



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

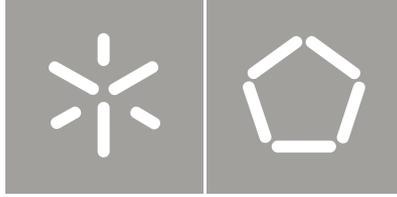
Tiago Manuel Ribeiro Gomes

WECO - Wireless Ecoponto

Tiago Manuel Ribeiro Gomes WECO - Wireless Ecoponto

UMinho | 2011

Dezembro de 2011



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Manuel Ribeiro Gomes

WECO - Wireless Ecoponto

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Comunicações

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Miguel Nunes Santos Cabral

Agradecimentos

As primeiras palavras de agradecimento vão sem dúvida alguma para os meus pais, Américo Gomes e Virgínia Gomes, por todo o apoio e suporte que sempre me deram, especialmente no meu percurso académico e também para as minhas irmãs, Carla e Marta, que também elas tiveram um papel importante na minha vida.

Ao Professor Doutor Jorge Cabral, por todo o apoio prestado e pela confiança que desde cedo depositou no meu trabalho, e por me ter proporcionado a participação neste projecto, entre outros, que originou esta tese de mestrado.

Ao *Embedded Systems Research Group* do Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho, que me acolheu e proporcionou todas as condições necessárias para a elaboração deste projecto, bem como garantiu o financiamento de uma bolsa de investigação. Agradeço também o apoio de todos os colaboradores do ESRG, especialmente ao Nuno Brito pelo apoio que me deu no desenvolvimento de algumas tarefas deste projecto.

Aos meus colegas de curso e amigos André Gomes, João Quintas, Helder Lemos e Diogo Ribeiro que desde cedo me acompanharam no meu percurso académico, com um agradecimento especial ao companheiro e amigo Jorge Miranda, parceiro em todos os projectos desenvolvidos.

A todos os meus familiares e amigos, com especial agradecimento ao meu tio, Fernando Gomes, que sempre apostou no meu percurso e desenvolvimento académico e aos meus amigos Tones e Quinhas por estarem sempre presentes na minha vida.

E por fim, dedico este trabalho a todos aqueles que sempre acreditaram em mim.

Resumo

Actualmente, a sensibilização por parte das pessoas para com os problemas ambientais tem vindo a aumentar. A recolha de resíduos urbanos constitui uma dessas preocupações, fazendo já parte do nosso quotidiano a separação dos resíduos sólidos produzidos diariamente que são posteriormente depositados em contentores próprios com destino à reciclagem, os ecopontos. Contudo, o enchimento dos ecopontos, ocorrendo aleatoriamente, torna difícil a tarefa de recolha, visto ser difícil a previsão de quando é que este se encontra cheio. Esta dificuldade tem como consequência o deslocamento de veículos de recolha a uma ilha de ecopontos que se encontra cheia e que justificava intervenção há algum tempo (a zona circundante pode ter lixo abandonado que já não cabe no contentor), ou a uma ilha de ecopontos que se encontra com baixos níveis de enchimento, traduzindo-se num desperdício de recursos e tempo visto que não se justificaria a sua recolha.

Com o objectivo de aumentar a eficiência da recolha de resíduos e reduzir os custos associados, foi implementada uma plataforma de monitorização do nível de enchimento de ecopontos, o Wise Waste, desenvolvida pela SOMA do grupo Auto-Sueco, encontrando-se actualmente em funcionamento em vários municípios do país. Contudo esta plataforma apresenta algumas limitações, nomeadamente a necessidade de cabos de ligação para alimentação e/ou comunicação entre os vários elementos do sistema, o elevado consumo energético e o facto de não poder ser usada em todos os tipos de contentores existentes.

Nesta dissertação é apresentada a plataforma Weco, uma plataforma inteligente de monitorização do nível de enchimento de ecopontos que pretende actualizar, apresentando vários melhoramentos, a plataforma actual Wise Waste. A plataforma Weco, devido à sua natureza sem fios pode ser usada em todos os tipos de contentores existentes e introduz uma gestão de energia mais eficiente, entre outras vantagens, contribuindo para uma recolha mais eficiente e programada e amiga do ambiente.

Abstract

Nowadays, people have become more aware about the environmental issues, one of these is the waste separation and recycling. Waste is separated at home and later deposited in outdoor recycling bins located at a recycling spot. Consequently, the number of recycling spots has been steadily increasing.

However, and because the recycling bins are randomly filled, it's a hard task to predict when they are full and the collecting company has difficulties in defining collecting routes for the vehicles. This often results in collecting an empty recycling bin, one with a very-low fill level, or even one that was full a long time ago (generally meaning that the area surrounding the bin is full of damped waste).

Aiming to increase the quality of waste collecting and the efficiency, in order to reduce costs, a monitoring platform of the filling level of the recycling bins was implemented, the Wise Waste from SOMA, and it's currently being used in several points of the country. However this monitoring platform has several limitations, such as the need for cables for communications and/or power supply, the overall system energy consumption and that it can't be used in all types of recycling bins.

This master's thesis presents Weco, an embedded platform for monitoring the recycling bins filling level, and aims to improve the current system, Wise Waste, offering a very low cost implementation, wireless communications and a low power architecture that can be used in any kind of existing recycling bins, contributing for an efficient and scheduled waste collection and more environmentally friendly.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Enquadramento e objectivos	3
1.3	Estrutura da dissertação	5
2	Estado da arte	7
2.1	Sistemas de monitorização	7
2.1.1	Monitorização de ecopontos no estrangeiro	7
2.1.2	Monitorização de ecopontos em Portugal	16
2.2	<i>Wireless Sensor Networks</i>	19
2.2.1	Aplicações e características das WSN	19
2.2.2	Arquitectura de um nó sensorial	22
2.3	<i>Standard IEEE 802.15.4</i>	23
2.3.1	Camada física	24
2.3.2	Camada MAC	25
2.4	Sistemas Operativos para microcontroladores	27
2.5	Resumo	29
3	Especificação do Sistema	31
3.1	Solução Wise Waste	31
3.2	Solução Weco	33
3.3	Estudo e selecção dos componentes	36
3.3.1	Elementos da rede	36
3.3.2	Baterias	42
3.3.3	<i>Ingress Protection Rating</i>	47
3.3.4	Sensores de medida por Ultra-som	49

