de pull-up (R7, R8, R9 e R10) às 4 linhas correspondentes às colunas do *keypad* utilizado. O valor destas resistências (47kΩ) foi escolhido para limitar a corrente nos portos de entrada do PIC. Segundo o manual do PIC a corrente máxima que pode ser colocada em cada porto do I/O do PIC é de 25mA. Assumindo que a tensão máxima de alimentação do circuito nunca ultrapassa os 3,3V a utilização de resistências de 47kΩ garante que a corrente máxima nestes portos de I/O é de ~0,07mA, valor muito inferior ao máximo permitido (25mA).

Adicionalmente foram utilizados 3 leds para facilitar o processo de desenvolvimento e debug do software desenvolvido para o PIC. A estes leds foram ligadas 3 resistências de pull-down (R4, R5 e R6) de 1KΩ que permitem limitar a corrente que atravessa os leds a 3.3mA.

### Anexo 3: Lista de Componentes da Placa Sensorial Desenvolvida

Designação	Descrição	Valor	Notas
BOT	Hirose 51-pinos		Para ligar ao Mote MicaZ.
C1	Condensador	100nF	SMD(surface mount device)
C2	Condensador	10uF	Com uma ESR (equivalent series resistance) baixa de preferência cerâmico.
C3	Condensador	10uF	SMD(surface mount device)
C4	Condensador	1uF	SMD(surface mount device)
C5	Condensador	0.1uF	SMD(surface mount device)
C6	Condensador	10uF	Electrolítico (through-hole)
C7	Condensador	100nF	SMD(surface mount device)
C8	Condensador	100nF	SMD(surface mount device)
CON1	Conector 5-pinos		Para programar o PIC.
LCD	Conector 10-pinos		LCD Utilizado: PowerTip PC 1602-F
led1	LED		SMD(surface mount device)
led2	LED		SMD(surface mount device)
led3	LED		SMD(surface mount device)
PIC	Microcontrolador		Microchip PIC24FJ64GA002
R1	Resistência	4.7K $\Omega$	SMD(surface mount device)
R2	Resistência	4.7K $\Omega$	SMD(surface mount device)
R3	Resistência	4.7K $\Omega$	SMD(surface mount device)
R4	Resistência	1K $\Omega$	SMD(surface mount device)
R5	Resistência	1K $\Omega$	SMD(surface mount device)
R6	Resistência	1K $\Omega$	SMD(surface mount device)
R7	Resistência	47K $\Omega$	SMD(surface mount device)
R8	Resistência	47K $\Omega$	SMD(surface mount device)
R9	Resistência	47K $\Omega$	SMD(surface mount device)
R10	Resistência	47K $\Omega$	SMD(surface mount device)
R11	Resistência	1K $\Omega$	SMD(surface mount device)
regulador de tensao	Resistência		SMD(surface mount device)
Sensor Temperatura	Sensor Temperatura		Analog Devices AD22103
Sensor1	Conector 3-pinos		Permite conexão de qualquer sensor analógico que possa ser lido por um ADC e que funcione com uma tensão de alimentação de 3.3V.
Sensor2	Conector 3-pinos		Permite conexão de qualquer sensor analógico que possa ser lido por um ADC e que funcione com uma tensão de alimentação de 3.3V.
Sensor3	Conector 3-pinos		Permite conexão de qualquer sensor analógico que possa ser lido por um ADC e que funcione com uma tensão de alimentação de 3.3V.
Teclado	Conector 8-pinos		Para ligar teclado de 4 linhas por 4 colunas.
Tensão de Referencia	Tensão de Referência		National Semiconductor LM4140CCM-1.0
TOP	Hirose 51-pinos		Permite a adição de placas adicionais de forma <i>stackable</i>

## Anexo 4: Comunicação I<sup>2</sup>C

O processador PIC da placa sensorial desenvolvida comunica com o processador AVR do Mote MicaZ utilizando o protocolo I<sup>2</sup>C. O I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) é um protocolo de comunicação digital em série utilizado na interligação de diversos periféricos num determinado sistema. A grande vantagem da utilização de comunicação série é a significativa redução nos portos utilizados para efectuar a comunicação entre dois circuitos integrados.

Tipicamente o protocolo I<sup>2</sup>C é utilizado para estabelecer canais de comunicação entre micro controladores, e entre estes e diversos periféricos tais como: memórias EEPROM, displays LCD e conversores A/D.

O protocolo faz uso de duas linhas digitais bidireccionais, SDA (Serial Data) e SCL (Serial Clock). Ambas as linhas estão ligadas à tensão de V<sub>dd</sub> através de resistências de pull-up. Todos os circuitos interligados partilham estas mesmas linhas entre si, existindo um elemento que é o “Master” e os restantes assumem o papel de “Slave”. O “Master” controla toda a comunicação iniciando os processos de leitura e escrita nos respectivos “Slaves”. O “Master” é igualmente responsável pela geração do sinal de relógio na linha SCL sempre que pretende enviar ou receber informação de e para o “Slave”. A linha SCL é controlada pelo “Slave” apenas quando este processa um envio para o “Master”.

Este tipo de operação de envio de informação do “Slave” para o “Master” é denominado de “Read”, sendo a operação inversa um “Write”.

Cada dispositivo ligado ao bus I<sup>2</sup>C tem um endereço. Sempre que o “Master” pretende efectuar um “Read” ou um “Write” para um determinado “Slave”, transmite em primeiro lugar o respectivo endereço. O protocolo I<sup>2</sup>C, admite endereços de 7 e de 10 bits.

Todos os dispositivos “Slave” escutam o bus, até que seja detectada uma condição inicial, enviada pelo “Master”. A partir deste momento todos os “Slaves” se encontram em modo de recepção, aguardando a recepção de 1 byte. O primeiro bit do byte recebido, corresponde ao bit “Read/Write”, que permite indicar ao “Slave” se o “Master” pretende fazer um “Write” ou um “Read”. Os restantes 7 bits correspondem ao endereço do “Slave”. Caso o endereço do “Slave” coincida com o endereço enviado pelo “Master”, o “Slave” entra em modo de recepção ou em modo escrita, conforme o indicado pelo bit “Read/Write”. Caso entre em modo de envio o “Slave” toma o controlo das linhas SCL e SDA e procede ao envio de um byte para o bus.

No trabalho desenvolvido, o mote Micaz dotado de um processador AVR ATmega128L, comunica com o PIC instalado na Daughter-board, através do protocolo I<sup>2</sup>C, funcionando o AVR como Master e o PIC como Slave.