



**Pedro Henrique Pinto
Ribeiro Marques**

**Sistema de Controlo de Rega com
Comunicações Sem Fios**



**Pedro Henrique Pinto
Ribeiro Marques**

**Sistema de Controlo de Rega com
Comunicações Sem Fios**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações realizada sobre orientação científica dos professores:

Professor Dr. José Alberto Gouveia Fonseca, Professor Associado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Professor Dr. Alexandre Manuel Moutela Nunes da Mota, Professor Associado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

o júri

Presidente

Prof. Dr. João Nuno Pimentel da Silva Matos

Professor Associado da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Dr. José António Barros Vieira

Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Vogais

Prof. Dr. José Alberto Gouveia Fonseca

Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Dr. Alexandre Manuel Moutela Nunes da Mota

Professor Associado da Universidade de Aveiro (co-orientador)

Agradecimentos

Quero aqui agradecer a todos:

A todos um muito obrigado, mas principalmente a Ele.

Palavras-chave

Irrigação, Eficiência, Redes Sem Fios, 802.15.4

Resumo

Esta dissertação descreve o projecto de um sistema para gestão da rega de um espaço verde que se pretende que seja, dentro do possível, autónomo, auto-suficiente e económico.

Este terá duas características que o diferenciarão dos controladores tradicionais: A obtenção de informações meteorológicas *online* em detrimento de uma estação meteorológica local e comunicações locais sem fios baseadas no standard IEEE 802.15.4.

Key-Words

Irrigation, Efficiency, Wireless Networks, 802.15.4

Abstract

This dissertation describes the development of a control system for irrigation which is required to be, as far as possible, autonomous, self-sufficient and inexpensive.

It will have two features that will differentiate it from traditional controllers; the gathering of weather information online instead of a locally installed weather station and a wireless sensor network built upon the IEEE 802.15.4 standard.

Conteúdos

Conteúdos	i
Imagens	v
Tabelas	vii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos	3
1.3 Resultados	3
1.4 Estrutura da dissertação	4
2 Estado da Arte	5
2.1 Soluções Comerciais	5
2.1.1 Rain Bird	6
2.1.2 Cyber Rain	6
2.1.3 Accurate WeatherSet	6
2.1.4 Gardena	7
2.1.5 Alex-Tronix	7
2.1.6 Hunter	7
2.2 Publicações Científicas	8
3 Visão Panorâmica	9
3.1 Pressupostos	9
3.2 Recolha de Informação	10
3.3 Comunicações	11
3.3.1 Remotas	11
3.3.2 Locais	12
3.4 Energia	12
3.5 Servidor	12
3.6 Especificações	13
3.6.1 Nós	13
3.6.2 Coordenador	13

3.6.3	Servidor	13
3.7	Esquema Conceptual	14
3.8	Testes	15
4	Ferramentas de Suporte	17
4.1	Módulos de desenvolvimento mXS4, uMRF e XT65	17
4.2	FreeRTOS	19
4.3	Java ME	21
4.4	Sensores	21
4.4.1	Sensor de Humidade do Solo	21
4.4.2	Sensor de caudal	24
4.5	Electroválvulas	24
4.6	Servidor	25
5	Soluções Tecnológicas	27
5.1	Descrição Funcional	27
5.2	Servidor	28
5.3	Comunicações Remotas	30
5.4	Controlador	31
5.4.1	Controlo	31
5.4.2	Software	32
5.5	Sensor de caudal	34
5.6	Comunicações Locais	34
5.7	Sensor de Humidade do Solo	34
5.7.1	Hardware	35
5.7.2	Calibração	37
5.7.3	Software	38
5.8	Electroválvulas	38
5.8.1	Hardware	38
5.8.2	Software	40
6	Testes e Análises	43
6.1	Sensores	43
6.1.1	Sensor de caudal	43
6.1.2	Sensor de Humidade	44
6.2	Electroválvulas	44
6.3	Teste Global do Sistema	45
6.4	Análise de Custos	47
7	Conclusão	49
7.1	Trabalho Futuro	49
7.1.1	Servidor	49
7.1.2	Coordenador	49

7.1.3	Nós	50
7.1.4	Comunicação	50
7.1.5	Controlo	51
7.2	Pontos Críticos	51
7.3	Considerações Finais	51
A	Lista de Acrónimos	53
	Bibliografia	55

Imagens

1.1	Distribuição da água na Terra	1
1.2	Classificação Climática de Köppen	2
3.1	Esquema conceptual do Sistema de Controlo de Rega	14
3.2	Legenda dos Esquemas	15
4.1	O módulo mXS4	17
4.2	O módulo uMRF	18
4.3	O módulo MRF24J40MA	18
4.4	O módulo XT65	19
4.5	Tensiómetro	22
4.6	Sensor de Humidade Watermark	23
4.7	Caudalímetro Kobold DRS	24
4.8	Electroválvula por pulso Hunter	25
5.1	Esquema Funcional	28
5.2	Esquema lógico do comportamento do servidor	29
5.3	Esqueleto da trama	30
5.4	Controlador: XT65 e uMRF	31
5.5	Esquema lógico do funcionamento do módulo XT65	33
5.6	Esquema lógico de Endereçamento	35
5.7	Circuito de leitura de impedância com excitação AC	35
5.8	Circuito impresso para leituras de humidade	36
5.9	Sensor de Humidade: PCB e uMRF	38
5.10	Circuito de actuação nas electroválvulas	39
5.11	Adaptador de tensão	39
5.12	Circuito impresso para actuação nas electroválvulas	40
5.13	Actuador: PCB e uMRF	40
6.1	Sensor de caudal ligado à mXS4	44
6.2	Leituras de Resistência Eléctrica do sensor de Humidade	45
6.3	Comportamento Global	46

Tabelas

6.1	Valores de consumo de água	43
6.2	Custo dos Componentes	47
6.3	Custo dos Blocos Funcionais	48

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A água é um recurso escasso. Apesar de cerca de 70% da superfície do planeta estar coberta por água, apenas uma pequena parte pode ser usada nas actividades humanas indispensáveis à sobrevivência. As mudanças climáticas e as influências antropogénicas sobre os recursos hídricos estão a tornar essa parcela cada vez mais pequena. Mesmo em locais onde existia antes abundância é necessário agora um controlo mais rigoroso da sua utilização.

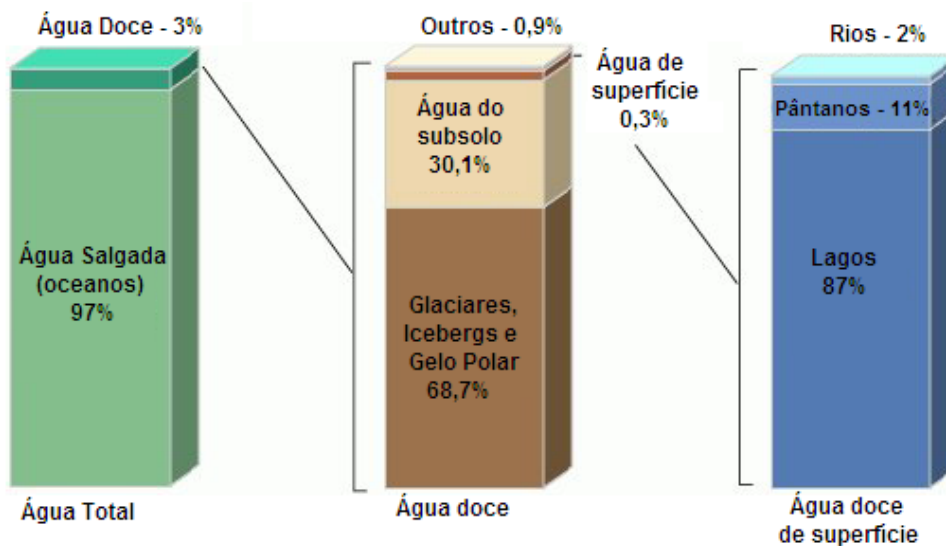


Figura 1.1: Distribuição da água na Terra

O *World Business Council for Sustainable Development* define *water stress* como a situação em que não existe água suficiente para todos os seus usos, seja para agricultura, indústria ou uso doméstico [8]. Visto que a população mundial está em franco crescimento – 7000 milhões previstos para 2011 [24] – esta situação tornar-se-á cada vez mais crítica. Como resultado dos

factos mencionados é de esperar uma subida do preço da água. No entanto, podem-se tomar medidas pró-activas para evitar ser-se apanhado de surpresa.

É esta a principal motivação desta dissertação. Poupar água estar-se-á a adiar – ou até mesmo a prevenir – o momento em que haverá *water stress* enquanto que, ao mesmo tempo, se recolhem os benefícios monetários que daí advêm. Como um exemplo de sucesso pode-se citar o jardim botânico de Coimbra que, através do restauro dos antigos sistemas hidráulicos e aproveitamento de água em 12 jardins históricos nacionais, conseguiu poupar cerca de 25 mil euros que eram gastos anualmente em consumo de água da rede pública e que significavam um terço do seu orçamento total. [7]

Em Portugal continental, segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima é temperado, do tipo C, verificando-se o subtipo Cs, o que se traduz num clima temperado com verão seco e invernos húmidos e pouco rigorosos. Esta classificação é obtida por uma análise das condições médias ao longo de 30 anos, visto que, de ano para ano, as condições podem variar bastante [15]. Assim, apesar de se poder afirmar que apenas é preciso regar no verão, não se pode afirmar com certeza absoluta quais as necessidades de um ano ou mês específico.

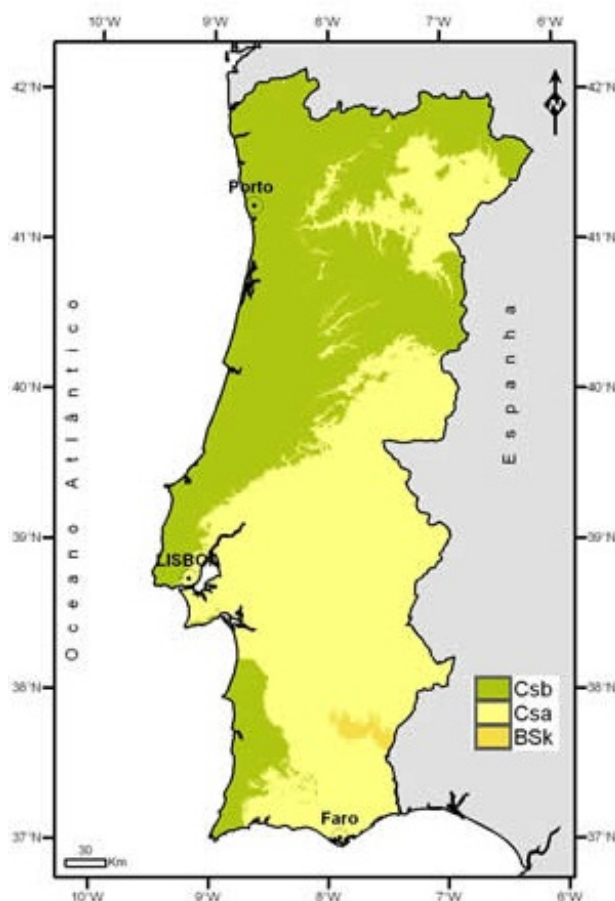


Figura 1.2: Classificação Climática de Köppen

1.2 Objectivos

O objectivo final de qualquer sistema que vise a eficiência hídrica é poupar água. Para esse efeito o sistema proposto fará uso de um controlador que tomará a decisão de quando e quanto regar, decisão essa, baseada na informação que recolherá de diversas fontes. Com o uso de um controlador, de sensores electrónicos e de regras de controlo pré-definidas dispensar-se-á um operador humano, falível e com uma avaliação subjectiva.

O objectivo principal deste projecto é a criação de uma rede local que permita, sem fios, a leitura de sensores e a actuação em válvulas de rega enquanto que se monitoriza o consumo de água. Atingidos estes objectivos poder-se-á adicionar ao conjunto um servidor que recolha informações meteorológicas *online* e as envie ao controlador que, baseado nelas, tomará decisões de quando e quanto regar. Este servidor incluirá mecanismos que permitam um acesso remoto aos módulos locais para efeitos de:

- Monitorização
- Recolha de dados
- Operação manual
- Detecção de falhas
- Modificação de parâmetros

Permeando todo o trabalho estará um esforço para aumentar a eficiência energética de todo o sistema e um estudo com vista a encontrar a melhor solução para torná-lo autónomo.

No fim desta dissertação, se todos os objectivos forem atingidos obter-se-á um sistema que:

- É capaz de tomar decisões acerca de quanto e quando regar.
- Requer o mínimo de intervenção humana.
- Tem elevada autonomia energética.
- Interfere o mínimo com o terreno.

1.3 Resultados

No momento de entrega desta dissertação nem todos os objectivos propostos tinham sido satisfatoriamente alcançados. Conseguiu-se, de facto, estabelecer comunicações sem fios entre os sensores, actuadores e a central de controlo e obter as informações meteorológicas sobre as quais se tomam as decisões de controlo. Foi desenvolvido um servidor que recolhe e formata as informações meteorológicas, guarda todas as mensagens recebidas do controlador e permite a alteração de parâmetros de controlo. Foram ainda tomadas algumas medidas que melhoraram a eficiência energética do sistema. A autonomia energética do sistema não foi completamente atingida.

1.4 Estrutura da dissertação

O presente documento encontra-se dividido em sete capítulos:

- No Capítulo 1, **Introdução**, é feita uma exposição dos objectivos, motivação e resultados obtidos na execução do projecto no qual esta dissertação se baseia.
- No Capítulo 2, **Estado da arte**, apresentam-se as soluções comerciais existentes e alguns projectos de investigação em curso pertinentes neste âmbito.
- No Capítulo 3, **Visão Panorâmica**, dão-se a conhecer as especificações macroscópicas do projecto.
- No Capítulo 4, **Ferramentas de Suporte**, introduzem-se os componentes que suportaram o desenvolvimento da solução.
- No Capítulo 5, **Soluções Tecnológicas**, revelam-se as soluções encontradas para satisfazer as especificações apresentadas no capítulo 3.
- No Capítulo 6, **Testes e Análises**, são apresentados resultados obtidos dos diversos módulos do sistema e da operação conjunta dos mesmos. É feita também uma análise breve sobre o custo associado à implementação de um sistema como o proposto nesta dissertação.
- No Capítulo 7, **Conclusão**, são feitas considerações sobre o trabalho desenvolvido ao longo da pesquisa e desenvolvimento desta solução e são discutidas as evoluções futuras.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo pretende-se dar a conhecer aquilo que já existe no âmbito do controlo da irrigação em duas frentes:

- As soluções comerciais, explorando algumas marcas mais a fundo;
- Publicações científicas pertinentes para a presente dissertação.

2.1 Soluções Comerciais

Já existem no mercado inúmeras soluções comerciais que satisfazem algumas das necessidades descritas. Podem-se dividir os controladores existentes em dois grandes grupos:

- **Controladores programáveis;** são aqueles em que o utilizador define o momento e a duração da rega. Esta programação pode ter um período variável (diário, semanal, sazonal) mas será sempre baseada numa estimativa de necessidades locais e por isso sujeita a erros.
- **Controladores inteligentes;** estes não estão sujeitos a este tipo de erros pois tomam a decisão de quanto e quando regar baseados em informações recolhidas por sensores locais. Esta gama de controladores vai por vezes mais além e guarda um registo histórico das condições meteorológicas para melhorar o processo de tomada de decisão.

Como exemplos de marcas de controladores inteligentes citam-se a Rain Bird, Cyber Rain, Accurate WeatherSet, Gardena, Alex-Tronix e Hunter entre outras. As soluções propostas por estas marcas têm as suas diferenças, tais como a implementação e interacção com o utilizador mas todas têm em comum o facto de tomarem decisões com base em factores meteorológicos. Os preços variam consoante a tecnologia usada mas é expectável um gasto de algumas centenas de euros num controlador e sensores, aumentando até alguns milhares se o número de nós na rede controlada aumentar [17].