3.4	Resumo	55
4	Desenvolvimento do Sistema	57
4.1	Topologia de rede	57
4.2	Hardware desenvolvido	58
4.2.1	Tecnologia <i>Texas Instruments</i>	58
4.2.2	Tecnologia <i>EnOcean</i>	61
4.3	Protocolos de comunicações	65
4.3.1	Protocolo da WSN	65
4.3.2	Protocolo Weco-WiseWaste (WWW)	73
4.4	Software desenvolvido	78
4.4.1	Software que implementa o coordenador da rede	78
4.4.2	Software que implementa o nó da rede	78
4.4.3	Software de teste à plataforma	81
4.4.4	Gestão de energia	83
4.5	Resumo	88
5	Avaliação do sistema	89
5.1	Resultados de performance	89
5.2	Tempo de vida da solução	97
5.3	<i>Weco Simulator</i>	98
5.4	Vantagens do Sistema Weco	99
6	Conclusões e trabalho futuro	101
6.1	Trabalho Futuro	102
A	PCBs	107
B	Esquemáticos	111

Glossário

ADC *Analog-to-Digital Converter*

BSN *Body Sensor Network*

CSMA/CA *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

FDD *Full Function Device*

GPRS *General Packet Radio Service*

GSM *Global System for Mobile Communications*

GTS *Guaranteed Time Slot*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IP Rating *Ingress Protection Rating*

ISM *Industrial, Scientific and Medical*

ISP *In System-Programmable*

MAC *Media Access Control*

OSI *Open Systems Interconnection*

PAN *Personal Area network*

PCB *Printed Circuit Board*

PER *Packet Error Rate*

PHY Abreviação para a camada física (*Physical*) do modelo OSI

QoS *Quality of Service*

RF *Radio Frequency*

RF4CE *Radio Frequency for Consumer Electronics*

RFD *Reduced Function Device*

RS232 *Recommended Standard 232*

SiP *System-in-Package*

SMS *Short Message Service*

SoC *System-on-Chip*

SSS *Stack Sharing Service*

USART *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*

WLAN *Wireless Local Area Network*

WPAN *Wireless Personal Area Network*

WSN *Wireless Sensor Network*

Lista de Figuras

1.1	Exemplos de alguns tipos de contentores disponíveis no mercado. . . .	2
1.2	Recolha de contentor exterior com auxílio de uma grua.	4
2.1	Arquitectura do sistema SmartBin.	8
2.2	Aplicação Smart-Manager.	8
2.3	Sensor instalado no interior dos contentores	9
2.4	SLX 1300 da Swisslogix.	10
2.5	Sensor e aplicação <i>web</i> do sistema SLX1300.	10
2.6	Sensor e aplicação <i>web</i> do sistema Waste Edge.	12
2.7	Sistema Syren da BH Technologies	12
2.8	Sonda usada no sistema Syren da BH Technologies	13
2.9	Repetidor e concentrador do sistema Syren	14
2.10	Aplicação remota do sistema Syren.	15
2.11	Arquitectura do sistema EMERALD	15
2.12	Aplicação <i>web</i> do sistema EMERALD	16
2.13	Imagens do sistema Ecogest retiradas da brochura comercial.	17
2.14	Aplicação <i>web</i> do sistema Smart Container	18
2.15	Arquitectura do sistema da Libelium, usado no combate a fogos florestais	20
2.16	Arquitectura <i>multi-hop</i> , típica de uma rede de sensores sem fios	21
2.17	Arquitectura típica de um nó sensorial	22
2.18	AVR Raven da Atmel que utiliza o <i>transceiver RF</i> AT86RF230	23
2.19	Comparação de <i>standards</i> de redes WLAN e WPAN relativamente ao consumo de energia e robustez. Fonte: <i>Advantech</i>	24
2.20	Topologias de rede. Fonte: <i>Standard</i> IEEE 802.15.4	26
2.21	Topologias de rede do <i>ZigBee</i> . Fonte: <i>Advantech</i>	27
3.1	Organização do sistema Wise Waste	31

3.2	Aplicação <i>web</i> com visualização de imagem vectorial de uma ilha ecológica e do nível de enchimento.	32
3.3	Aplicação <i>web</i> com visualização de imagem satélite de uma ilha ecológica e do nível de enchimento	33
3.4	Arquitectura do sistema Weco	34
3.5	Diagrama de blocos de todo o sistema	35
3.6	<i>System-on-Chip CC2530 da Texas Instruments no package QFN40</i>	37
3.7	<i>Kits de desenvolvimento CC2530DK e CC2530EMK da Texas Instruments</i>	38
3.8	<i>Kits de desenvolvimento CC2530ZDK e CC2530RemoTIDK da Texas Instruments</i>	38
3.9	Módulos programáveis para redes de sensores sem fios da <i>EnOcean</i>	40
3.10	Solução <i>wireless</i> e <i>energy harvesting</i> para redes de sensores da <i>EnOcean</i>	40
3.11	Kit de desenvolvimento EDK300 para os módulos da <i>EnOcean</i>	42
3.12	Comparação da densidade de energia dos vários tipos de baterias existentes	44
3.13	Gama de baterias LS ($Li - SOCl_2$) da <i>Saft Batteries</i>	45
3.14	Bateria recarregável 3VTD70 da <i>Saft Batteries</i>	46
3.15	Sonda SM956DN da <i>Schneider Electric</i>	50
3.16	Sonda <i>Laser O1D100 da IFM Electronic</i>	50
3.17	Sonda TSPC-30S1-232 da <i>Senix</i>	51
3.18	Sonda <i>HG-M40DAI da Hagisonic</i>	51
3.19	Exemplos de sensores ultra sónicos.	52
3.20	Exeplos de sensores ultra sónicos.	52
3.21	Modo de funcionamento dos sensores ultra sónicos	53
3.22	Sonda <i>MB7001-LV-MaxSonar-WR1 da MaxBotix</i>	53
4.1	Topologia global da rede.	58
4.2	Placa de desenvolvimento criada, CC25XXEB-ESRG	59
4.3	CC-DEBUGGER da <i>Texas Instruments</i>	59
4.4	Protótipo que implementa um nó da rede.	60
4.5	Protótipo que implementa o coordenador usando tecnologia <i>EnOcean</i>	61
4.6	Caixa 1555B com IP67 da <i>Hamming Manufacturing</i> usada no protótipo final.	62
4.7	Protótipos do nó da rede usando tecnologia <i>EnOcean</i>	63