Nas sub-secções subsequentes aprofundar-se-ão as soluções comerciais das marcas referidas no parágrafo anterior.

2.1.1 Rain Bird

A Rain Bird é uma grande empresa de fabrico de equipamento de irrigação. Existe desde 1935 e possui mais de 130 patentes na área. Consegue apresentar soluções completas aos seus clientes baseando-se em toda a sua gama de produtos que se estende desde as válvulas até aos controladores inteligentes. Na sua gama de controladores pode-se encontrar o ET Manager™. Este é um controlador inteligente que faz uso de um sinal de rádio existente nos Estados Unidos de informação meteorológica para calcular a evapotranspiração. Quanto mais precisa for a informação recebida, melhor o valor calculado se adequará às necessidades locais. Com base nesse valor, tipicamente, decide diariamente qual a quantidade de água necessária ao terreno. Tem um custo de 676\$ na loja *online* da Rain Bird. Pode ser complementado com um medidor de pluviosidade - vendido separadamente - que ajusta o valor de evapotranspiração calculado pela medida de pluviosidade local.



Esta não é uma solução viável pois está dependente de um sinal que só existe nos EUA mas serve para demonstrar o conceito de informação meteorológica remota.

Como exemplo de um produto existente em Portugal pode-se citar o ESP-Modular que é um controlador programável ao qual se podem acrescentar sensores de humidade ou chuva, vendidos separadamente. Tem um custo de 128\$ no site da Rain Bird.

2.1.2 Cyber Rain

A Cyber Rain é uma empresa mais recente que data de 2005 e, ao contrário da Rain Bird, apenas contém na sua gama de produtos os controladores de rega. Os seus controladores inteligentes usam a Internet para obter informações meteorológicas. Comunicam com electroválvulas e podem ser ligados a sensores de caudal para monitorizar o gasto de água e sensores de chuva para um controlo mais preciso. O acesso à Internet é feito por um computador que deve estar ligado pelo menos uma vez por dia para fazer download da informação meteorológica ou através de um gateway, vendido separadamente. A comunicação entre o controlador e o computador é feita sem fios segundo o standard IEEE 802.15.4. O seu sistema de informação meteorológica também não funciona fora dos Estados Unidos.



2.1.3 Accurate WeatherSet

A Accurate WeatherSet já existe desde 1979 mas apenas começou a desenvolver controladores em 2000, iniciando a sua comercialização na segunda metade de 2001. As suas soluções estão mais viradas para o mercado residencial mas o conceito usado é aplicável em qualquer lugar. Usa apenas um sensor de radiação solar e um sensor de chuva para fazer um cálculo aproximado da evapotranspiração. Combinando estes dados com a programação do utilizador e o tipo de vegetação, o controlador pode tomar decisões automaticamente de quanto regar. O preço

deste tipo de controladores é de 240\$ para 8 saídas e pode subir até 960\$ para 48 [17]. O sensor de chuva e radiação é vendido separadamente e custa 50\$.

2.1.4 Gardena

Sediada na Alemanha, a Gardena é uma marca já estabelecida no mercado. Desde a sua criação em 1961 que comercializa ferramentas para jardins e actualmente pode oferecer soluções completas para tratamento de jardins. Como exemplo de um controlador inteligente, pode-se citar, da sua gama de produtos, o Water Computer C 1060 solar plus. Este controlador é ligado directamente à torneira e controla o fluxo de água de acordo com um método pré programado. A energia necessária para a sua operação é provida por um painel solar, instalado directamente no controlador. É possível adicionar ao controlador sensores de chuva e humidade do solo para uma operação ainda mais autónoma.



2.1.5 Alex-Tronix

A Alex-Tronix já existe desde 1977 e especializou-se em controladores inteligentes alimentados por baterias. O conceito aplicado pelos controladores da Alex-Tronix é bastante simples; em vez de usar estações meteorológicas caras ou ficar dependente de uma ligação externa para obter essa informação apenas necessita de dois dados: a latitude, de onde estima a radiação solar, e leituras de temperatura em tempo real. Usando um modelo de estimação de condições meteorológicas desenvolvido pela universidade de Oregon chamado PRISM¹, tem-se uma lógica de cálculo das necessidades de irrigação à qual chamam *Temperature Budgeting*. Segundo a Alex-Tronix, visto que apenas precisam de monitorizar um parâmetro - a temperatura - em vez de vários como no caso do cálculo da evapotranspiração, "*Temperature Budgeting is better because its simpler*".



2.1.6 Hunter

A Hunter Industries é uma outra grande empresa de fabrico de equipamento de irrigação que foi fundada em 1982. Tal como a Rain Bird pode fornecer uma solução completa aos seus clientes que vai além do simples controlador. Como exemplo, pode-se citar dentro da gama de produtos da Hunter, o ET System. Este recebe informações meteorológicas de uma estação instalada localmente e com elas toma decisões. É possível ainda programar localmente qual o tipo de vegetação, de solo e de aspersores para melhorar o processo de tomada de decisão. O preço do ET System é de 429\$ ao qual se tem de acrescentar o controlador que actua nas válvulas, cujo preço varia de 115\$ a 799\$ conforme o número de saídas [17].



¹PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model). www.prism.oregonstate.edu

2.2 Publicações Científicas

A irrigação é actualmente uma pedra basilar tanto na agricultura como na manutenção de espaços verdes. É portanto apenas natural que existam várias publicações científicas sobre o assunto.

Já em 2007 o artigo “*Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network*”, de Yunseop Kim *et al.*, explora a possibilidade de uma rede *ad hoc* Bluetooth ser a base de comunicações num sistema de controlo de rega para agricultura. Nele existem cinco sensores de campo, uma estação meteorológica, um actuador e uma central de controlo. Usa painéis solares para recarregar as baterias dos sensores de campo [26].

Em 2008 na Universidade de Ouro Preto no Brasil, Alan Kardek escreveu a sua tese de mestrado, “Desenvolvimento de um Sistema de Irrigação Automático”. Nela pode-se encontrar fundamentação para a necessidade de um controlo da humidade do solo e uma exposição de vários métodos para o fazer [20].

Também em 2008 o artigo “*Wireless Sensor Network Deployment for Water Use Efficiency in Irrigation*” de John McCulloch *et al.* aborda a necessidade de as pastagens deverem estar bem cuidadas de forma a o leite e derivados estarem na sua melhor qualidade. Usa uma malha de sensores em todo o campo para obter informação sobre a humidade do solo [10].

Ainda em 2008 no Brasil, na Universidade de Minas Gerais, Paulo Pinto apresenta a sua tese para pós-graduação em engenharia agrónoma, “Sistema de Automação do Irrigâmetro utilizando-se Instrumentos Digitais” onde se pode encontrar uma descrição de uma metodologia de cálculo da evapotranspiração [16].

Em 2009, na Universidade de Aveiro, a dissertação de mestrado de José Manuel dos Santos, “Sistema de controlo de Irrigação Baseado em Linguagem Java”, aborda a possibilidade de um sistema embutido programado em Java ser a base de um sistema de controlo de irrigação. Estuda ainda a possibilidade de as ligações aos sensores serem por um barramento *I-Wire* [19].

Também em 2009 o artigo “*A wireless design of low-cost irrigation system using ZigBee technology*” de Yiming Zhou *et al.* apresenta uma solução para o controlo da irrigação usando ZigBee. Usa uma rede em estrela para conseguir uma comunicação entre todos os nós. Afirma conseguir uma durabilidade de bateria de 2 anos [25].

Capítulo 3

Visão Panorâmica

É válido então perguntar neste momento se uma empreitada desta natureza não será reinventar a roda. Pode-se afirmar categoricamente que não, no sentido em que, apesar de qualquer solução apresentada fazer concorrência directa aos controladores já referidos, serão introduzidas algumas inovações tecnológicas que darão razão de ser a este projecto. A metodologia proposta diferenciar-se-á das soluções comerciais englobando todas as seguintes características:

- Aproximação do tipo *Add-On*, isto é, fazer uso dos componentes já no terreno, adicionando apenas uma camada de controlo;
- Mínima interferência com o terreno, conseguida através de comunicações sem fios com os sensores e actuadores;
- Ligação à Internet para:
 - Acesso remoto;
 - Recolha de informação meteorológica.

Será também diferenciado dos projectos e artigos científicos apresentados por ter uma abordagem mais voltada para espaços verdes do que para a agricultura apesar de anuir que os conceitos gerais usados são indiferentes à aplicação prática.

3.1 Pressupostos

Uma irrigação eficiente passará sempre por um planeamento cuidado de uma grande variedade de factores, como é a escolha do método de rega, seja ele aspersão, pivot, gota-a-gota ou outro. Esta dissertação pretende ser um primeiro passo em frente no desenvolvimento de um **sistema de controlo** de rega, e este tipo de factores não serão levados em conta no seu desenvolvimento.

Antes de mais é necessário conhecer o consumo de água no local a controlar. Isto é feito através de um sensor de caudal inserido na conduta de água. Este pode ser colocado em vários

locais, dependendo da granularidade de informação desejada. Caso se queira um controlo preciso de cada canal de rega, poder-se-á colocar um sensor de caudal junto de cada válvula. Esta solução, no entanto, aumentará muito o custo total do sistema. Há também a possibilidade de este sensor ser colocado num ponto de entrada da água na zona verde. Esta será a solução a explorar. De salientar que, se se tiver um conhecimento detalhado do sistema, da pressão na rede, dos dados das válvulas, do tempo de ataque, poder-se-á extrapolar o consumo de cada sector.

Para tomar uma decisão sobre quando e quanto regar é necessária a obtenção de informação sobre as condições meteorológicas locais, actualizadas e fiáveis. Há que diferenciar, no entanto, factores que, pela sua natureza, não têm uma variação espacial muito grande, tais como a pluviosidade e temperatura, de factores que podem variar muito e têm uma necessidade de uma monitorização mais localizada, como é, por exemplo, a humidade do solo. Pode-se afirmar com alguma dose de confiança que, se em Vila Nova de Gaia faz sol e estão 30°C, não estará a chover nos jardins do Palácio de Cristal. Por outro lado pode existir, nos jardins do Palácio de Cristal, um canteiro onde a humidade do solo indica que não há necessidade de rega porque, por exemplo, está numa depressão do terreno e foi regado no dia anterior.

Para efectuar comunicações entre um espaço verde ao ar livre e a Internet, a solução que fará mais sentido é a utilização das redes celulares que, apesar de não permitirem grandes larguras de banda, são adequadas para este tipo de aplicações.

Para a central de controlo comunicar com os sensores e actuadores existem duas possibilidades: comunicações cabladas e comunicações sem fios. Poder-se-ia recorrer a um qualquer protocolo de comunicações cabladas, como por exemplo CAN¹ [1] ou 1-Wire [2]. Para efectuar essas ligações é necessária a abertura de valas, quer na instalação do sistema, quer haja necessidade de o transladar. Uma instalação deste tipo fica ainda sujeita a um qualquer acidente de jardinagem que corte as comunicações. Alternativamente, as redes sem fios de área pessoal (WPAN²) de baixo custo energético são uma solução que contorna os inconvenientes inerentes às comunicações cabladas e será explorada nesta dissertação.

A ausência de fios que forneçam energia obriga a uma maior consciência sobre as necessidades energéticas de cada nó da rede sem fios visto que são alimentados por uma bateria.

Apesar de os sistemas embutidos modernos poderem até ser usados como um pequeno servidor, considera-se que neste caso particular fará sentido a existência de um servidor exterior ao sistema. Assim, apesar de se adicionar mais uma camada à solução final, esta permitirá que haja escalabilidade.

3.2 Recolha de Informação

O consumo de água é conhecido através de um caudalímetro. Os contadores convencionais disponibilizam a informação do gasto até ao momento num mostrador. Para poderem ser usados para monitorizar o consumo de água necessitam de ser acoplados a um dispositivo de

¹ *Controller area network*

² *Wireless Personal Area Network*

reconhecimento óptico de caracteres (OCR³) e um *datalogger*. Podem-se usar também contadores modernos com uma saída digital, acoplados a um *datalogger*. No entanto, visto que as necessidades de controlo do sistema exigem um microcontrolador, será mais simples o uso de um sensor de caudal emparelhado com o mesmo.

Como já foi referido, existe também a necessidade de conhecer as condições meteorológicas. A aproximação clássica a este problema é a instalação de uma estação meteorológica local. Apesar de esta ser uma boa solução, existe uma alternativa. Com a acessibilidade ubíqua que hoje em dia se pode ter à Internet, qualquer dispositivo pode ter acesso a uma miríade de informações que podem ajudar os seus objectivos. As condições meteorológicas são uma dessas informações e tem-se actualmente um acesso relativamente fácil a uma informação tanto histórica como de previsão das condições meteorológicas. Esta será a solução a explorar nesta dissertação. Há então a necessidade de cada local ter uma ligação à Internet para poder obter este tipo de informação e tomar a sua decisão.

Para informações que não se podem obter *online*, como por exemplo a humidade do solo, existirão sensores colocados em locais estratégicos que complementarão as informações meteorológicas. Trata-se assim de promover não a fusão sensorial mas sim a fusão de informação proveniente de vários subsistemas distintos.

3.3 Comunicações

3.3.1 Remotas

Para cada zona verde comunicar com a Internet, serão usadas as redes celulares. A tecnologia usada - GSM⁴, GPRS⁵, UTMS⁶, HSDPA⁷ - dependerá de vários factores como por exemplo o operador escolhido, cobertura, custos de ligação, facilidade de acesso ou mesmo a eficiência energética. Este não será um ponto de estudo nesta dissertação mas apenas se fará uso de um acesso à Internet para obter as informações necessárias. As redes celulares têm ainda uma característica operacional que pode ser usada para tornar o *deployment* deste tipo de sistemas mais expedito, nomeadamente a geolocalização. Através da medição da potência de sinal recebido das antenas mais próximas consegue-se obter informação da localização com um erro inferior a 100 metros que é mais que suficiente para se definir o local onde as informações meteorológicas devem ser centradas. A esta técnica chama-se LBS⁸ e o serviço associado é habitualmente disponibilizado pelos operadores por um custo um pouco superior ao da ligação.

³*Optical Character Recognition*

⁴*Global System for Mobile Communications*

⁵*General Packet Radio Service*

⁶*Universal Mobile Telecommunications System*

⁷*High-Speed Downlink Packet Access*

⁸*Location Based Service*

3.3.2 Locais

Como já foi referido, as comunicações locais entre a central de controlo e os sensores e actuadores serão sem fios. É necessária uma tecnologia de baixo custo energético e alcance médio. Protocolos baseados no *standard IEEE*⁹ 802.15.4 são os que se mais adequam às necessidades deste tipo de sistemas pois prevêm larguras de banda até 250 kbit/s e alcances de dezenas de metros¹⁰.

Cada WPAN terá um coordenador, onde estará o centro de tomada de decisão e o *gateway* para a Internet. Este coordenador será responsável por gerir a WPAN, recolher informações, tomar decisões e comunicar com um servidor. Além do coordenador existirão vários nós com uma de duas funções: nós sensores e nós actuadores. Numa primeira fase será usada uma topologia em estrela que pode posteriormente ser adaptada para uma topologia *mesh* se existir necessidade de estender o alcance do coordenador. Nesta segunda topologia poder-se-á dar funções de *router* a todos os nós, sendo o caminho para o coordenador escolhido dinamicamente, ou apenas a alguns nós em pontos estratégicos do terreno.

3.4 Energia

Não existe certeza de se poder contar com uma fonte de alimentação no terreno para suprir as necessidades energéticas do sistema. Assim, há a necessidade de se providenciar uma bateria em cada ponto. Os nós sensores e actuadores, se tiverem uma boa gestão da bateria, não precisam de nenhuma fonte adicional além da substituição da bateria a cada alguns meses ou mesmo anos. Deve ainda assim incluir-se um mecanismo de prevenção que lance um alarme para o utilizador caso o nível da bateria desça abaixo de um certo valor.

O coordenador, dadas as suas funções adicionais, tem indubitavelmente uma necessidade energética maior e é sensato incluir no seu *design* um mecanismo de recarregamento das baterias. A fonte de energia pode ser um painel solar, tecnologia já testada e com provas dadas das suas capacidades, ou mesmo um hidro-gerador introduzido na conduta.

3.5 Servidor

A inclusão de um servidor não é crítica num sistema desta natureza mas, no entanto, permite adicionar algumas características extra e dar um suporte para escalabilidade.

Este terá como funções principais a agregação da informação dos vários pontos de rega e a disponibilização da mesma a quem a queira consultar. Fará também detecção de falhas e permitirá ainda um controlo manual do sistema e programação das regras de controlo a qualquer dispositivo com um *browser* moderno. Será este servidor que terá a responsabilidade de obter, formatar e enviar para a unidade de controlo as informações meteorológicas.

⁹*Institute of Electrical and Electronics Engineers*

¹⁰O alcance é extremamente dependente da antena e da potência de transmissão

3.6 Especificações

O produto final deste projecto será constituído de três partes: Os nós, sensores e actuadores, o coordenador e o servidor.

3.6.1 Nós

Os nós devem ter as seguintes especificações:

- Estar instalado ao ar livre,
- Ter autonomia energética e
- Avisar o coordenador em caso de falha.
- No caso dos nós sensores:
 - Obter informação de humidade.
 - Enviar essa informação ao coordenador.
- E nos nós actuadores
 - Esperar ordens do coordenador e
 - abrir e fechar uma electroválvula.

3.6.2 Coordenador

O coordenador deve:

- Estar instalado ao ar livre e
- Ter autonomia energética.
- Monitorizar o caudal.
- Na rede local:
 - Recolher informação dos vários nós sensores
 - Tomar decisões de controlo
 - Enviar ordens aos nós actuadores
- Comunicando com o servidor
 - Obter informações meteorológicas
 - Enviar informações recolhidas
 - Avisar em caso de falha
 - Esperar ordens de alteração de parâmetros ou operação manual.

3.6.3 Servidor

Por fim, o servidor tem as seguintes funções:

- Recolher informação e fazer um registo histórico da mesma

- Obter e formatar informação meteorológica pertinente
- Criar uma interface de acesso (*front-end*) que permita ao utilizador
 - Aceder ao registo histórico da informação
 - Actuar manualmente nas electroválvulas.
 - Alterar parâmetros de controlo
- Avisar o utilizador em caso de falha.

3.7 Esquema Conceptual

A figura 3.1 apresenta um esquema conceptual do sistema de controlo. Nele podemos ver os nós sensores e actuadores e o coordenador, que comunica com um servidor ao qual o utilizador acede.

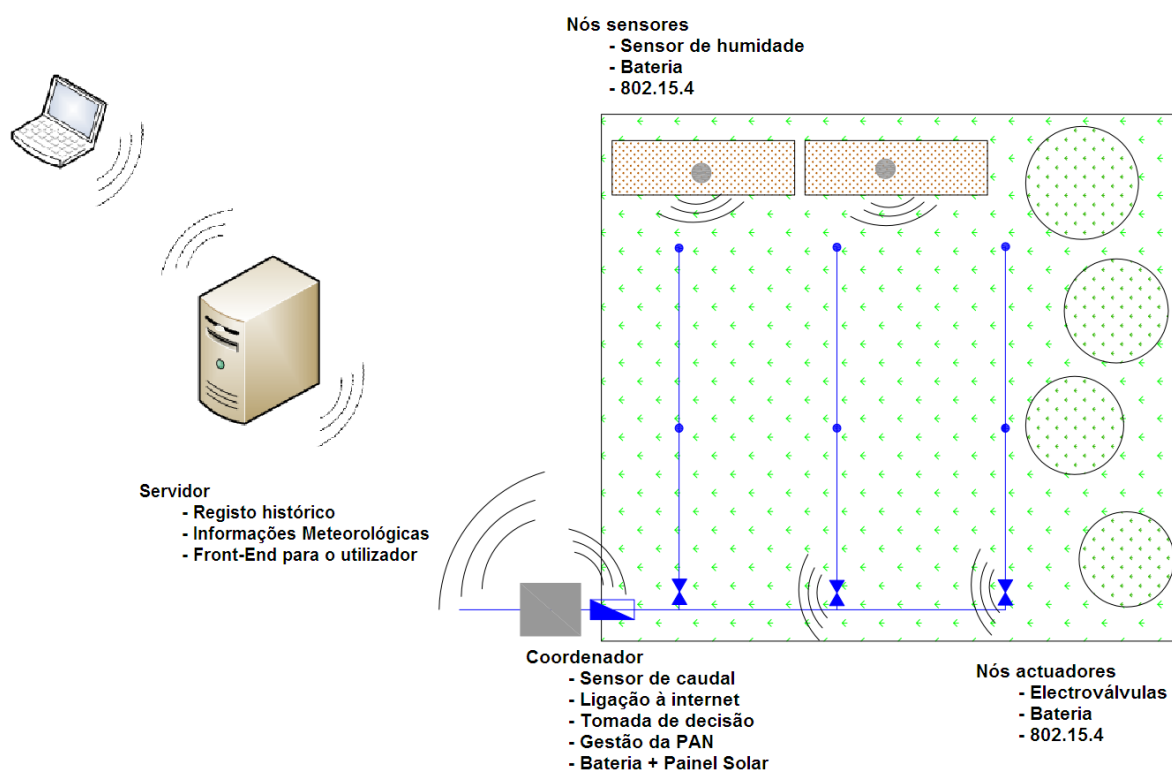


Figura 3.1: Esquema conceptual do Sistema de Controlo de Rega

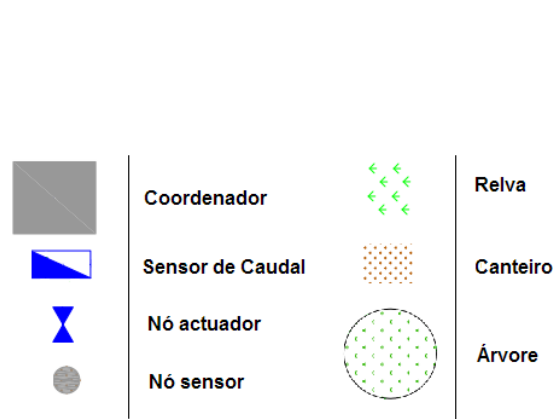


Figura 3.2: Legenda dos Esquemas

3.8 Testes

Para garantir que todas as especificações são cumpridas foram planeados alguns testes. Em primeiro lugar devem-se testar os sensores, confirmando que as leituras feitas correspondem à realidade. Devem-se testar o sensor de humidade e o sensor de caudal. A conectividade entre os nós e o coordenador deve ser também verificada através da recolha de dados de humidade do solo e actuação remota nas electroválvulas. É importante testar ainda a autonomia dos nós actuadores.

Deve ainda ser testada a ligação de dados entre o servidor e o coordenador através da transferência de mensagens. Estas mensagens devem ser guardadas no servidor, pois este tem como uma das suas funções o registo histórico dos dados. Estando esta ligação implementada, poder-se-á verificar a capacidade de obtenção de dados meteorológicos por parte do coordenador através do servidor e ainda a operação manual das electroválvulas pelo servidor.

Por fim deverá ser testada a capacidade do sistema tomar decisões, dando-lhe informações que conduzam a um determinado comportamento. Os testes realizados serão apresentados no capítulo 6

Capítulo 4

Ferramentas de Suporte

Neste capítulo serão apresentadas as ferramentas utilizadas para suportar as soluções para os requisitos apontados no capítulo anterior. Esta descrição iniciará-se pelos módulos de desenvolvimento **mXS4**, **uMRF** e **XT65**, seguida pelas ferramentas de software, nomeadamente o **FreeRTOS** e o **JavaME**. Por fim será descrita a solução usada para o desenvolvimento de um servidor, não antes de se apresentarem os sensores de humidade e caudal, bem como a electroválvula usada neste projecto.

4.1 Módulos de desenvolvimento mXS4, uMRF e XT65

Os módulos mXS4 e uMRF, desenvolvidos pela **Micro I/O**, foram os alicerces, sobre os quais foi feita toda a construção deste projecto. Neles pode-se encontrar um microprocessador programável com portas digitais e analógicas, às quais o acesso é facilitado por *slots* de expansão.

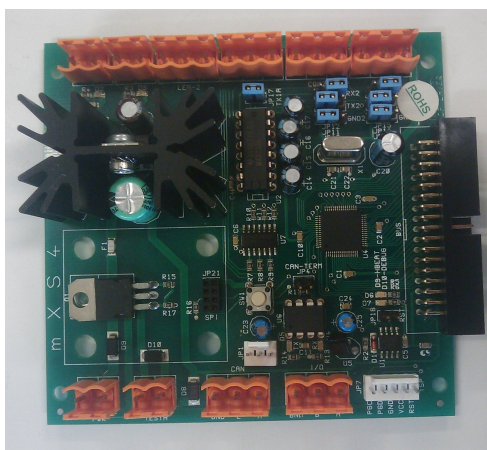


Figura 4.1: O módulo mXS4

O módulo mXS4 requer uma fonte de alimentação de 12V e comporta um dsPIC30f onde são ligados todos os outros componentes. Disponibiliza fácil acesso a duas portas série e a um

barramento CAN. Para uma fácil programação foi-lhe instalado um carregador de programas (*bootloader*)¹.

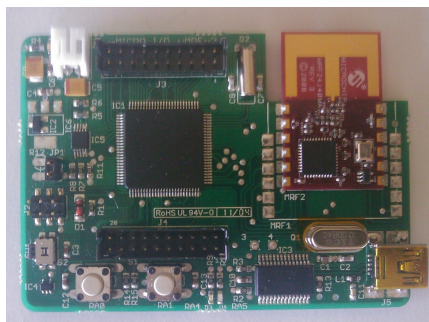


Figura 4.2: O módulo uMRF

O módulo uMRF requer uma fonte de alimentação de 3,3V e integra um dsPIC33FJ. Foi-lhe também instalado um *bootloader*². Disponibiliza uma porta USB³ que serve tanto para comunicar com o *bootloader* como para alimentar o módulo e carregar uma bateria. Este módulo

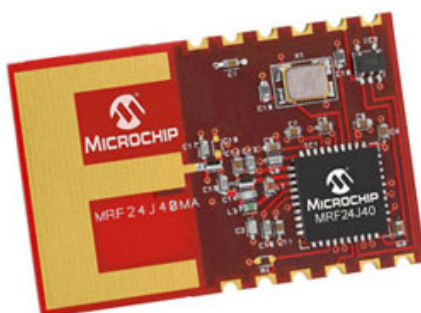


Figura 4.3: O módulo MRF24J40MA

incorpora um transceptor rádio, certificado para o *standart* 2,4 GHz IEEE 802.15.4, o circuito integrado MRF24J40. Serve de base para protocolos como ZigBee™, MiWi™ ou WirelessHart. Este módulo é ideal para comunicações sem fios em pequenos sistemas embutidos devido ao seu baixo consumo energético: 18 mA em recepção, 22 mA em transmissão e 2 μ A em *Sleep mode* [13]. Com este módulo, a **Micro I/O** disponibilizou um conjunto de primitivas em C para acesso à camada MAC, que foi usado para a construção do protocolo de endereçamento na rede local.

O módulo de comunicações celulares usado foi o cinterion XT65. Usa uma alimentação de 3,3V a 4,5V. Tem um processador ARM Blackfin© com memória flash. O modem está preparado para trabalhar nas bandas de 850, 900, 1800 e 1900 MHz e suporta comunicações

¹Tiny Bootloader [23]

²ds30 Loader [6]

³Universal Serial Bus

de dados GPRS *Multislot Class 12* o que se traduz numa taxa de transferência máxima de 86 kbps. A interação com o modem é feita por comandos AT e inclui uma *stack* TCP/IPv4. A programação é feita em Java. Permite actualizações de *firmware over-the-air*.

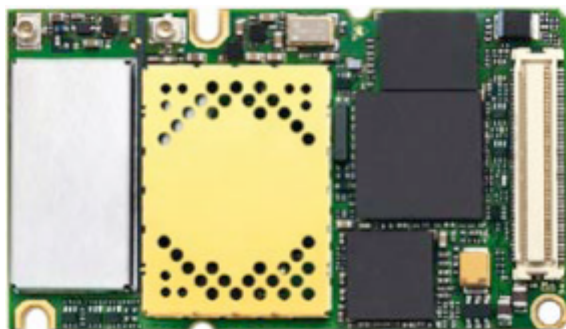


Figura 4.4: O módulo XT65

Inclui ainda um módulo GPS⁴ que não será usado neste projecto. O seu consumo energético é de 50 μ A quando desligado, 4,5 mA em *Sleep mode* e até 600 mA quando em transferências GPRS.

4.2 FreeRTOS

Nos módulos mXS4 e uMRF foi usado como base de desenvolvimento, um *kernel open source*, direccionado a sistemas embutidos, construído em C, o **FreeRTOS**. Em sistemas embutidos há usualmente requisitos de tempo real que têm uma janela temporal bastante estreita na qual devem ser executadas tarefas específicas.



Existem dois tipos de requisitos temporais, que normalmente são designados por *Soft* e *Hard*. Os requisitos de tempo real do tipo *Soft* são aqueles que, apesar de terem um prazo, não são críticos para o sistema e um pequeno atraso pode tornar o sistema irresponsivo mas não compromete a integridade nem a utilidade do mesmo, como por exemplo o tempo de resposta de um ecrã. Os requisitos do tipo *Hard* são críticos para o sistema e o não cumprimento dos prazos estipulados resulta na falha do sistema, como por exemplo a abertura do *airbag* num automóvel [9].

O **FreeRTOS** é um **kernel** de tempo real que permite definir e escalonar tarefas com funcionalidades específicas que concorrem para o processador, tendo cada uma a sua prioridade. Esta prioridade, quando bem implementada, faz com que tarefas críticas tenham acesso privilegiado ao processador em detrimento de tarefas que admitem atrasos na sua execução. Com este mecanismo, pode-se adoptar uma lógica virada para a tarefa, em vez de se ter de construir um código sequencial que muitas vezes não dá garantias temporais.

O **FreeRTOS** tem também uma camada de abstracção temporal pois inclui o seu próprio relógio interno que, com programação adequada, é independente da frequência de relógio do

⁴*Global Positioning System*

CPU⁵. Inclui ainda mecanismos de comunicação e sincronização entre tarefas tais como filas de espera, semáforos e *mutexes*. Apesar de um sistema de irrigação não ter tarefas que, quando não executadas no prazo definido, comprometam a integridade do sistema, esta modularização das tarefas, abstração temporal e mecanismos de sincronização tornam o desenvolvimento do software mais simples e independente da arquitectura.

O *core* do **FreeRTOS** é formado fundamentalmente por três ficheiros de código fonte, nomeadamente o `list.c`, o `task.c` e o `queue.c` e vários ficheiros de cabeçalho. O `list.c` é usado internamente pelo escalonador de tarefas mas está disponível para o utilizador criar e usar listas ligadas. O `task.c` é o ficheiro mais importante pois é nele que estão definidos os métodos de criação, destruição e calendarização das tarefas. O `queue.c` é usado para criar filas de espera, por onde as tarefas podem comunicar entre si. Um outro ficheiro que vale a pena referir é o `semphr.h` que não é mais que um conjunto de macros que fazem uso dos métodos definidos em `queue.c` para criar semáforos e *mutexes* que, na prática, são filas de espera com um elemento de tamanho zero.