4.8	Sequência de mensagens trocadas entre os elementos da rede	66
4.9	<i>MAC Frame</i> genérica do <i>standard</i> IEEE 802.15.4	67
4.10	<i>MAC Frame</i> adaptada do <i>standard</i> IEEE 802.15.4	67
4.11	Formato da mensagem tipo 1.	68
4.12	Formato da mensagem tipo 2.	68
4.13	Formato da mensagem tipo 3.	69
4.14	Formato da mensagem tipo 4.	70
4.15	Formato da mensagem tipo 5.	70
4.16	Fluxograma do funcionamento do coordenador da rede	79
4.17	Fluxograma 1 do funcionamento do nó da rede	80
4.18	Fluxograma 2 do funcionamento do nó da rede	80
4.19	Ambiente de desenvolvimento da aplicação <i>Weco Simulator</i>	82
4.20	Circuito electrónico construído para ligar/desligar completamente a sonda ultra-sónica	84
4.21	Bateria LS7500 da <i>SAFT Batteries</i>	85
4.22	Consumo médio de corrente para cada modo de operação.	86
4.23	Protótipos do nó da rede usando tecnologia <i>EnOcean</i>	88
5.1	Ilha ecológica instalada nas instalações da SOMA	90
5.2	Primeiro teste de performance do canal de rádio usando o SoC CC2530 com a tampa do contentor aberta.	91
5.3	Segundo teste de performance do canal de rádio usando o SoC CC2530 com a tampa do contentor fechada.	91
5.4	Resultados de performance do canal rádio na gama 868MHz com nó da rede a usar antena exterior	92
5.5	Histograma com a contabilização do número de pacotes recebidos no teste com nó da rede com antena exterior.	93
5.6	Resultados de performance do canal rádio na gama 868MHz com nó da rede a usar antena exterior	94
5.7	Histograma com a contabilização do número de pacotes recebidos no teste com nó da rede com antena exterior.	94
5.8	Teste de performance do canal rádio na gama 868MHz a uma distância de 30 metros, com nó da rede instalado com antena interior	95
5.9	Resultados de performance do canal rádio na gama 868MHz a uma distância de 30 metros, com nó da rede instalado com antena interior	95

5.10	Histograma com a contabilização do número de pacotes recebidos no teste com nó da rede com antena interior.	96
5.11	Protótipo final, com protecção IP67	96
5.12	Aplicação de testes à plataforma Weco	99
A.1	PCB da placa de desenvolvimento CC25XXEB-ESRG	107
A.2	PCB da placa que implementa um nó da rede	108
A.3	PCB da placa que implementa o coordenador da rede usando tecnologia <i>Enocean</i>	108
A.4	PCB da placa que implementa o nó da rede usando tecnologia <i>Enocean</i>	109
B.1	Esquemático da placa de desenvolvimento CC25XXEB-ESRG	112
B.2	Esquemático da placa que implementa um nó da rede	113
B.3	Esquemático da placa que implementa o coordenador da rede na solução <i>Enocean</i>	114
B.4	Esquemático da placa que implementa o nó da rede na solução <i>Enocean</i>	115

Lista de Tabelas

2.1	Bandas de frequência e taxas de transmissão.	24
3.1	Características <i>low power</i> do SoC CC2530	37
3.2	STM300/TCM300 <i>Technical Data</i>	41
3.3	Comparação de <i>performance</i> entre vários tipos de baterias recarregáveis	43
3.4	3VTD70 Battery Characteristics	47
3.5	Sólidos, <i>IP Rating</i> . Tabela retirada do <i>standard</i> ANSI/IEC 60529-2004.	48
3.6	Líquidos, <i>IP Rating</i> . Tabela retirada do <i>standard</i> ANSI/IEC 60529-2004.	48
4.1	Código de 3 <i>bit</i> para identificação do tipo de contentor.	64
4.2	Formato da mensagem tipo 1	68
4.3	Formato da mensagem tipo 2	69
4.4	Formato da mensagem tipo 3	69
4.5	Formato da mensagem tipo 4	70
4.6	Formato da mensagem tipo 5	71
4.7	Formato da mensagem tipo 2	72
4.8	Formato da mensagem tipo 3	72
4.9	Formato da mensagem tipo 5	73
4.10	Bateria necessária	85
4.11	Características da Bateria LS7500.	85
4.12	Modos de operação de um nó da rede	86
4.13	Consumo e duração de cada modo numa hora de funcionamento . . .	87
5.1	Teste de consumo energético do protótipo final com a bateria LS7500	98

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo introdutório é apresentado o panorama tecnológico actual da recolha de resíduos urbanos e os problemas associados, bem como uma primeira abordagem já realizada com o objectivo de os resolver. Apresentam-se os objectivos para o desenvolvimento da plataforma proposta e apresenta-se também a estrutura desta dissertação.

1.1 Motivação

As questões ambientais estão cada vez mais presentes nas preocupações das pessoas. Pensar num planeta limpo e em acções que visam tornar o meio ambiente mais agradável começa a fazer parte do quotidiano das populações, e a recolha de resíduos urbanos é uma delas. Os resíduos produzidos em casa, com destino à reciclagem, são separados e posteriormente depositados em contentores próprios, os ecopontos, estrategicamente colocados perto de áreas residênciais.

Na Figura 1.1 estão ilustrados três exemplos de ecopontos disponíveis no mercado, uma ilha de contentores exteriores enterrados da SOMA - Sociedade de Montagem de Automóveis, S.A. [1], ecopontos exteriores, da ALMOVERDE - Ecologia, Lda [2] e contentores para separação doméstica, modelo Trento também da empresa ALMOVERDE, que facilitam e proporcionam uma pré selecção dos resíduos separados para posterior introdução nos contentores exteriores.

Veículos de recolha, pertencentes aos municípios ou a empresas privadas, de modo continuado procedem à recolha dos resíduos depositados de forma a providenciar um serviço útil à população e ao meio ambiente.



(a) Ecopontos exteriores



(b) Ecoponto doméstico



(c) Ilha de ecopontos soterrados

Figura 1.1: Exemplos de alguns tipos de contentores disponíveis no mercado.

Idealmente quando os contentores se encontram cheios, deve-se proceder à recolha dos resíduos num curto período de tempo e periodicamente. Contudo, sem informação útil e em tempo real do nível de enchimento dos ecopontos, as empresas de recolha sentem várias dificuldades em definir quais as melhores estratégias, a nível de rotas e de gestão de recursos, a seguir, de modo a realizar-se uma recolha eficiente. Isto leva a uma recolha de resíduos em contentores que se encontravam vazios ou que não a justificavam, ou a uma recolha em contentores que já se encontravam cheios à algum tempo, podendo resultar em lixo deixado na zona circundante, podendo provocar impedimentos de circulação de veículos ou peões, ou até mesmo maus cheiros, além de criarem uma paisagem com mau aspecto.

Este tipo de situações levam a uma má gestão de recursos humanos e de equipamento por parte das empresas de recolha e representam perdas, visto que a principal fonte de receitas provém dos resíduos recolhidos com destino à reciclagem.

Equipamento, recursos humanos, manutenção e combustível representam gastos para as empresas de recolha. A título de exemplo pode-se referir que um veículo de recolha pode ter um consumo de 50-80 litros/100Km. Uma boa gestão destes

elementos é crucial no desempenho e produtividade de uma empresa, mas sem um apoio tecnológico, torna-se difícil estabelecerem-se rotas optimizadas para a recolha de resíduos bem como a gestão de equipamento e de colaboradores. A falta de informação e de um apoio tecnológico levanta também a dificuldade de se poderem dimensionar e projectar estrategicamente os locais para instalação de uma área de ecopontos, não permitindo assim garantir um acesso ao maior número de pessoas possíveis ou até ao sobredimensionamento da área.