As tarefas criadas podem estar num de dois estados fundamentais; o activo e o inactivo. Apenas uma tarefa pode estar no estado activo a cada instante, visto que só existe um processador. Quando no estado inactivo, a tarefa está pronta para ser executada necessitando apenas de ser repostado o seu contexto, guardado previamente pelo *kernel*. A criação de tarefas passa pela construção de uma função com um protótipo específico, nomeadamente a inclusão de um único parâmetro, um ponteiro para `void`, e que não retorna nada. Esta função contém um ciclo infinito que determina o comportamento da tarefa. Não existe limite de software para o número de tarefas que podem concorrer para o processador.

Uma das principais funções da API⁶ da gestão de tarefas é a `xTaskCreate()` que cria a tarefa e a coloca no estado inactivo, pronta para ser executada. Com esta função define-se o tamanho da *stack* e a prioridade da mesma. Depois de criadas as tarefas, o escalonador é lançado e inicia-se a vida normal da aplicação.

Para evitar que todas as tarefas concorram para o processador, é possível bloqueá-las por algum tempo, esperando um de dois tipos de eventos: eventos temporais e eventos de sincronização. Uma tarefa pode estar no estado bloqueado esperando um certo período passar ou atingir um momento específico no tempo, e pode bloquear esperando um sinal de outra tarefa ou interrupção. Para este efeito são usadas as filas de espera e os semáforos.

Em conjunto com as tarefas, concorrem para o processador as rotinas de serviço à interrupção. Estas, quando usadas correctamente, tornam o sistema mais eficiente pois podem fazê-lo orientado ao evento. Se assim o for, todas as tarefas que esperam um evento podem estar bloqueadas esperando um sinal de uma RSI⁷ que as leve a voltar a concorrer ao processador.

Toda esta descrição é independente da arquitectura mas é necessário fazer o **FreeRTOS** comunicar com o hardware. Isto é bastante facilitado pelo facto de o **FreeRTOS** ter uma comunidade activa que aumenta e melhora a gama de hardware suportado. Ao código que faz a ligação entre o *core* e o hardware é dado o nome de *Port* e felizmente já existe para os PICs em questão

⁵Central Processing Unit

⁶Application programming interface

⁷Rotina de Serviço à Interrupção

e não é necessário criá-lo de raiz.

Uma outra vantagem do **FreeRTOS**, que não deve ser desprezada, é a possibilidade de criar uma tarefa que tem a prioridade mínima e que apenas é executada quando não há nenhuma outra tarefa que precise de usar o processador. Dada a necessidade de os módulos consumirem o mínimo de energia, esta tarefa pode ser usada para colocar o processador num modo de *low power*.

4.3 Java ME

No módulo XT65, a solução de software foi construída em em Java, mais especificamente na plataforma *Micro Edition* do Java, desenvolvida para sistemas embutidos tal como são os telefones móveis. Existem cerca de 3 mil milhões de dispositivos com suporte para esta plataforma [3], e pode-se afirmar que é uma tecnologia com provas dadas das suas potencialidades.

A API usada para desenvolvimento no módulo XT65 foi a *Mobile Information Device Profile* (MIDP), que restringe as bibliotecas Java áquelas que são úteis e suportadas em dispositivos móveis. As aplicações criadas com esta API são designadas por **MIDlets**. A classe principal da aplicação tem de implementar três métodos, o `startApp()` que define o comportamento da aplicação em si e é invocado aquando da sua criação, o `pauseApp()`, que é invocado quando a aplicação já foi criada mas quer passar a um estado inactivo, e o `destroyApp()`, que termina a aplicação e indica que está pronta para ser eliminada da memória.

Os **MIDlets**, quando para *deployment*, são encapsulados em dois ficheiros, um `.jar` e um `.jad`. O `.jar` contém a aplicação propriamente enquanto que o `.jad` consiste em meta-informação acerca dos vários **MIDlets** que possam existir. Para as actualizações de *firmware over-the-air* que foi referido na secção 4.1 é necessário que estes dois ficheiros estejam num servidor acessível pelo dispositivo para serem transferidos por HTTP.

4.4 Sensores

Neste projecto foram usados dois tipos de sensores, um sensor de humidade do solo, para um melhor controlo das necessidades de rega, e um sensor de caudal, para conhecer detalhadamente os consumos de água de cada zona controlada.

4.4.1 Sensor de Humidade do Solo

Existem várias escolhas possíveis para efectuar uma leitura da humidade do solo; sensores resistivos, tensiómetros, sondas de neutrões, TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) [19] [20] entre outros. Nesta dissertação foi usado um sensor resistivo mas antes apresentar-se-ão as outras tecnologias.

Tensiómetros

Este tipo de sensor consiste num tubo sólido, com água no interior, que tem numa extremidade um medidor de vácuo e noutra uma peça porosa. Quando em contacto com o solo, a pressão dentro do tubo varia quando a extremidade porosa liberta água tentando encontrar um equilíbrio de humidade com o solo, o que é registado pelo medidor de vácuo. Os tensiómetros medem a humidade independentemente da salinidade e da presença de fertilizantes no solo apesar de serem pouco exactos em solos muito secos. Requerem manutenção, preenchendo o tubo com líquido para evitar que a peça porosa perca a integridade física por secar demasiado.



Figura 4.5: Tensiómetro

Sondas de neutrões

As sondas de neutrões funcionam segundo um princípio bastante simples; De uma fonte emissora são disparados neutrões altamente energéticos - muito rápidos - aos quais podem ocorrer quatro diferentes eventos:

- Nada. O neutrão segue o seu rumo sem qualquer interferência.
- Uma colisão elástica. Há uma colisão mas a maioria da energia continua no neutrão. Isto sucede em encontros com elementos como o Sódio, Alumínio ou Fósforo.
- Absorção. O neutrão é absorvido pelo elemento que liberta um fóton. Esta situação ocorre em contacto com elementos como o Boro ou Cádmio.
- Colisão inelástica. Nesta colisão o neutrão perde energia e desacelera. Isto dá-se em colisões com elementos como o Hidrogénio.

Partindo do pressuposto que a maioria do Hidrogénio no solo está na água que ele contém, a partir de um detector de neutrões 'lentos' pode-se inferir o conteúdo de água do solo. Este tipo de leitura tem a vantagem de ser imediata, podendo-se fazer várias leituras. A utilização deste tipo de sensores não é trivial pois requer uma calibração que tenha em conta todos os efeitos acima referidos. Sensores desta natureza podem atingir preços de 10.000 USD [14]

TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo)

Esta tecnologia baseia-se no facto da velocidade de propagação de uma onda electromagnética ser dependente do meio em que se encontra. Uma onda com uma frequência na ordem dos gigahertz é enviada por dois guias de onda paralelos e um microcontrolador mede o tempo de propagação, inferindo daí a constante dielétrica do solo, de onde se pode estimar o conteúdo de água. Este tipo de sensores, tal como as sondas de neutrões, também permite uma leitura rápida da humidade do solo. Tem ainda a vantagem de poder ser usado noutros tipos de materiais além do solo.

Resistivos

Os sensores resistivos baseiam-se no facto de a condutividade de um bloco de gesso⁸ ser dependente do potencial hídrico do solo. Um sensor de humidade do solo resistivo típico consiste em dois eléctrodos separados por um meio condutor. No limite poder-se-ia introduzir os eléctrodos directamente no solo, medindo então a condutividade. Esta abordagem é menos usada pois tem o inconveniente de ser muito sensível à presença de fertilizantes ou sais no solo e também de diferenças no espaçamento dos eléctrodos [18].



Figura 4.6: Sensor de Humidade Watermark

Se o meio condutor for conhecido e relativamente imune a estes factores evitam-se estes problemas. Em contacto com o solo, os blocos de gesso tendem a encontrar um estado de equilíbrio absorvendo ou libertando água, alterando assim a sua condutividade e consequentemente a sua impedância. Assim, a humidade do solo pode ser medida indirectamente pela leitura da resistência eléctrica do bloco de gesso apesar deste não ser um elemento resistivo ideal mas sim um conjunto de resistências e condensadores. Não se pode usar uma excitação DC pois esta iria causar uma electrólise. Como resultado da electrólise formar-se-iam bolhas na superfície dos eléctrodos o que reduziria a área efectiva dos mesmos comprometendo a medida de impedância.

⁸Na verdade é uma matriz granulosa que pode conter gesso

Para fazer a leitura da resistência é necessário um circuito que forneça a a excitação AC necessária e que faça a leitura da resistência. Essa solução está apresentada no capítulo 5.

4.4.2 Sensor de caudal

Para conhecer o consumo de água é necessário o uso de sensores de caudal, também conhecidos como caudalímetros. O sensor escolhido para este projecto foi um Kobold DRS com saída em impulsos. Este consiste numa pequena turbina cujo movimento, causado pelo fluxo de água, é detectado por ímanes, sem necessidade de contacto físico e convertido num sinal com a informação de caudal na frequência. Essa frequência é directamente proporcional à velocidade do escoamento.



Figura 4.7: Caudalímetro Kobold DRS

Este sensor tem uma gama de medida de caudal de 2 a 40 litros por minuto e ao caudal máximo a frequência de saída é 352Hz. Se o valor medido for inferior a 2L/min ou superior a 40L/min não se pode considerar a medição fiável.

4.5 Electroválvulas

Em qualquer sistema de controlo existem sensores e actuadores. No caso de um sistema de controlo de irrigação o único actuador é a válvula que abre e fecha a conduta de água. Pode-se afirmar que é um actuador do tipo ON/OFF e que a única variável é o momento em que se abre e fecha a válvula. São dispositivos complexos mas compreendem sempre um circuito magnético em que uma bobina movimenta um núcleo que depois actua em todo o mecanismo da válvula [11]. Existem fundamentalmente três modos de operação numa electroválvula:

- As Electroválvulas **AC** precisam de corrente alterna para comutar o seu estado. Têm um estado por defeito - normalmente fechadas - e quando é aplicada uma corrente AC na bobina, o movimento do núcleo força a válvula a abrir.
- As Electroválvulas **DC** têm um funcionamento idêntico às electroválvulas AC mas funcionam com corrente contínua.
- As Electroválvulas **por pulso** mudam de estado quando sujeitas a um pulso. Dependendo da polaridade do pulso, a válvula irá abrir ou fechar. Estas possuem um íman permanente que mantém a válvula aberta mesmo depois do pulso terminar. São as mais indicadas num sistema em que a eficiência energética é importante visto que só necessitam de excitação para comutar de estado.

As electroválvulas usadas⁹ requerem um pulso de cerca de 9 volts para comutar de estado.



Figura 4.8: Electroválvula por pulso Hunter

4.6 Servidor

Não foi possível, ao longo do tempo de concretização deste projecto, a disponibilização de um servidor para executar as tarefas definidas na secção 3.5. Este teria sido bastante útil pois dentro da rede universidade não é possível abrir portos para comunicações TCP/IP com facilidade. Assim, para poder abrir uma via de comunicação entre o módulo XT65 e um computador dentro da universidade, foi usada uma placa de dados de comunicações celulares ligada a um computador, o qual executa o software desenvolvido para o servidor. Esta abordagem foi a melhor solução encontrada para este problema e tem apenas a desvantagem de se ter de reprogramar o módulo XT65 cada vez que o IP da placa de dados muda.

Este servidor foi desenvolvido em Java e pode por isso correr em qualquer plataforma que possua uma *Java Virtual Machine*, sendo que não foi um esforço inútil a adopção desta solução temporária.

⁹Hunter DC latching solenoid

Capítulo 5

Soluções Tecnológicas

Neste capítulo serão apresentadas as soluções tecnológicas encontradas para satisfazer as especificações propostas no capítulo 3, bem como as configurações necessárias ao material descrito no capítulo anterior. Em primeiro lugar será feita uma descrição funcional do sistema em que se tornarão conhecidas as ferramentas de suporte usadas em cada bloco funcional. Seguidamente será feita uma descrição mais detalhada de cada bloco, numa aproximação *top-down*. Essa descrição iniciar-se-á pelo servidor e pelo protocolo desenvolvido para comunicações remotas, protocolo esse que se originou de uma colaboração com o aluno de mestrado João Carlos Bastos Portela, que usou na sua dissertação de mestrado, Modelação e “Controlo de um Sistema de Aquecimento Solar Térmico”, uma metodologia semelhante para efectuar comunicações entre um servidor e um controlador térmico solar. Será feita uma descrição do controlador desenvolvido, em termos de *hardware* e *software*, bem como a seguida da apresentação do modelo de endereçamento usado para a rede local. A calibração e modo de utilização dos sensores de caudal e humidade, bem como o *hardware* e *software* desenvolvidos para o uso dos mesmos também têm lugar neste capítulo, que será encerrado pela apresentação do sistema desenvolvido para a actuação remota nas electroválvulas.

5.1 Descrição Funcional

Para se obter uma visão global do sistema implementado, revisita-se nesta secção o esquema apresentado na secção 3.7, desta feita, indicando as ferramentas de suporte usadas em cada bloco funcional. Como se pode observar na figura 5.1, o sistema tem à cabeça um servidor[5.2] que não é mais que um computador ligado a uma placa de dados que usa as redes celulares para uma ligação à Internet via GPRS. Este abre um canal de comunicações por um *socket*, ao qual o controlador se liga, também via GPRS, usando o módulo XT65.

O controlador é constituído pelos módulos XT65 e uMRF e inclui o sensor de caudal Kobold. Para os dois módulos comunicarem entre si é usado um protocolo série, RS232.

Por fim, pode-se verificar que os nós sensores e actuadores são formados pela conjugação do módulo uMRF com o sensor de humidade do solo da Watermark, no caso dos nós sensores, e com as electroválvulas Hunter, no caso dos nós actuadores.

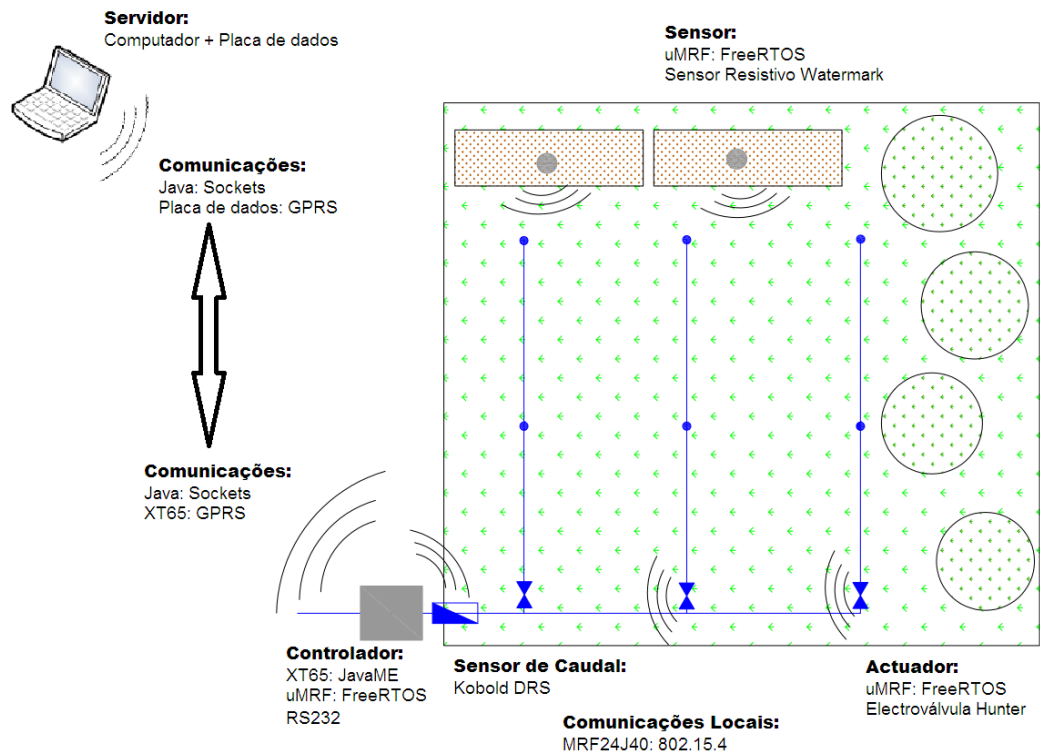


Figura 5.1: Esquema Funcional

As comunicações locais são conseguidas através do módulo MRF24J40MA, incorporado nos módulos uMRF, usando o mecanismo de endereçamento descrito na secção 5.6

5.2 Servidor

A comunicação entre o terreno e o servidor é feita por *sockets* [4]. Ao abrir um *socket* para comunicações, espera clientes criando uma nova *thread* [5] de execução para cada cliente. Este, ao ligar-se, tem que se identificar, validando assim o canal de comunicação. Para garantir que o canal permanece aberto, é trocada uma mensagem periódica que avisa que o cliente ainda está ligado. Com o canal de comunicação aberto, o servidor aguarda instruções de uma de duas fontes: do cliente validado ou do utilizador.