Sem um sistema viável e robusto, com informação em tempo real da localização e nível de enchimentos de ecopontos, as melhorias de desempenho e qualidade por parte das empresas de recolha ainda estão longe de serem conseguidas. A plataforma Weco pretende portanto dar um contributo no sentido de ajudar as empresas de recolha à resolução de todas as limitações anteriormente descritas.

1.2 Enquadramento e objectivos

De forma a combater os problemas associados à recolha de resíduos urbanos, surge então a necessidade de uma plataforma de monitorização do nível de enchimento de ecopontos. Contudo esta ideia já não é nova, tendo sido desenvolvidas algumas abordagens no sentido de combater os problemas referidos, embora ainda com algumas limitações. Uma destas abordagens é o sistema Wise Waste, proprietário da SOMA.

Apesar do sistema Wise Waste apresentar uma boa solução para resolver os problemas anteriormente citados, apresenta ainda algumas limitações, tais como a necessidade da utilização de cabos para alimentação e/ou comunicação entre os vários elementos do sistema, o consumo energético do sistema de um ponto de vista global que pode ser reduzido e a impossibilidade de se utilizar o sistema em qualquer tipo de contentor existente no mercado. Este factor é importante, visto existirem no mercado inúmeros tipos de contentores e de não haver um único tipo usado a uma escala global. A necessidade da utilização de cabos dificulta a instalação do sistema em ecopontos soterrados (Figura 1.1c) que já se encontrem instalados e em funcionamento, visto ser necessário abrirem-se condutas para a instalação dos mesmos no interior do contentor. Este processo causa transtorno porque é necessário levantar a calçada na área circundante à área dos ecopontos e requer mão de obra extra. A utilização de cabos impede também a instalação do sistema Wise Waste em qualquer tipo de contentor, nomeadamente os contentores exteriores, visto estes serem por ve-

1.2. Enquadramento e objectivos

zes móveis, e porque a recolha dos resíduos neste tipo de contentores é feita com o auxílio de uma grua equipada no veículo de recolha, tal como ilustra a Figura 1.2, o que poderia levar à ruptura da cablagem.



(a) Veículo Haller X2c da SOMA



(b) Recolha de contentor com auxílio de uma grua

Figura 1.2: Recolha de contentor exterior com auxílio de uma grua.

Uma das limitações já referidas é a questão energética, visto os dispositivos instalados no interior dos contentores, utilizados na medição do nível de enchimento estarem constantemente ligados, mesmo que não se estejam a efectuar leituras. A implementação de um sistema de gestão energética deve garantir uma redução do consumo geral do sistema, garantindo assim uma maior autonomia.

De forma a aperfeiçoar o sistema actual, é proposto o sistema Weco, que além de garantir os requisitos do sistema actual, deve também introduzir outras novas funcionalidades, garantindo assim uma melhor gestão de equipamento e recursos, permitindo uma melhoria na optimização de rotas para os veículos de recolha e consequentemente reduzir o consumo de combustível, que representa uma grande parte dos custos associados ao processo de recolha. O redimensionamento e instalação de uma ilha ecológica com base na informação relativa à produção de resíduos de uma localidade e localização de outras ilhas ecológicas nas redondezas, passa a poder ser feito com uma maior eficácia, uma vez que a informação passa a estar disponível e acessível de forma simples e em tempo real. Por fim, é importante referir também que todos os custos associados à instalação e implementação do sistema devem ser considerados.

1.3 Estrutura da dissertação

No capítulo 1 desta dissertação é feita uma pequena introdução onde são apresentadas as motivações para a elaboração de um sistema de monitorização do nível de enchimento de ecopontos é descrita também a estrutura desta dissertação.

O Capítulo 2 pretende apresentar o estado da arte relativamente a algumas abordagens existentes que visam combater os problemas associados à recolha de resíduos urbanos, identificando as diferenças, limitações e falhas, já que algumas soluções ainda estão em fase de desenvolvimento e/ou testes e outras ainda numa fase prematura de aceitação. Refere ainda o estado da arte relativamente às *Wireless Sensor Networks* (WSN) e ao *standard* IEEE 802.15.4, visto ter sido necessária a implementação de uma arquitectura deste tipo no sistema proposto. Tendo em conta que o sistema de aquisição de dados sobre o nível de enchimento dos ecopontos será implementado num microcontrolador, é feito também um levantamento sobre sistemas operativos em tempo real existentes.

No capítulo 3 é feita uma análise da arquitectura do sistema actual, de modo a permitir o estudo sobre a integração da nova plataforma Weco. É feito um estudo sobre as tecnologias existentes no mercado que vão permitir a elaboração do sistema e são também apresentadas as justificações relativamente às várias escolhas tomadas. Após esta análise é descrita a arquitectura da plataforma Weco que pretende implementar o sistema proposto.

O capítulo 4 descreve a elaboração do sistema. É demonstrado o *hardware* desenvolvido, nas suas várias versões, bem como as decisões tomadas relativamente ao consumo energético. É apresentado também o *software* dos microcontroladores e aplicações de testes ao sistema, bem como o protocolo desenvolvido.

O capítulo 5 é dedicado à avaliação do sistema, no que diz respeito a testes de robustez e performance, protocolos de comunicações e consumo energético. São apresentados também alguns dos resultados obtidos através da implementação de um sistema deste tipo.

O capítulo 6 está reservado para as conclusões e trabalho futuro, onde são referidas as conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste projecto apresentando as suas vantagens relativamente a outros do género e ao sistema actual Wise Waste. Por fim são expostas outras sugestões para trabalho futuro que visam dar um contributo ainda maior no que diz respeito aos problemas associados à recolha de resíduos urbanos bem como outras aplicações possíveis do sistema.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Sistemas de monitorização

Neste capítulo serão apresentadas algumas soluções que actualmente estão a ser desenvolvidas e/ou em fase de estudo em Portugal e no estrangeiro. Isto permite ter uma melhor visão do panorama da limpeza urbana no que diz respeito a sistemas tecnológicos de suporte à actividade.

2.1.1 Monitorização de ecopontos no estrangeiro

A nível internacional já existem algumas abordagens à problemática, do ponto de vista tecnológico, da limpeza urbana. Nas secções seguintes serão apresentados alguns sistemas desenvolvidos, bem como as suas vantagens e desvantagens face à solução proposta.

Sistema SmartBin

O sistema SmartBin, proprietário da empresa Irlandesa M2M Telematics Ltd [3], recolhe a informação do nível de enchimento através de um sensor instalado no interior do contentor, que a envia via GPRS para um servidor *web* que depois a disponibiliza para aplicações de monitorização e gestão de forma a contribuir para uma recolha mais efectiva com gestão de recursos e optimização de rotas. A Figura 2.1 ilustra a arquitectura do sistema SmartBin.

A aplicação “Smart-Manager”, ilustrada na Figura 2.2 vai permitir então aceder à informação disponibilizada no *web server* de modo a fornecer serviços de monito-

2.1. Sistemas de monitorização

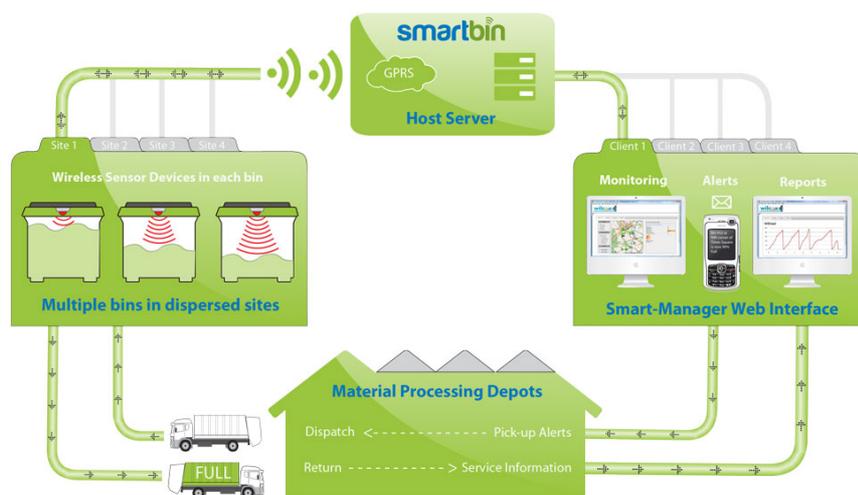


Figura 2.1: Arquitectura do sistema SmartBin.

rização, relatórios e avisos, via SMS e correio electrónico. Contudo estas funcionalidades ainda se encontram em desenvolvimento, estando portanto indisponíveis.

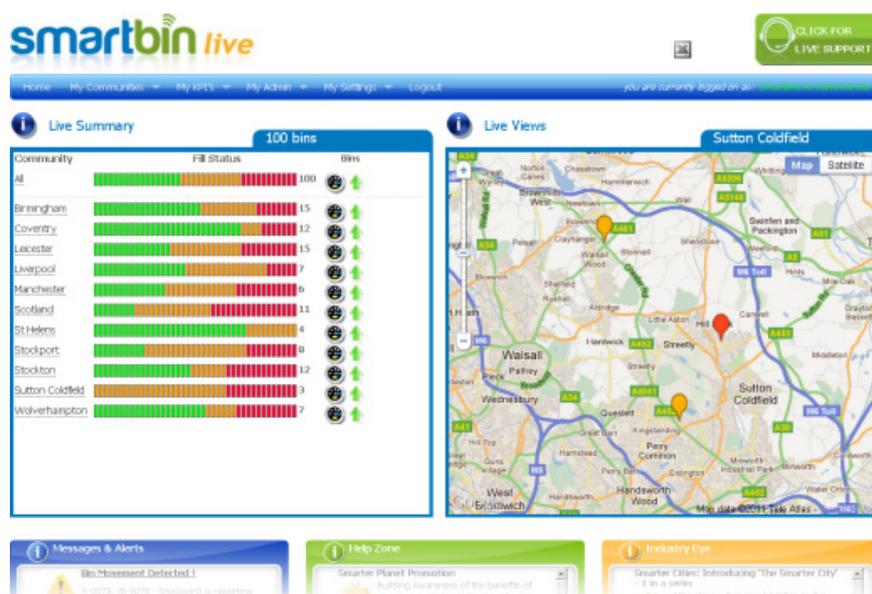


Figura 2.2: Aplicação Smart-Manager.

No que diz respeito aos sensores instalados no interior dos contentores, Figura 2.3, a oferta é variada, podendo ser adquiridos módulos com sensores de infra-vermelhos ou ultra sons, dependendo da aplicação desejada (sensores infra-vermelhos para con-

tentores de reciclagem e sensores de ultra sons para contentores de compactação). Os módulos apresentam também uma característica *wireless*, podendo apresentar uma autonomia de 1 ou 5 anos. Cada módulo de leitura está também equipado com um módulo GSM para envio dos valores recolhidos para o servidor *web*. Cada módulo instalado no interior dos contentores tem umas dimensões de $120\text{mm} \times 170\text{mm} \times 56\text{mm}$ e protecção IP65, podendo medir contentores com uma profundidade até 3 metros.



Figura 2.3: Sensor instalado no interior dos contentores

Avaliando o sistema de acordo com a informação disponibilizada, podem-se referir como vantagens o facto de o sistema ser *wireless* e poder ser também utilizado, à partida, em todo o tipo de contentores existentes. No entanto as dimensões da caixa e o facto de só medir profundidades até 3 metros, pode limitar a sua utilização em situações em que seja necessário calcular distâncias superiores a 3 metros e em situações com limitações de espaço. O sistema instalado no interior do contentor tem um índice de protecção IP65, o que limita o processo de lavagem do contentor. A utilização de um módulo GSM em cada módulo de leitura do nível de enchimento, traduz-se numa necessidade maior da utilização da rede móvel, significando um custo acrescido nas comunicações. Dado que os módulos GSM são um dispositivo dispendioso (o módulo utilizado pelo sistema *Wise Waste* custa cerca de 100€), e pelo facto de se utilizar um por ecoponto representa também um custo muito significativo na instalação do sistema. Relativamente aos sensores utilizados, o facto de serem sensores infra-vermelhos podem não apresentar medições exactas em determinados materiais, como por exemplo o vidro. Relativamente à autonomia de 1 ano oferecida num tipo de módulos com utilização interior, não parece ser um valor aceitável, levando à necessidade de substituir a bateria regularmente, acrescentando todas as desvantagens que advêm do processo de manutenção/substituição.

2.1. Sistemas de monitorização

Em resumo pode-se avaliar o sistema SmartBin como uma boa proposta, contudo aparenta ser um sistema de elevado custo de implementação e com algumas limitações. Alguns dos serviços anunciados ainda não estão disponíveis, ou seja o produto, nesta fase em que foi realizado este estudo, parece estar ainda numa fase de desenvolvimento.

Sistema SLX 1300

O sistema SLX 1300 (Figura 2.4), proprietário da empresa Suíça Swisslogix [4] e actualmente implementado na cidade de Zurique, apresenta também uma solução de monitorização do nível de enchimento dos ecopontos.



Figura 2.4: SLX 1300 da Swisslogix.