O utilizador pode efectuar duas acções distintas, nomeadamente, a operação manual, abrindo e fechando as electroválvulas, e a alteração de parâmetros, estando implementada concretamente a alteração do tempo de rega. O controlador pode enviar mensagens informativas ou alertas que são apresentados prontamente, ou fazer um pedido de informações meteorológicas. Este pedido, que pode ser acerca do dia actual ou até dois dias no futuro, dispara uma ação de recolha e formatação de dados meteorológicos. Estes são então transmitidos para o cliente numa sequência de caracteres de tamanho e formatação fixos para um tratamento local. Existe um registo de todas

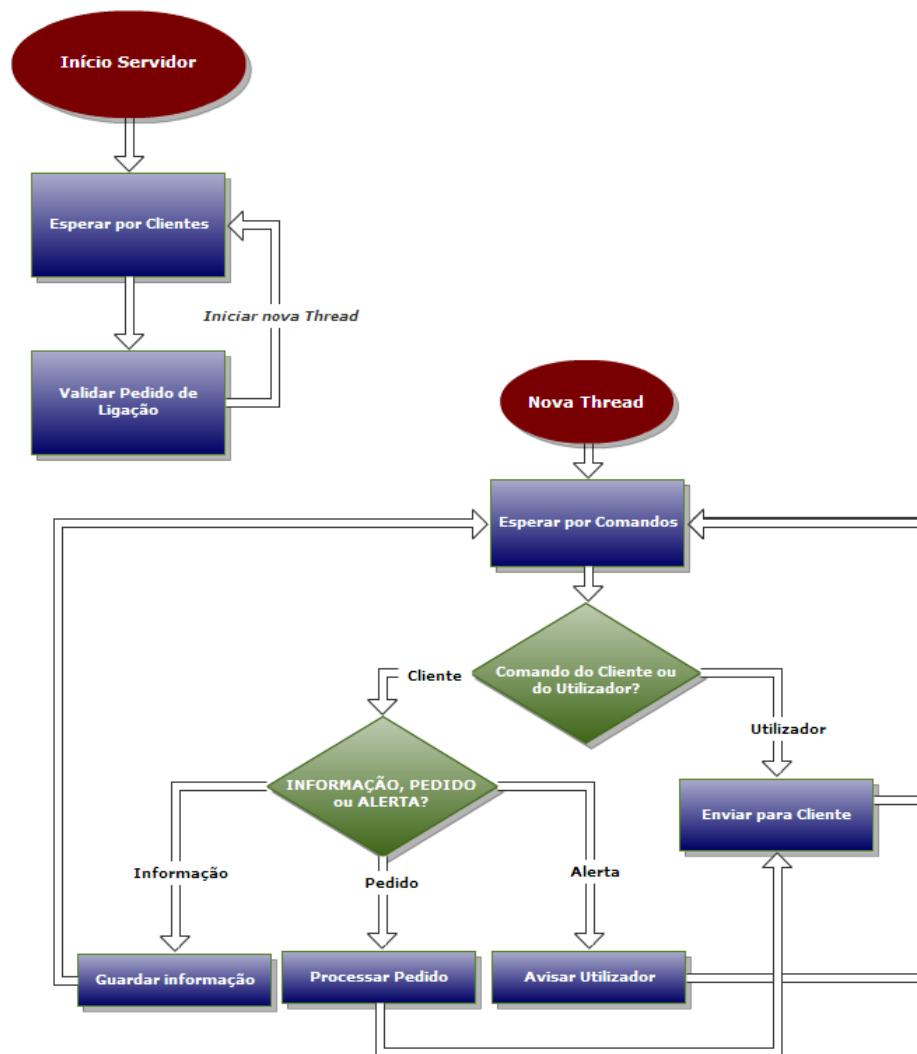


Figura 5.2: Esquema lógico do comportamento do servidor

as mensagens de cada cliente, guardado num ficheiro de texto.

A fonte de dados usada foi um site Norueguês [12] que disponibiliza gratuitamente informações meteorológicas já num formato de fácil leitura, um documento XML¹. Este providencia informações de quatro períodos diários com dados de temperatura, pluviosidade, pressão atmosférica e vento, além da hora do nascer e pôr do sol. Os dados que são transmitidos para o cliente são a temperatura, pluviosidade e hora dos nascer e pôr do sol, sendo que é trivial estender para os outros conteúdos.

O XML é uma recomendação do W3² para formatação de texto. Esse formato tem como objectivo ser passível de leitura por software. O Java inclui nas suas bibliotecas APIs de leitura

¹Extensible Markup Language

²World Wide Web Consortium

de XML, o que simplificou bastante o processo de recolha e formatação de informação meteorológica. As duas principais candidatas foram a SAX, *Simple API for XML* e a DOM, *Document Object Model*. São duas filosofias completamente diferentes. A SAX lê todo o documento XML e vai chamando métodos programados pelo utilizador quando são encontrados determinados elementos. A DOM cria uma estrutura de dados em árvore que contém todos os elementos do documento XML sendo depois disponibilizados métodos para os encontrar. Qualquer uma das filosofias é válida, sendo que pode haver melhor eficiência numa em detrimento de outra para objetivos específicos. Neste caso foi uma decisão meramente baseada em preferência pessoal. Os elementos escolhidos são então encontrados pela DOM e serializados em texto num formato de posições fixas para uma fácil leitura pelo coordenador.

A interface com o utilizador é feita por linha de comandos. Ao iniciar o servidor, este apresenta uma mensagem de boas vindas e pede que o utilizador escolha um cliente para receber os seus comandos através da introdução de um número. Caso o cliente escolhido não esteja ligado, esse facto é comunicado ao utilizador, caso contrário é apresentada uma lista de comandos para enviar ao cliente que contém a actuação manual, a abertura e fecho das electroválvulas, e a alteração do tempo de rega.

5.3 Comunicações Remotas

Foi implementado um protocolo de transferência de mensagens e de validação do pedido de ligação. Foi definida uma trama que permite verificar a integridade dos dados, diferenciar tipos de mensagens e ignorar mensagens que não estejam formatadas segundo essa estrutura. O esqueleto inicia-se com um byte de identificação de início de trama (SOH) seguido de um byte que identifica a origem da mensagem (SRC) que é zero no caso de ter a sua origem no servidor. O byte seguinte define o tamanho do campo de dados da mensagem (LEN), com o qual se pode verificar a integridade da mesma. Segue-se um byte com o tipo de mensagem (TYPE) que pode ser um comando (CMD), uma identificação (ID), um alerta (ALERT) ou uma informação genérica (INFO). Finalmente o campo de dados (PAYLOAD) seguido de um byte de fim de trama (EOT).



Figura 5.3: Esqueleto da trama

Antes de começar a troca de mensagens, o coordenador deve-se identificar, como já foi referido. Fá-lo enviando uma mensagem do tipo ID com um conteúdo específico, reconhecido pelo servidor. Estando o canal de comunicação aberto podem ser transferidas as mensagens necessárias.

5.4 Controlador

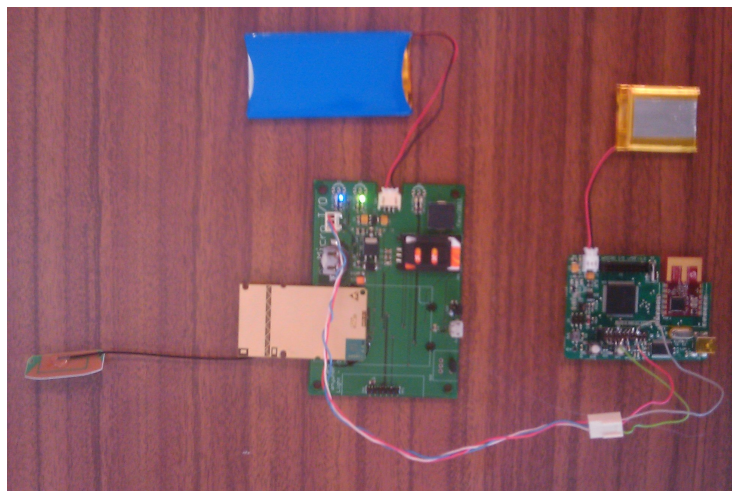


Figura 5.4: Controlador: XT65 e uMRF

O controlador desenvolvido comporta dois módulos, o XT65 e o uMRF, sendo o primeiro necessário para as comunicações remotas e o segundo para as locais. Comunicam por um barramento série do tipo RS232. Assim sendo, é possível dividir as tarefas em duas partes complementares. O módulo XT65 tem a incumbência de se ligar ao servidor, e manter essa ligação aberta, enviando periodicamente uma mensagem que informa o servidor que ainda está ligado. É este módulo que é a parte inteligente do sistema, pedindo as informações meteorológicas ao servidor, e tomando as decisões de controlo. Faz ainda de *buffer* entre a rede local e o servidor, fazendo cache dos dados recolhidos pelos sensores. Os três tipos de mensagens enviadas para o servidor são os pedidos de informação meteorológica, efectuados quando necessário, as informações genéricas, dados dos sensores, que são enviadas a uma taxa constante, que permite “empacotar” vários dados na mesma transmissão, diminuindo o “overhead”, e os alertas que são retransmitidos assim que são detectados. O módulo uMRF tem apenas a função de gerir a rede local implementando o mecanismo de endereçamento descrito na secção 5.6 e fazendo de ponte entre o módulo XT65 e os nós da rede. Caso haja um dos sensores que deixou de responder ou alerte para o facto de ter pouca bateria essa informação é tratada pelo módulo XT65.

5.4.1 Controlo

Neste componente do sistema foram implementadas algumas regras de controlo simples. Em primeiro lugar, uma vez por dia, ao início do dia, o controlador pede informações meteorológicas onde encontrará a hora do nascer e pôr do sol, temperatura e quantidade de chuva do próprio dia. Segundo um parâmetro configurável, a rega será feita uma vez por dia antes do nascer do sol ou depois do pôr do sol ou duas vezes por dia, nos dois períodos. O tempo de rega é também configurável e definido em minutos. Caso a precipitação exceda um certo valor, também configurável, a rega não será feita.

Com base nas leituras de humidade pode-se decidir se há a necessidade de regar contornando as regras definidas. Uma possibilidade é a proposta pela própria Watermark [21]:

- 0 a 10 centibares → solo saturado.
- 10 a 30 centibares → solo com humidade suficiente. Só nos solos de areia grossa é que se pode considerar que estão a começar a secar.
- 30 a 60 centibares → margem normal para se iniciar a rega, excepto em solos muito argilosos.
- 60 a 80 centibares → margem normal para se iniciar a rega em solos muito argilosos.
- 80+ centibares → o solo está a secar perigosamente.

Foi incluída ainda uma regra que impede a rega caso a humidade seja ainda suficiente, isto é, abaixo dos 30 centibares. De uma forma mais directa, o mecanismo de rega no XT65 testa os parâmetros segundo esta ordem:

- Hora do dia. Enquanto não for a hora pré determinada a rega não é feita.
- Quantidade de chuva. Caso exceda o valor escolhido a rega não é feita.
- Humidade do Solo. Caso o solo ainda tenha humidade suficiente, a rega não é feita.

Caso todas as condições sejam satisfeitas é enviada uma mensagem para o uMRF, indicando que as válvulas devem ser abertas e permanecer abertas pelo período escolhido.

5.4.2 Software

Tal como o hardware, também o software desenvolvido para o coordenador está dividido em duas partes complementares. A primeira no XT65, desenvolvida em JavaME que comunica com a segunda, desenvolvida em C, usando o FreeRTOS, por RS232.

XT65

Como já foi mencionado, esta é a parte inteligente do sistema. Tem o seguinte comportamento:

Ao iniciar, tenta ligar-se ao módulo uMRF, abrindo uma nova comunicação série que o módulo uMRF deve validar por um mecanismo idêntico à validação do coordenador no servidor. De seguida, por um comando AT, é introduzido o PIN³ do cartão em uso. Finalmente, é feita a ligação ao servidor por um *socket* e validado o canal de comunicação pelo mecanismo já descrito.

São então iniciadas duas tarefas periódicas, uma para efectuar o pedido de informações meteorológicas ao início do dia e outra para decidir se há a necessidade de rega. Infelizmente não é possível re-calendarizar uma tarefa periódica no Java. Assim, a tarefa que decide se se vai regar é iniciada uma vez por minuto, sendo que a primeira verificação é se a hora actual corresponde

³Personal Identification Number

à hora definida para a rega. Caso todas as verificações para a rega sejam satisfeitas é enviada uma mensagem para o módulo uMRF com uma ordem para abrir as válvulas por um tempo determinado.

A aplicação entra finalmente num ciclo infinito em que verifica a existência de mensagens quer do servidor, quer do uMRF. As mensagens do servidor podem ser ordens para abrir e fechar as válvulas, que são reencaminhadas para o uMRF, alterações de parâmetros, que são registadas no XT65 ou respostas aos pedidos de informações meteorológicas, que actualizam os dados já existentes. As mensagens do módulo uMRF podem ser dados dos sensores que são guardados num *buffer* para posterior transmissão, ou alertas que são transmitidos prontamente para o servidor.

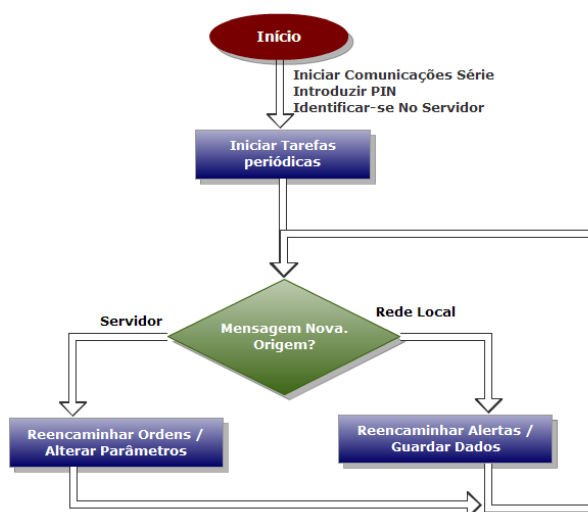


Figura 5.5: Esquema lógico do funcionamento do módulo XT65

uMRF

Este módulo começa a execução do software pela configuração dos registos necessários às suas funções. De seguida identifica-se junto ao XT65 enviando uma mensagem pré-definida. São então criadas as tarefas e iniciado o escalonador. As tarefas iniciadas são: A de gestão da rede local e a de comunicação série com o módulo XT65. Esta segunda espera a recepção de ordens para desbloquear uma outra tarefa que envia o comando para abrir as válvulas. Caso a mensagem contenha um tempo de abertura é agendada uma mensagem de fecho das válvulas.