A arquitectura do sistema é semelhante à do SmartBin, uma unidade de aquisição de dados, apresentada na Figura 2.5a, contém uma sonda ultra-sónica para leituras do nível de enchimento, um módulo GSM para comunicação e envio de dados para aplicação remota, ilustrada na Figura 2.5b e são alimentados por uma bateria.



(a) Unidade de medição *wireless* do sistema SLX 1300



(b) Aplicação *web* do sistema SLX1300

Figura 2.5: Sensor e aplicação *web* do sistema SLX1300.

Cada unidade está dentro de uma caixa com um índice de protecção IP65 e apresenta as dimensões $220mm \times 120mm \times 90mm$. Apesar de poder ser usado em vários contentores disponíveis no mercado, um sistema destas dimensões dificilmente poderá ser instalado em todos os tipos de contentores existentes.

A Swisslogix apresenta aqui uma boa solução de apoio à recolha de resíduos urbanos, com uma autonomia por módulo sensorial de cinco anos e capaz de ser implementada numa grande variedade de contentores disponíveis. Contudo, as limitações estão presentes na caixa de elevadas dimensões e no facto de cada unidade apresentar um custo elevado, já que cada uma é constituída por um módulo de comunicações GSM, que aliado ao seu valor de compra, está também presente o custo do volume de informação trocada entre os elementos do sistema, que é maior quando se utiliza um módulo GSM por contentor, comparativamente à utilização de um módulo GSM por ilha de contentores. Contudo esta solução apresenta-se como a maior ameaça comercial ao sistema WiseWaste da SOMA.

Sistema Waste Edge

O sistema Waste Edge, proprietário da empresa Norte-Americana One Plus Corp [5], está patenteado (US 6.360.186) e pretende também dar um contributo ao panorama da monitorização do nível de enchimento de ecopontos. A arquitectura deste sistema é também composta por um conjunto de sensores equipados nos contentores e as informações vão sendo enviadas para um sistema centralizado que as recolhe e trata. No entanto este sistema está direccionado para os contentores de auto-compacção. A medição do nível de enchimento é feita através de um esforço mecânico que o compactador necessita para comprimir os resíduos. Quanto maior esse esforço maior é o nível de enchimento. Esta informação é então posteriormente enviada para um computador central que a processa. A Figura 2.6b ilustra o *interface web* do sistema.

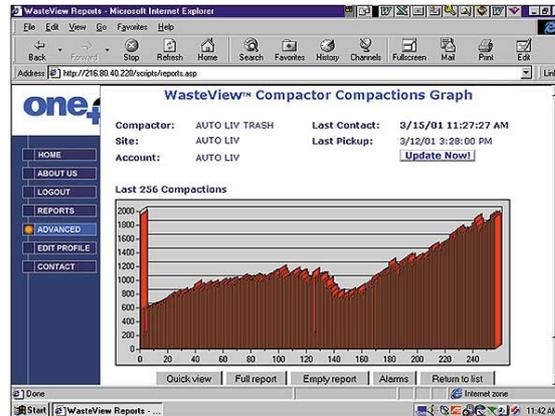
Este sistema oferece dois tipos de unidades de monitorização, uma sem fios (Figura 2.6) e outra semelhante mas com fios. A comunicação com o computador central é feita, na primeira unidade referida, através de um módulo GSM instalado no interior da unidade, e na segunda através da linha telefónica.

Este sistema apresenta portanto ter um alvo específico de contentores, não se enquadrando no objectivo desta dissertação. É também um sistema que também aparenta ser caro, devido aos custos associados à construção das unidades de monitorização, e que não é auto-suficiente do ponto de vista energético.

2.1. Sistemas de monitorização



(a) Unidade de medição wireless do sistema Waste Edge



(b) Aplicação web do sistema Waste Edge

Figura 2.6: Sensor e aplicação web do sistema Waste Edge.

Sistema Syren

O sistema Syren, Figura 2.7, da empresa francesa BH Technologies [6] apresenta uma arquitectura diferente relativamente aos sistemas anteriormente apresentados.



Figura 2.7: Sistema Syren da BH Technologies

As sondas ultra-sónicas (Figura 2.8) instaladas nos contentores recolhem valores do seu grau de enchimento e enviam, via *wireless* na banda ISM 868MHz, a informação para outros elementos da rede que estejam no alcance. Estes elementos repetidores, instalados nos postes de iluminação das ruas, vão enviando a informação de uns para os outros, numa topologia *multi-hop*, até esta chegar a um concentrador que reencaminha toda a informação, via GSM ou usando a rede telefónica fixa, para um servidor *web*, que a disponibiliza na internet para ser usada em prol da limpeza urbana (optimização de rotas, monitorização do nível de enchimento, etc.).



Figura 2.8: Sonda usada no sistema Syren da BH Technologies

A sonda usada neste sistema, apresentando uma característica *wireless*, é passível de ser instalada em vários tipos de contentores, enterrados ou exteriores, já que não recorre ao uso de cabos para alimentação nem comunicações. No entanto, após a sua instalação no contentor, parte da sonda fica localizada na parte exterior do contentor. O motivo desta localização deve estar relacionado com o alcance do sistema e a qualidade do canal *wireless*, pois como foi referido, esta solução usa repetidores para transmissão de dados até ao concentrador. O alcance destes dispositivos pode ir de 800 a 1000 metros em linha de vista, ficando limitado no máximo a 300 metros em meios urbanos. Relativamente à localização exterior da sonda, o sistema deixa de ser discreto, estando sujeito a actos de vandalismo. As maiores vantagens desta sonda são a autonomia mínima de 5 anos e o alcance que apresenta, podendo realizar medições até uma profundidade de 3,5 metros. Esta sonda está também protegida por um invólucro com um índice de protecção IP68.

Relativamente aos repetidores (Figura 2.9a), estes servem, para reencaminhar a informação recebida das sondas circundantes ou até mesmo de outros repetidores até ao elemento concentrador (Figura 2.9b). Estão instalados em postes de iluminação

2.1. Sistemas de monitorização

e têm um alcance entre 500m até 1000m, em condições ideais. Relativamente à autonomia o fabricante garante entre 5 a 10 anos, de acordo com o volume de dados transmitidos.

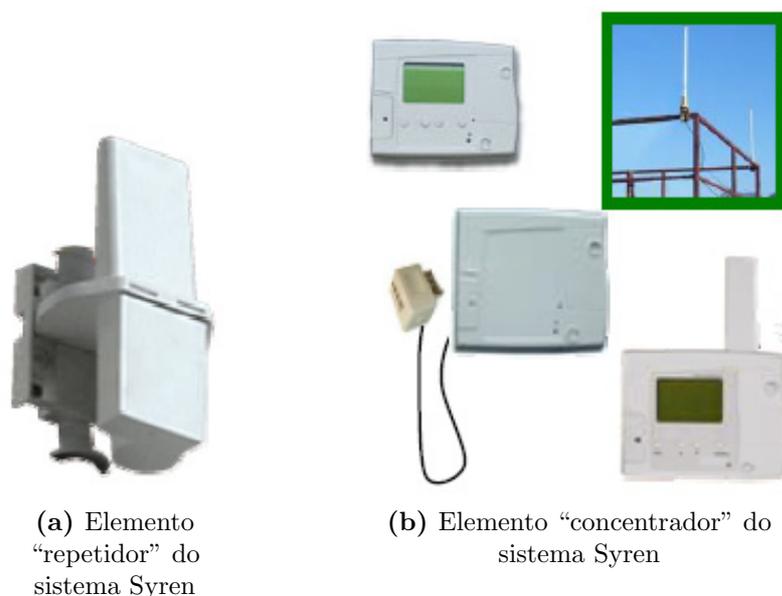


Figura 2.9: Repetidor e concentrador do sistema Syren

Contudo esta arquitectura de rede *multi-hop* tem uma grave limitação. Se um elemento intermédio falhar, os restantes elementos da rede que dependam dele, mesmo que apresentem normal funcionamento, deixam de poder enviar/receber informação. Outra desvantagem da escolha deste tipo de arquitectura reside no facto de serem necessários vários elementos em ramos da rede em zonas que necessitem longas distâncias, reflectindo-se num maior custo de instalação. Consequentemente, para longas distâncias, quantos mais elementos intermédios, maior é o risco associado à quebra do *link*, pois se um elemento falhar, os restantes passam a não poder comunicar com o resto da rede.

Relativamente ao concentrador, este recebe a informação dos elementos circundantes, entre 300 a 800 metros, e envia-a via GSM ou usando a rede telefónica pública para a aplicação remota (Figura 2.10). Mais uma vez a utilização deste tipo de arquitectura sofre do problema das redes *multi-hop*, uma vez que se os elementos circundantes não estiverem operacionais, o concentrador também não consegue operar, mesmo que não apresente qualquer problema.

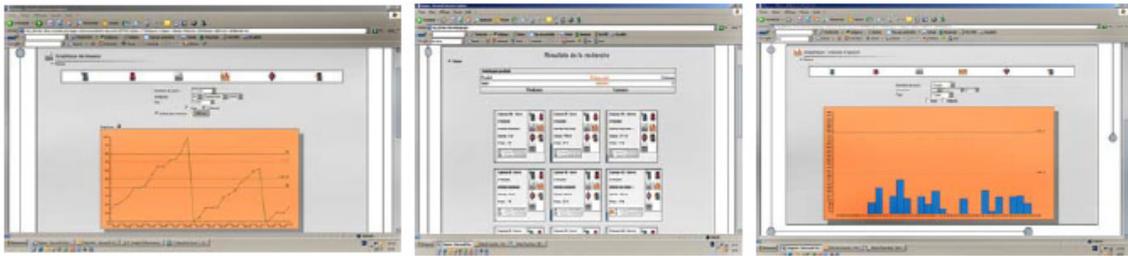


Figura 2.10: Aplicação remota do sistema Syren.

Sistema Emerald

O sistema EMERALD (Figura 2.11), pertencente à empresa irlandesa Green Diamond Technologies [7] garante um aumento de eficiência em 30%, e anuncia uma poupança anual de cerca de 1000€ por contentor. Este sistema está instalado e em funcionamento na cidade de Dublin, na Irlanda.

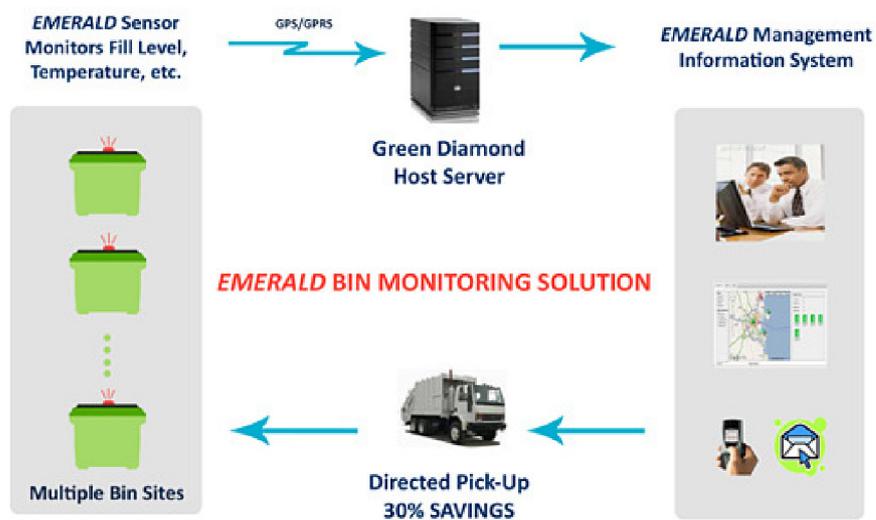


Figura 2.11: Arquitectura do sistema EMERALD

Relativamente ao funcionamento deste sistema apenas se conseguiu descobrir que os sensores também apresentam características *wireless*, enviando os dados recolhidos via GPRS para a aplicação *web* (Figura 2.12) que procede à recolha e tratamento dos dados.



Figura 2.12: Aplicação *web* do sistema EMERALD

Sem grande informação deste sistema, não se podem avançar grandes conclusões, contudo este sistema aparentemente apresenta características idênticas aos sistemas apresentados anteriormente.

2.1.2 Monitorização de ecopontos em Portugal

Relativamente ao panorama nacional, é importante referir o sistema Wise Waste da SOMA e o sistema Ecogest da Tecmic [8]. Relativamente ao sistema Wise Waste, visto ser a motivação que levou à escrita desta dissertação e ao desenvolvimento do sistema Weco, este será apresentado no próximo capítulo e será portanto analisado com maior detalhe.

Sistema *Ecogest*

O sistema *Ecogest* pretende, no panorama nacional, apresentar também uma solução de monitorização do nível de enchimento de ecopontos, em que os contentores estão equipados com um sensor (Figura 2.13a) que mede o nível de enchimento e esses são posteriormente enviados para uma aplicação remota (Figura 2.13b) que faz a gestão dos dados.