A tarefa principal é a que gere todas as comunicações locais. Esta, depois de activar o módulo MRF24J40MA, cria uma nova tarefa para verificação do estado dos nós e entra num ciclo infinito. A tarefa de verificação do estado é uma tarefa periódica que faz uso de um vector que indica quais dos nós estão activos. Caso um dos nós não tenha enviado uma mensagem do tipo *I'm alive* há mais que um tempo determinado é enviada uma mensagem de alerta para o XT65.

O ciclo infinito da tarefa principal verifica um semáforo antes de cada *loop*. Esse semáforo é levantado pela ISR que detecta mensagens dos nós da rede. As mensagens podem ser de três

tipos: um pedido de endereço para um dos nós da rede, um *I'm alive* ou uma leitura dos sensores. Apenas este último tipo é passado ao XT65.

5.5 Sensor de caudal

Para determinar o caudal através do sensor escolhido, o coordenador necessita de monitorizar a frequência do sinal do mesmo numa das suas entradas digitais. Basta aplicar a equação 5.1 para o microcontrolador conhecer o caudal em cada momento.

$$Caudal = freq \times \frac{40}{352} \quad (5.1)$$

Na prática, para poder evitar usar números fraccionários nos cálculos efectuados no microcontrolador, poder-se-á contar as mudanças de estado de uma entrada digital a cada cinco segundos, obtendo-se um valor 10 vezes superior à frequência do sinal. Se a este valor for aplicada a equação 5.1 obter-se-á um valor de caudal em decilitros por segundo.

Para, a partir de um valor de caudal, se obter o consumo total de água deve-se integrar a sequência de valores de caudal obtidos, aplicando a fórmula 5.2, por exemplo se os valores forem obtidos a cada 5 segundos.

$$Total = \sum_{i=1}^n Caudal_i \times \frac{5}{60} \quad (5.2)$$

5.6 Comunicações Locais

Para obter conectividade local foi implementado um mecanismo de endereçamento simples que usa as primitivas da camada MAC⁴ do módulo MRF24J40MA descrito na secção 4.1, desenvolvidas na **Micro I/O**.

Definindo *a priori* qual dos módulos é o coordenador e qual é o nó pode-se definir um mecanismo trivial para endereçamento: O coordenador tem sempre o mesmo endereço e fica à escuta de pedidos de endereço por parte de um nó. O nó pede um endereço ao coordenador periodicamente até o receber. O esquema 5.6 demonstra a lógica usada.

Os nós enviam ainda um sinal periódico avisando que ainda estão vivos. Estes endereços são mantidos enquanto esse sinal estiver presente.

Como já foi referido, existe uma tarefa a correr no coordenador que verifica periodicamente o estado dos nós. Se algum deles não sinalizar a sua presença de acordo com a calendarização predefinida é enviada uma mensagem de alerta para o servidor.

5.7 Sensor de Humidade do Solo

Para determinar a humidade do solo foi seleccionado o sensor do tipo resistivo.

⁴Media Access Control

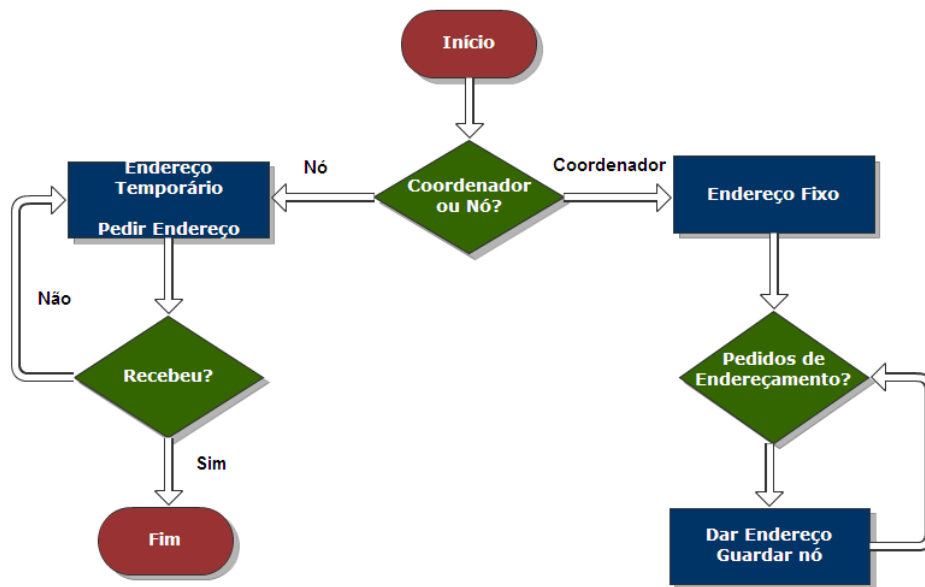


Figura 5.6: Esquema lógico de Endereçamento

5.7.1 Hardware

Para fazer a leitura da resistência eléctrica é necessário um circuito que forneça a a excitação AC necessária e que faça a leitura da resistência. Para este efeito foi usado o conceito desenvolvido na dissertação de mestrado de José Manuel Clemente dos Santos [19], adaptando-o às necessidades da presente dissertação. As alterações principais foram a remoção de um dispositivo *I-Wire* e de um regulador de tensão, desnecessários para este caso particular.

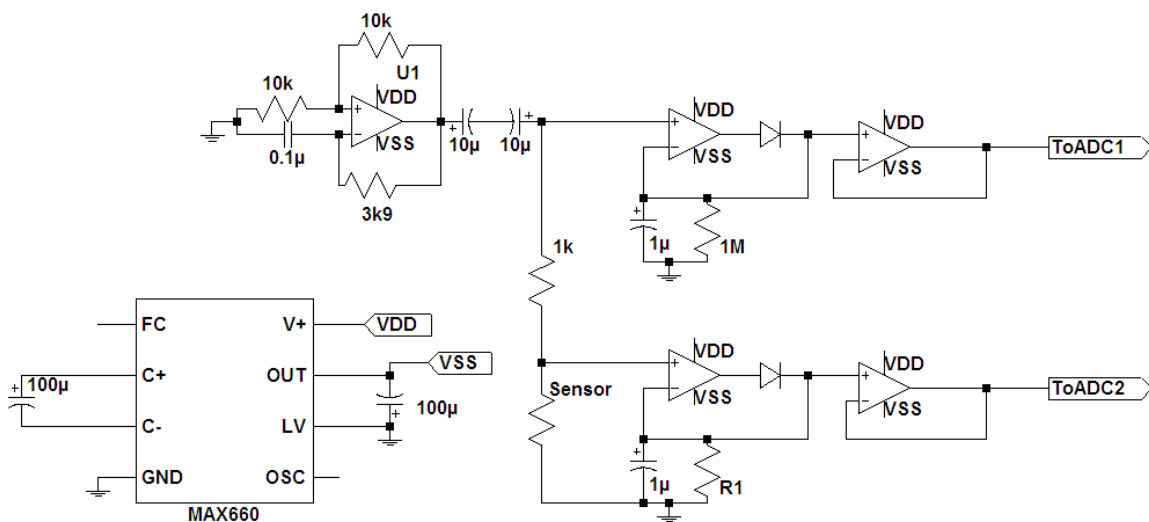


Figura 5.7: Circuito de leitura de impedância com excitação AC

O conceito é simples; visto que não se pode usar uma excitação DC, foi criado um circuito oscilador que fornece a excitação necessária, neste caso uma onda quadrada de 1kHz. Após este, com dois condensadores em série, filtra-se alguma componente DC ainda existente. Segue-se um simples divisor resistivo onde são medidos os valores máximos com detectores de pico. Existem ainda dois buffers de saída para não carregar o circuito. Há ainda um pormenor a considerar respeitante à alimentação. Como para obter uma excitação com componente DC nula, são necessárias tanto as arcadas positivas como as negativas da onda quadrada e, em consequência, é necessária uma alimentação simétrica no oscilador e como o circuito é alimentado por uma bateria, torna-se necessário o uso de um *Charge-Pump*⁵ para obter a alimentação negativa.

A figura 5.7 mostra o circuito completo de onde se obtêm dois sinais de onde se pode inferir o valor de impedância do sensor.

De modo a poupar a bateria do nó que fará a leitura de humidade, foi adicionado um transistor bipolar que desliga a alimentação deste circuito quando não está a ser feita uma leitura de humidade. Os OPAMPs utilizados foram TL081 mas foi verificado que, substituindo os utilizados para detectores de pico e buffers por MCP601, conseguia-se uma diminuição de corrente consumida, em operação, de 15mA para 5mA. Não foi possível substituir, já no circuito impresso, o OPAMP usado no oscilador por um MCP601 pois dado que este é um OPAMP⁶ *rail-to-rail* saturava o andar de entrada do primeiro detector de pico, comprometendo a medida de humidade. Esta situação poderá ser resolvida posteriormente com, por exemplo, dois díodos, em sentidos opostos, em paralelo, à saída do oscilador.

Convém referir que nenhum destes OPAMPs é ideal nesta situação pois, com uma alimentação simétrica de 3,3 V, os TL081 encontram-se no limite inferior da sua gama suportada de tensão de alimentação e os MCP601 no limite superior. Ainda assim, na leitura de resistências conhecidas de 100 Ω a 20k Ω conseguiu-se uma precisão comparável à de um multímetro⁷

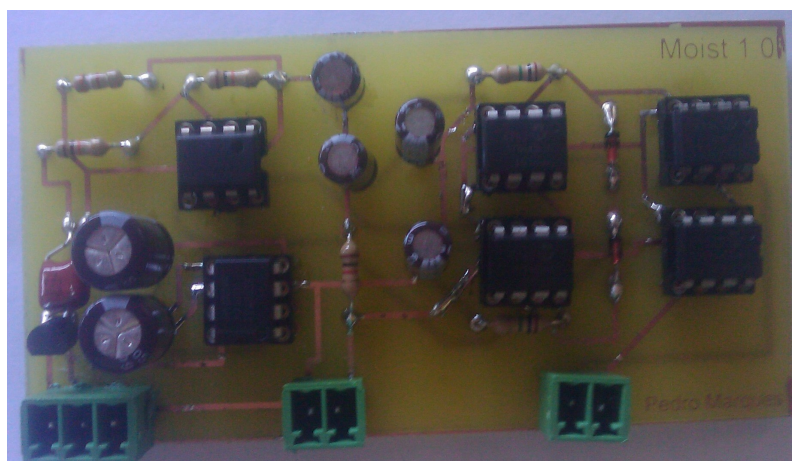


Figura 5.8: Circuito impresso para leituras de humidade

⁵Foi usado um MAX660

⁶*Operational Amplifier*

⁷Univolt DT191

5.7.2 Calibração

A partir dos dois sinais gerados pelo circuito descrito, depois de uma leitura feita pela ADC do microcontrolador, pode-se obter a resistência eléctrica do bloco de gesso aplicando a seguinte equação, derivada da Lei de Ohm. Sendo V_1 a tensão mais elevada, V_2 a mais baixa e R_c a resistência conhecida, a resistência do sensor é dada por:

$$R_{sensor} = R_c \times \frac{V_2}{V_1 - V_2} \quad (5.3)$$

Estes valores de resistência precisam de ser transformados em valores de humidade do solo. Esses valores são dados em kPa (kilo Pascal) ou cb (centibar). Resultados experimentais na literatura apresentam uma curva de calibração que pode ser traduzida nos seguintes segmentos lineares.

$$cb = \begin{cases} \frac{R-550}{50}, & \text{se } 550 \leq R < 1000 \\ 9 + \frac{R-1000}{100}, & \text{se } 1000 \leq R < 1100 \\ 10 + \frac{R-1100}{180}, & \text{se } 1100 \leq R < 2000 \\ 15 + \frac{R-2000}{200}, & \text{se } 2000 \leq R < 6000 \\ 35 + \frac{R-6000}{160}, & \text{se } 6000 \leq R < 9200 \\ 55 + \frac{R-9200}{150}, & \text{se } 9200 \leq R < 12200 \\ 75 + \frac{R-12200}{135}, & \text{se } 12200 \leq R < 15575 \\ 100 + \frac{R-15575}{125}, & \text{se } 15575 \leq R < 28078 \end{cases}$$

Apesar de, com base nesta curva, se poderem calcular valores de humidade do solo até 200 cb, esta última parte é obtida apenas por uma extrapolação dos dados e não por experimentação [22]. Note-se ainda que o valor de resistência lido é afectado pelo tipo e temperatura do solo. Esta curva é derivada de um solo típico⁸ e se, por exemplo, o sensor for usado num solo muito arenoso é necessária uma calibração diferente. A temperatura também exerce um efeito sobre as leituras. Temperaturas altas provocarão uma resistência menor e vice-versa. Este efeito pode ser compensado pela equação 5.4.

$$R_{comp} = R \times (1 + 0,01 \times ({}^\circ F - 75)) \quad (5.4)$$

Um grau Fahrenheit equivale a $\frac{1}{1,8}$ de um grau Celsius e 75° F são cerca de 24°C. Pode-se dizer então que, por cada grau de desvio de 24° C, há um erro de 1,8 % na resistência medida. Por exemplo a 40° C uma resistência de 10kΩ teria um valor lido de 7,7kΩ. Este erro não é desprezável se se quiser uma medição precisa da humidade mas no caso de o sistema estar submetido a temperaturas amenas e como apenas se quer saber se o terreno precisa de ser regado ou não, poder-se-á contornar este passo.

⁸Loamy Soil [22]

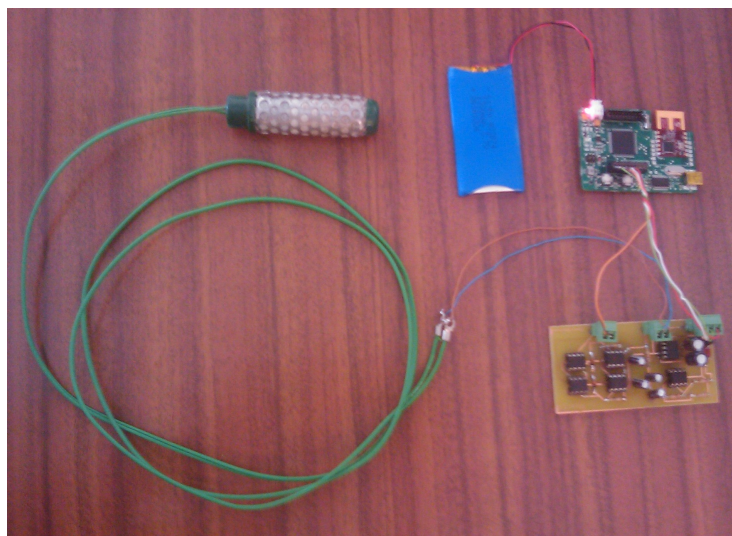


Figura 5.9: Sensor de Humidade: PCB e uMRF

5.7.3 Software

O sensor de humidade serve para um controlo de rega mais refinado, servindo como barreira final, a última palavra sobre a rega. Mesmo assim, a frequência de variação de informação neste sensor é bastante lenta sendo que, como será demonstrado no capítulo 6, uma leitura a cada meia hora é mais que suficiente para uma informação actualizada sobre o estado do terreno, sendo que se poderá aumentar este valor caso haja uma necessidade de aumentar a autonomia deste tipo de nós. Esta transmissão de dados pode funcionar ainda como o sinal de *I'm alive*. Como não necessita de esperar por ordens do coordenador, este nó pode ser completamente desligado depois de fazer a leitura e a enviar, poupando a bateria. Se a bateria estiver abaixo de um valor crítico, as mensagens enviadas deverão ter um campo que alerte o coordenador para esse facto.

Na pratica, neste nó existem duas tarefas do FreeRTOS: A tarefa de gestão das comunicações e a de leitura do sensor. Periodicamente a tarefa de gestão inicia uma leitura do sensor, desbloqueando a tarefa que o faz, formata a leitura e envia-a para o coordenador. Entre estas leituras, todo o sistema é colocado num modo de *low-power*.

5.8 Electroválvulas

5.8.1 Hardware

Como fá foi mencionado, as electroválvulas usadas requerem um pulso de 9 volts para comutar de estado. Nestes nós existem duas fontes energéticas distintas, uma para a actuação nas electroválvulas e outra para o microcontrolador. Visto que o microcontrolador usado é alimentado por uma fonte de 3,3 volts é necessário usar uma fonte externa, neste caso uma pilha de 9 volts.

Para inverter a polaridade do pulso foi usada uma ponte H⁹, actuada por saídas digitais do microcontrolador. Como mostra a figura 5.10 são usadas três entradas digitais. A entrada CE activa o circuito integrado apenas quando necessário, poupando energia. A entrada A1 deve ser a negação da entrada A2 e a orientação do pulso de tensão aplicado dependerá do estado delas.

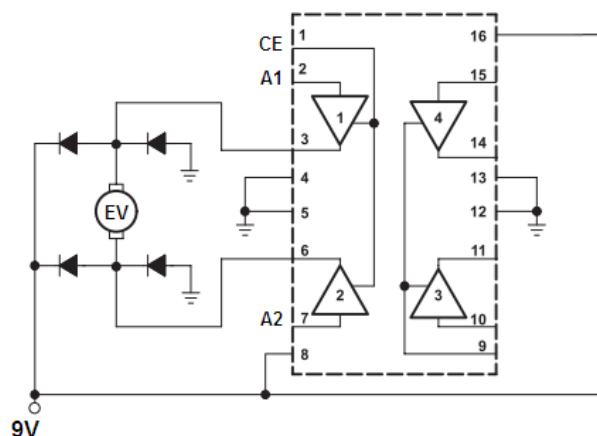


Figura 5.10: Circuito de actuação nas electroválvulas

Como a saída digital do microcontrolador é de 3,3 volt é necessário um adaptador de tensão. Foi usado o circuito exposto na figura 5.11. Este tem um atraso de fase de 180° e como tal pode ser usado para, a partir do sinal A1, gerar o sinal A2.

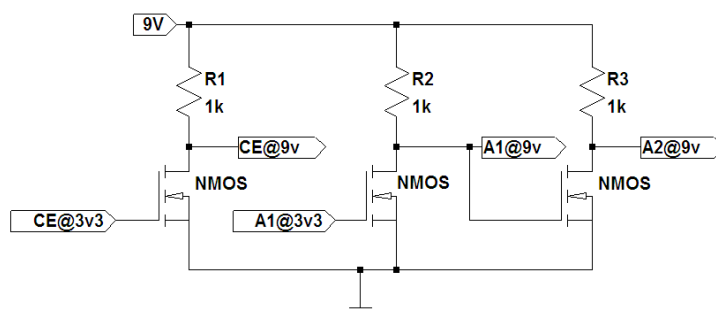


Figura 5.11: Adaptador de tensão

A electroválvula equivale quase a uma indutância pura e por isso, a uma tensão constante, é praticamente um curto circuito. Assim, quando ligada, vai consumir tanta corrente quanto conseguir. Para minimizar o consumo energético, o pulso de tensão aplicado deve ser diminuído ao mínimo possível. Foi verificada uma duração mínima de impulso necessária para uma comutação de 25 ms. Este teste foi feito em vazio e é de esperar que em carga seja necessário um impulso maior.

⁹L293NE, Texas Instruments

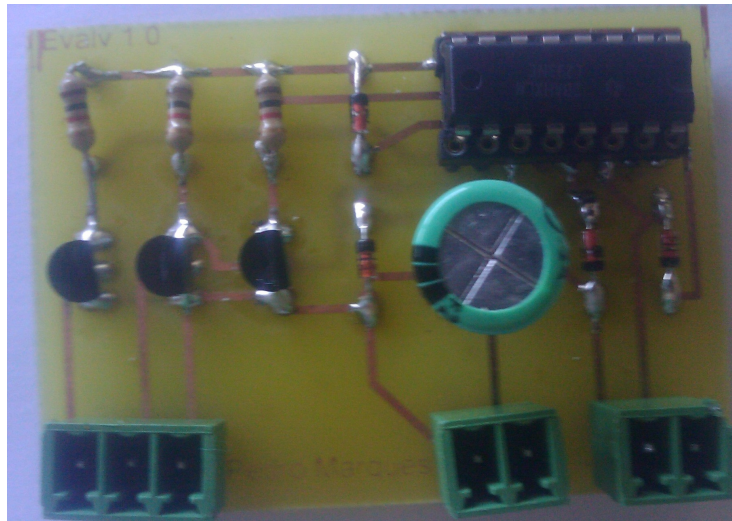


Figura 5.12: Circuito impresso para actuação nas electroválvulas

5.8.2 Software

Os actuadores são, enquanto nós na rede, completamente diferentes dos nós sensores. Têm um comportamento bastante simples, visto que apenas necessitam de abrir e fechar a electroválvulas. A necessidade de estarem constantemente à escuta de ordens do coordenador tem como consequência um consumo energético maior.

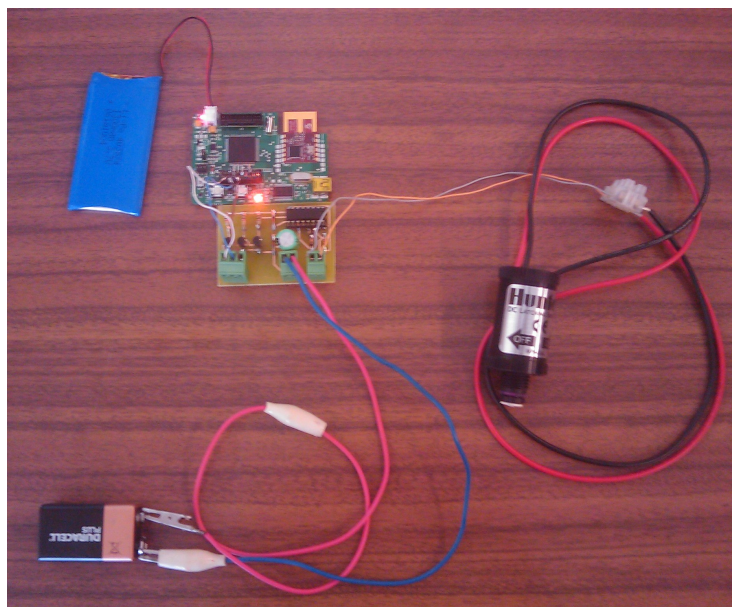


Figura 5.13: Actuador: PCB e uMRF

Existem duas tarefas em execução neste nó: a que envia periodicamente o sinal *I'm alive*

e a tarefa de gestão das comunicações. Esta última apenas espera ordens para actuação nas electroválvulas. Quando é recebida uma ordem é definida a saída digital que define se se vai abrir ou fechar a válvula e então é activado o circuito de actuação durante 25ms.

Capítulo 6

Testes e Análises

Neste capítulo irão ser apresentados os testes que demonstram que o sistema funciona realmente. Serão apresentados os testes com os sensores, nomeadamente um teste com o sensor de caudal, verificando a sua fiabilidade e um teste com o sensor de humidade. Será ainda testada a autonomia das electroválvulas quando actuadas por uma pilha comum de 9 volt. Será ainda feito um teste global, apresentando o comportamento do sistema a estímulos controlados. O capítulo será encerrado com uma discussão superficial dos custos associados ao desenvolvimento de um sistema semelhante ao proposto nesta dissertação.

6.1 Sensores

6.1.1 Sensor de caudal

Para confirmar a fiabilidade das medidas do sensor de caudal foi efectuado o seguinte teste: com o sensor em série com um contador clássico foram activados em três momentos distintos um caudal fraco¹, médio² e um variável, durante cerca de um minuto. Depois de calculado o caudal total foram obtidos os seguintes resultados, apresentados na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Valores de consumo de água

Tipo	Contador	Caudalímetro	Diferença
Fraco	2,8 L	1,44 L	1,36 L
Médio	20,2 L	19,56 L	0,64 L
Variável	26,8 L	25,93 L	0,87 L

Pode-se observar um erro que faz com que o caudalímetro meça sistematicamente menos do que o contador. Este erro foi atribuído ao facto de a gama de caudais do sensor ser de 2 a 40 L/min e, nos momentos de ligar e desligar o caudal, os fluxos inferiores a 2 L/min são mal medidos. Esta hipótese é sustentada pelo facto de o caudal fraco ter o maior erro de todos.

¹2L/min

²20L/min



Figura 6.1: Sensor de caudal ligado à mXS4

6.1.2 Sensor de Humidade

Como já foi referido na secção 4.4, no dia 16 de Março de 2011, foi preparado um *setup* experimental com o sensor de humidade num canteiro. Neste, foram lidos valores de resistência eléctrica a cada meia hora, durante 3 dias. A figura 6.2 apresenta as leituras feitas depois de aplicada a curva de calibração mas sem compensação de temperatura. A primeira leitura pode-se descartar por o sensor ainda não estar em contacto íntimo com o solo. No dia 16 de Março choveu durante a manhã e por isso o solo está bastante húmido. Pode-se observar que durante a manhã o terreno absorve a humidade do orvalho e durante a tarde, a exposição ao sol fá-lo secar. Não foi possível verificar a precisão destas medidas com um outro sensor de humidade já calibrado. É, no entanto, óbvia a relação entre a humidade do solo e as leituras feitas pelo sensor.

6.2 Electroválvulas

Para determinar a autonomia do nó actuador tentou-se determinar, por experiência, quantas comutações uma pilha de 9 volt aguentaria antes de começar a falhar. Foi escolhida uma pilha Duracell Plus, bastante comum no mercado. Com o circuito descrito na secção 4.5 foram feitas duas comutações por segundo, cada uma com um tempo activo de 25 ms, o tempo mínimo determinado para uma comutação bem sucedida. Depois de uma manhã inteira a abrir e fechar a válvula tinham sido feitas 10 000 comutações e a pilha ainda tinha carga suficiente para continuar

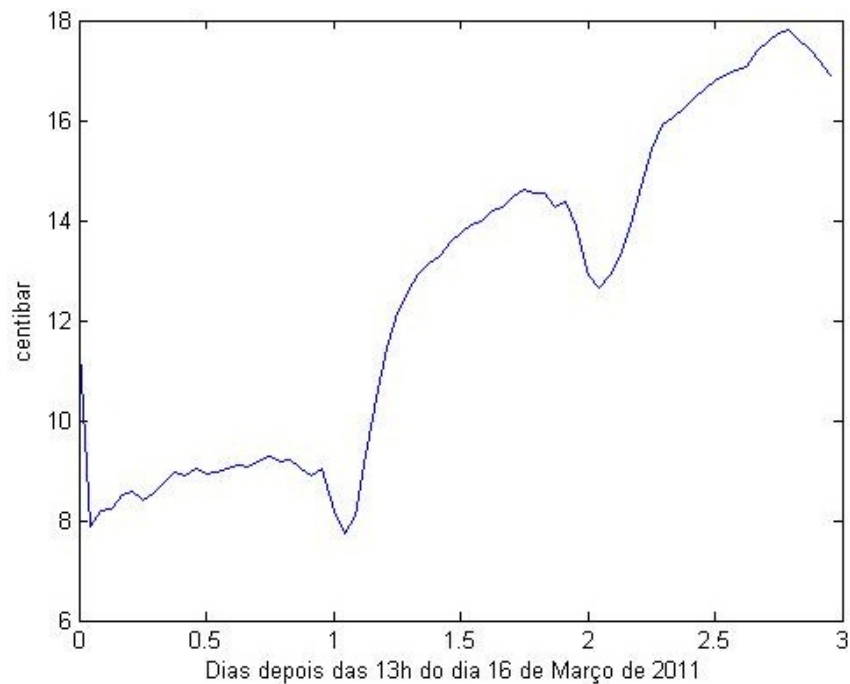


Figura 6.2: Leituras de Resistência Eléctrica do sensor de Humidade

a comutar as válvulas. Considerando que se faz duas regas por dia, 300 dias por ano, a autonomia da pilha ultrapassa os 8 anos, o que é maior que a vida útil da mesma. Foi verificado ainda, que quando a carga era baixa demais, aumentando o tempo activo do circuito de comutação ainda era usável a mesma pilha. Assim sendo, não é crítica a descarga da pilha por uso nas electroválvulas mas sim a sua auto-descarga ao longo do tempo.

6.3 Teste Global do Sistema

Finalmente foi executado um teste com todos os componentes do sistema. Este não foi um teste real, no terreno, mas apenas uma simulação. Não foi por isso incluído o sensor de caudal neste teste. O objectivo deste teste foi a verificação da capacidade de troca de informação entre os diversos módulos e a execução correcta das regras de controlo já descritas. Todos os elementos temporais foram acelerados em relação à realidade para tornar este procedimento mais prático.

Foi ligado o servidor, e identificado o IP do mesmo. Foram ligados os módulos XT65 e uMRF do coordenador e programado o IP do servidor. Após este teste existia conectividade entre o coordenador e o servidor, visível pela troca de uma mensagem do tipo *I'm alive* a cada 30 minutos. Para conduzir o sistema a um determinado comportamento é necessário alterar a informação que se lhe fornece. Para esse efeito foi definido que, a cada 15 minutos, o coordenador pediria uma actualização da informação meteorológica. Foram ligados os nós, um sensor de humidade e uma electroválvula. A periodicidade do sinal de *I'm alive* na rede local foi definida como 5 minutos, sendo também essa a periodicidade das leituras do sensor de humidade. Como este não foi um

teste no terreno as leituras de humidade não foram feitas no bloco de gesso mas em resistências. Resistências abaixo de 5kΩ indicam que o terreno ainda tem humidade suficiente. Foi definido que a rega deve ser feita meia hora antes do nascer do sol. Caso a precipitação do próprio dia exceda os 3mm também não se deve regar. O esquema seguinte revela o comportamento do sistema, usando as informações falsas.

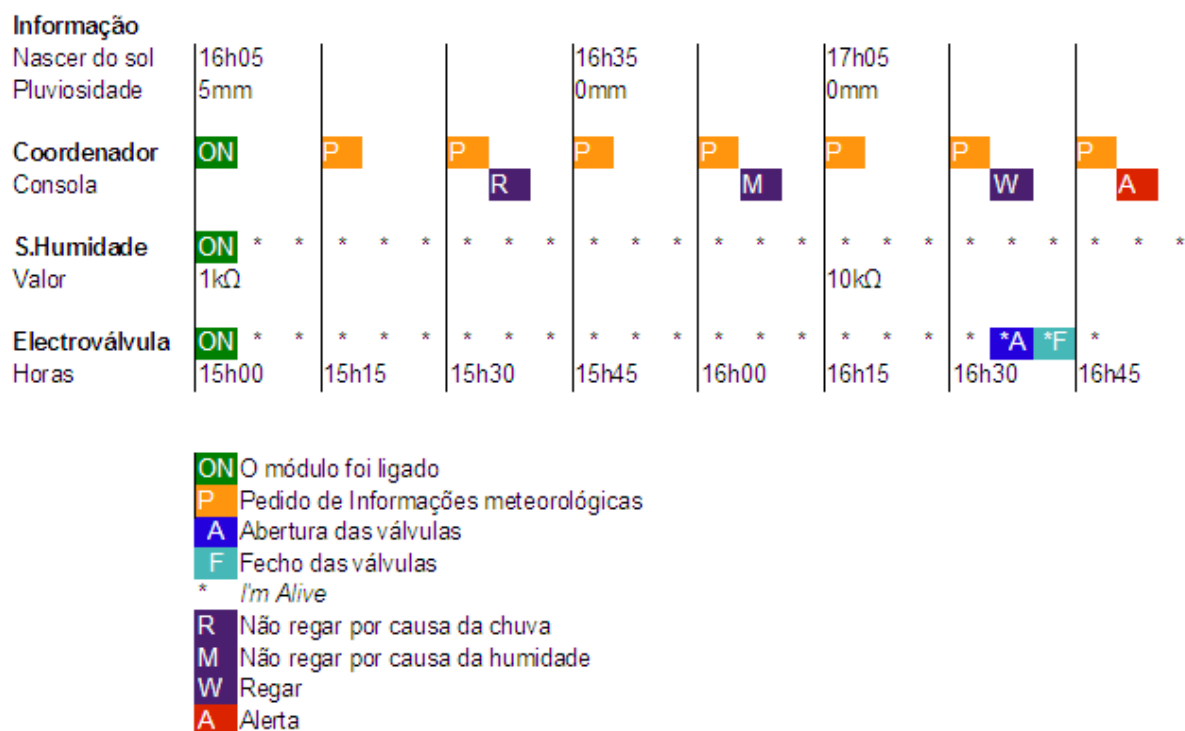


Figura 6.3: Comportamento Global

Pode-se observar que, a cada 15 minutos, é feito um pedido ao servidor de renovação das informações meteorológicas. No servidor, este pedido usa, em vez da Internet, um ficheiro XML local que fornece as informações erradas. Pode-se ainda verificar a sinalização de *I'm alive* por parte dos nós a cada 5 minutos.

A primeira tentativa de rega, às 15:35, não foi concretizada pela verificação da pluviosidade. A segunda tentativa também não foi concretizada pelo facto da resistência no sensor indicar que ainda existe humidade suficiente no solo. Apenas a terceira tentativa foi concretizada pois todas as verificações foram satisfeitas.

Foi verificada ainda a transmissão de uma mensagem de alerta quando o nó de actuação parou de enviar a sinalização de *I'm alive* por ter sido desligado.

6.4 Análise de Custos

Para construir um produto seguindo a aproximação proposta nesta dissertação é necessário obter alguns componentes. De seguida serão apresentadas algumas considerações sobre o custo de cada um. Não é objectivo aqui fazer uma análise detalhada mas apenas dar a conhecer, de uma maneira superficial, a magnitude do investimento necessário para um projecto semelhante.

O custo inerente ao servidor é muito difícil de calcular visto que não é mais que um *software* que corre num computador permanentemente ligado à Internet. Este software não faz uso de todo o computador e logo o seu custo é diluído pelo número de programas em execução e, dado que é um servidor multi-cliente, pelo número de clientes a controlar.

O coordenador de cada jardim necessita de um módulo com comunicações remotas e outro para comunicações locais. O módulo XT65 tem um custo de até 200 USD, se comprado à unidade, mas tem incluído um módulo GPS que é desnecessário para esta aplicação. Um módulo do mesmo fornecedor, o TC65, que não contém o módulo GPS é significativamente mais barato, cerca de 60 USD, ou mesmo abaixo de 40 USD quando em grandes volumes, é capaz de cumprir as mesmas tarefas que o XT65. O módulo usado para as comunicações locais, o MRF24J40MA custa cerca de 10 USD, por unidade e até 7,50 USD em maiores quantidades.

A electroválvula da Hunter tem um custo de cerca de 20 USD, mas que pode descer para metade quando adquirido em grandes volumes, e o sensor de humidade da Watermark custa por volta dos 50 USD mas pode ir até 35 USD se adquirido em maiores quantidades.

O microcontrolador usado não é, como já foi mencionado, o mais adequado para esta aplicação. Um simples PIC24, com um custo de 1,50 USD seria suficiente para esta aplicação.

A tabela seguinte resume esta breve análise.

Tabela 6.2: Custo dos Componentes

Volume	PIC24	MRF24J40MA	TC65	Electroválvula	Sensor
Alto	1,5 \$	7,5 \$	40 \$	10 \$	35 \$
Baixo	2 \$	10 \$	60 \$	20 \$	50 \$
Diferença	0,5 \$	2,5 \$	20 \$	10 \$	15 \$

Cada actuador vê o grosso do seu custo atribuído à electroválvula, ao microcontrolador e ao módulo RF, perfazendo um total de 19 USD de investimento mínimo para estes componentes. No caso dos sensores de humidade os componentes necessários são semelhantes, sendo apenas trocada a electroválvula pelo sensor resistivo. O custo destes componentes é de 44 USD. Para o coordenador é indispensável um módulo semelhante ao TC65 e o módulo RF, o que se traduz num custo mínimo de 47,5 USD.

Um sistema que compreenda um sensor e cinco actuadores implica a aquisição de cinco electroválvulas, um sensor de humidade, um módulo TC65, seis microcontroladores e sete módulos de comunicações locais. Quando em quantidade, um sistema assim necessita de um investimento mínimo na ordem dos 190 USD.

A tabela seguinte resume estas conclusões.

Tabela 6.3: Custo dos Blocos Funcionais

Bloco funcional	Nós sensores			Nós actuadores			Coordenador	
Componentes	PIC	RF	Sensor	PIC24	RF	Valv.	RF	TC65
Custo	1,5 \$	7,5 \$	35 \$	1,5 \$	7,5 \$	10 \$	7,5 \$	40 \$
Total	44 \$			19 \$			47,5 \$	

Capítulo 7

Conclusão

Neste capítulo irão ser tratados dois assuntos, encerrando o presente documento: Algumas considerações sobre o trabalho desenvolvido e uma descrição do trabalho a realizar e desenvolvimentos futuros que poderão tornar este projecto num produto com aplicação prática.

7.1 Trabalho Futuro

Nem todos os objectivos propostos foram atingidos, sendo que o mais crítico foi a autonomia energética do coordenador. Alguns outros objectivos como a interface para o utilizador foram atingidos mas não de uma maneira completamente satisfatória e podem portanto ser melhorados.

No final deste projecto, apesar de se poder afirmar que muito já foi feito e aprendido, ainda se está longe de um produto final, com aplicações práticas no imediato. Serão então aqui descritos alguns desenvolvimentos que podem aproximá-lo desse objectivo.

7.1.1 Servidor

No servidor poder-se-ia modificar o método de armazenamento de dados de um simples ficheiro de texto para uma base de dados, mais adequada para um registo histórico de dados de vários tipos. Uma frente que pode ser muito melhorada é a interação com o utilizador. De momento é feita por linha de comandos e não é de todo intuitiva. Um *front-end web-based* como sugerido no início seria uma possibilidade interessante que deve ser explorada em mais detalhe. Essa interface deveria permitir tanto a actuação manual no sistema como a alteração de parâmetros e a apresentação do registo histórico num formato mais fácil de ler, como por exemplo gráficos interactivos. A extensão de parâmetros controláveis para além do tempo de rega é também um ponto importante a melhorar.

7.1.2 Coordenador

O coordenador tem ainda bastante trabalho para ser feito até ser um produto final. Antes de mais dever-se-á integrar os dois módulos, o XT65 e o uMRF, num só, simplificando o sistema

e poupando bateria. A ligação à internet pode ser usada para encontrar a hora actual que neste momento precisa de ser definida pelo utilizador. A auto-localização é também uma possibilidade interessante que não foi devidamente explorada. Apesar de não ser necessária uma precisão como a dada por LBS, o recurso a este serviço pode tornar a instalação deste sistema ainda mais independente do utilizador.

A autonomia energética deste componente do sistema também necessita de ser implementada. O microcontrolador necessita de uma fonte de alimentação de 3,3 volt, o que pode ser satisfeito com uma simples bateria mas o sensor de caudal precisa pelo menos de 12 volt para funcionar, sendo que alguns sensores usam até 24 volt. Assim sendo, para atingir a autonomia energética deve-se incluir no sistema uma fonte de energia renovável como o é por exemplo uma bateria carregada por um painel solar.

7.1.3 Nós

Os nós, quer sensores, quer actuadores têm um comportamento satisfatório e cumprem os requisitos propostos na secção 3.6. Podem ainda ser melhorados em dois aspectos em particular. Em primeiro lugar, uma condição de falha que foi discutida mas não implementada foi a verificação do estado da bateria, sendo a bateria abaixo de um valor crítico uma condição de falha que deverá ser comunicada ao coordenador. Em segundo lugar o protocolo de comunicações deve ser estudado, por forma a maximizar o tempo de vida das baterias. No caso dos sensores de humidade, deve ser estudado qual o compromisso aceitável entre tempo de vida da bateria e tempo entre actualizações do estado do terreno. No caso das electroválvulas, deve ser estudado se em vez de se estar sempre à escuta de ordens, seria mais eficiente em termos energéticos verificar periodicamente se existem ordens no coordenador à espera de serem transmitidas. Esta aproximação será mais eficiente quanto mais longo for o período mas acarreta custo inevitável que é o atraso entre a tomada de decisão e a actuação em si, o que neste caso não parece ser um ponto crítico.

Por fim é de referir que o microcontrolador usado, um dsPIC30, tem características muito boas mas desnecessárias para a presente aplicação. Um simples PIC18 ou PIC16 seriam mais do que suficientes para este sistema e com certeza teriam menores necessidades energéticas.

7.1.4 Comunicação

A comunicação entre o coordenador e o servidor pode ser melhorada na *cache* que existe no coordenador. Quanto menos vezes se enviar informação, menor será a energia gasta nessas transmissões. A periodicidade do sinal "*I'm alive*" deve ser reduzida ao mínimo necessário para manter o canal de comunicação aberto.

No caso das comunicações locais, o mecanismo de endereçamento deve ser tornado mais robusto e integrar novas funcionalidades como a divisão da gama de endereços entre sensores e actuadores, segurança das transmissões e prioridade de mensagens. A possibilidade de integrar um protocolo de alto nível como ZigBee ou MiWi deve ser ponderada, pese embora o aumento dos custos energéticos derivado da sua utilização.

7.1.5 Controlo

As regras de controlo implementadas são bastante rudimentares e implementam um controlo do tipo “on-off” que faz uso apenas da hora do nascer e pôr do sol, da humidade do solo e da pluviosidade futura. Uma rega mais eficiente fará uso de uma maior variedade de parâmetros como, por exemplo, a temperatura, o tipo de solo e o registo histórico dos dados. O tempo de rega deve também ser ajustável conforme os dados recolhidos.

7.2 Pontos Críticos

Há apenas a apontar, como desvantagem deste sistema, dois pontos que são inerentes a este tipo de aproximação.

- A inexistência de uma fonte de alimentação cablada para o controlador e nós sensores e actuadores obriga ao uso de baterias. Se se verificar que há necessidade de substituir as baterias muito frequentemente as vantagens provenientes da utilização das comunicações sem fios não compensam o esforço que daí provém.
- A obtenção de informações meteorológicas *online* obriga a que exista uma fonte actualizada e fiável com dados relevantes para o local a controlar. Se não existirem informações meteorológicas acerca do local a controlar não é possível usar esta abordagem.

7.3 Considerações Finais

No fim desta dissertação pode-se fazer uma avaliação positiva do resultado. As soluções de hardware e software encontradas para actuação nas electroválvulas e leitura do sensor de humidade foram implementadas satisfatoriamente. Foi possível demonstrar a utilização de uma rede local sem fios, usando o *standard* IEEE 802.15.4, para efectuar comunicações entre os sensores, actuadores e a central de controlo. A adopção de um servidor para obtenção e formatação de informações meteorológicas revelou-se como sendo uma solução perfeitamente adequada aos requisitos de um sistema de controlo de rega. As regras de controlo implementadas permitem uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos.

Apêndice A

Lista de Acrónimos

AC *Alternating Current*

API *Application programming interface*

CAN *Controller area network*

CPU *Central Processing Unit*

DC *Direct Current*

DOM *Document Object Model*

GPRS *General Packet Radio Service*

GPS *Global Positioning System*

GSM *Global System for Mobile Communications*

HSDPA *High-Speed Downlink Packet Access*

HTTP *Hypertext Transfer Protocol*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

LBS *Location Based Service*

MAC *Media Access Control*

OCR *Optical Character Recognition*

OPAMP *Operational Amplifier*

PIN *Personal Identification Number*

RSI *Rotina de Serviço à Interrupção*

SAX *Simple API for XML*

USB *Universal Serial Bus*

UTMS *Universal Mobile Telecommunications System*

W3 *World Wide Web Consortium*

WPAN *Wireless Personal Area Network*

XML *Extensible Markup Language*

Bibliografia

- [1] URL: <http://www.can-cia.org> (acedido em 18/06/2011).
- [2] URL: <http://www.1wire.org/> (acedido em 18/06/2011).
- [3] URL: <http://www.java.com/en/about> (acedido em 13/03/2011).
- [4] URL: <http://download.oracle.com/javase/tutorial/networking/sockets/> (acedido em 20/05/2011).
- [5] URL: <http://download.oracle.com/javase/tutorial/essential/concurrency/> (acedido em 20/05/2011).
- [6] *de30 Loader*. URL: <http://mrmackey.no-ip.org/elektronik/ds30loader> (acedido em 15/04/2011).
- [7] *Diário de Coimbra - Jardim Botânico poupa 25 mil euros em água por ano*. URL: http://www.diariocoimbra.pt/index.php?option=com_content&task=view&id=11982&Itemid=135 (acedido em 15/04/2011).
- [8] *Facts and Trends*. URL: http://www.unwater.org/downloads/Water_facts_and_trends.pdf (acedido em 18/03/2011).
- [9] *FreeRTOS Features Overview*. URL: www.freertos.org (acedido em 10/06/2011).
- [10] Siddeswara M. Guru Wei Peng Daniel Hugo Andrew Terhorst John McCulloch Paul McCarthy. «Wireless Sensor Network Deployment for Water Use Efficiency in Irrigation». Em: (2008).
- [11] Dialight BLP Ltd. *How to select your BLP Solenoid*.
- [12] *Meteorologisk institutt og NRK*. URL: <http://www.yr.no> (acedido em 02/06/2011).
- [13] *MRF24J40MA Data Sheet, Microchip*. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70329b.pdf> (acedido em 13/04/2011).
- [14] *NSW Department of Primary Industries: neutron probe*. URL: http://www.dpi.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/165090/neutron-probe.pdf (acedido em 28/03/2011).
- [15] *O Instituto de Meteorologia, I.P.: Normais Climatológicas 1971-2000*. URL: <http://www.meteo.pt/pt/oclima/clima.normais/> (acedido em 28/03/2011).
- [16] Paulo Raimundo Pinto. «Sistema de Automação do Irrigâmetro Utilizando-se Instrumentos Digitais». Em: (2008).

- [17] Southern California Area Office U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Lower Colorado Region. «Weather and Soil Moisture Based Landscape Irrigation Scheduling Devices. Technical Review Report – 2nd Edition». Em: (2007).
- [18] Nova Rocha Sistemas e Equipamentos de Rega. «Sensores de humidade WATERMARK». Em: (2002).
- [19] José Manuel Clemente dos Santos. «Sistema de Controlo de Irrigação Baseado em Linguagem Java». Em: (2009).
- [20] Alan Kardek Rêgo Segundo. «Desenvolvimento de um Sistema de Irrigação Automático». Em: (2008).
- [21] W. Sokol. «An Electronic Interface for Watermark and Gypsumblock Sensors for Use with Standard Dataloggers». Em: (2002).
- [22] EME Systems. «Electrical Interface for WatermarkTM or Gypsum Block Sensors». Em: (2002).
- [23] *Tiny Bootloader*. URL: <http://www.etc.ugal.ro/cchiculita/software/picbootloader.htm> (acedido em 15/04/2011).
- [24] *World Population Prospects: The 2008 Revision*. URL: http://www.un.org/esa/population/publications/popnews/Newsltr_87.pdf (acedido em 28/03/2011).
- [25] Liren Wang Yibin Ying Yiming Zhou Xianglong Yang. «A wireless design of low-cost irrigation system using ZigBee technology». Em: (2009).
- [26] William M. Iversen Yunseop (James) Kim Robert G. Evans. «Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network». Em: (2007).