Contudo não foi possível obter detalhes sobre a arquitectura e funcionamento deste sistema, apenas se conseguiu apurar algumas críticas ao funcionamento do mesmo, que referem a falta de robustez. Segundo os relatos, as unidades de leitura do nível de enchimento não estavam preparadas para suportar as atmosferas corrosivas no interior dos contentores, estando sujeitas por vezes a corrosão na placa de circuito

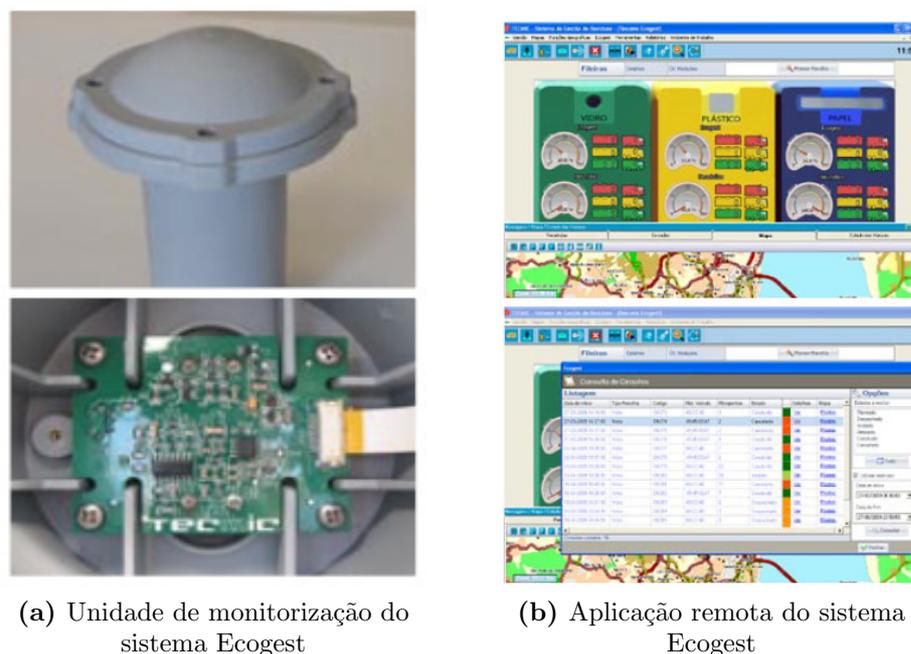


Figura 2.13: Imagens do sistema Ecogest retiradas da brochura comercial.

impresso, tornando-o inoperacional passado algum tempo. As temperaturas elevadas no interior dos contentores faziam com que os valores recolhidos pelos sensores fossem errados, e os mesmos ficavam facilmente danificados. Um dos problemas referidos é o facto de as sondas estarem localizadas numa zona do contentor sem protecção e susceptível a pancadas e choques. Em situações de contentor cheio, as pessoas por vezes continuam a introduzir resíduos no contentor forçando a entrada, e desta forma os resíduos podem tocar e danificar a sonda.

Em geral este sistema apresenta uma solução para a monitorização de ecopontos e gestão de frotas, contudo a solução ainda aparenta ter alguns problemas.

Sistema *Smart Containers*

Apesar de não se enquadrar muito bem no âmbito do sistema desenvolvido nesta dissertação, este sistema merece aqui algum destaque visto apresentar também um sistema de monitorização remota. O sistema *Smart Containers* [9], desenvolvido na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) pretende ser um sistema inteligente para recolha de óleos domésticos. Este projecto valeu à equipa de desenvolvimento o 4º lugar no concurso internacional “Imagine Cup” da Microsoft [10].

Smart Containers pretende monitorizar o nível de óleo doméstico, depositado num

2.1. Sistemas de monitorização

contentor, com destino à reciclagem. Quando o contentor se encontrar a um nível predefinido, este avisa a empresa de recolha que o mesmo se encontra pronto para se proceder à recolha. O sistema aparenta ter um sensor no interior do contentor, que envia informação via *wireless* para um servidor onde a aplicação *web* (Figura 2.14) regista e mostra a localização dos contentores cheios prontos para a recolha.



Figura 2.14: Aplicação *web* do sistema Smart Container

Todas as soluções aqui apresentadas revelam esforços no sentido de combater os problemas associados à recolha de resíduos urbanos. Contudo algumas ainda são soluções em fase de teste ou de protótipo, estando a ser testadas em cidades piloto. Foi possível apurar também que outras empresas, como por exemplo a BRAVAL - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A. [11], anunciam projectos que visam a recolha em tempo útil de informação relativa ao nível de enchimento de ecopontos, mas mais uma vez estes projectos ainda se encontram em fase de análise ou desenvolvimento.

Comparando o panorama internacional com o português, apercebemo-nos que no estrangeiro existem implementadas soluções robustas e em funcionamento, no entanto estas soluções apresentam algumas limitações consideradas relevantes, como o facto de serem soluções bastante dispendiosas incapazes de se introduzir no mercado nacional devido ao custo associado.

2.2 *Wireless Sensor Networks*

No contexto deste projecto é relevante estudar-se o estado da arte relativamente às redes de sensores sem fios, as *Wireless Sensor Networks* (WSNs) [12]. Os sensores a ser instalados no interior dos ecopontos apresentarão uma arquitectura sem fios, sendo portanto de extrema importância um pequeno estudo neste campo.

As WSN¹ são redes vocacionadas para a monitorização e controlo, onde nós sensoriais estrategicamente colocados procedem à monitorização e, se necessário, à actuação sobre o meio ambiente. Estes nós sensoriais são muitas vezes instalados em meios onde se torna impossível a instalação de cabos, sendo que uma arquitectura *wireless* é um factor importante.

2.2.1 Aplicações e características das WSN

Estas redes podem ter inúmeras aplicações [13] desde a monitorização de temperatura num dado local com detecção e alerta de fogo, tal como o sistema proprietário da Libelium [14] (arquitectura ilustrada na Figura 2.15), a aplicações em edifícios inteligentes com controlo de ventilação, temperatura, ar condicionado, de forma a permitir um consumo de energia mais eficiente.

Podem também ser aplicadas em pontes inteligentes capazes de avaliarem constantemente o estado da estrutura, nos automóveis para controlo da pressão dos pneus, no corpo humano para monitorização de sinais vitais, nas estradas para controlo de tráfego automóvel, em armazéns para rastreio de objectos, entre muitas outras aplicações.

Numa rede de sensores sem fios os nós podem ter dois tipos de papeis, nós fonte ou nós destino. Os nós fonte (*source*), tipicamente munidos de sensores, captam informação do ambiente e enviam para os nós destino (denominados *sink*) que a tratam, e podem também ter um papel de actuadores, controlando qualquer dispositivo com base na informação recebida.

Os nós podem ser instalados no meio ambiente de várias formas, podendo ser distribuídos aleatoriamente ao serem, por exemplo, largados de um avião (usado em situações de monitorização florestal), ou podem ser instalados em sítios previamente estudados e predefinidos. Alguns nós podem também ter uma função móvel podendo desta forma ter vários papéis activos na WSN.

¹Para todas as abreviaturas, ver o glossário na página xi.

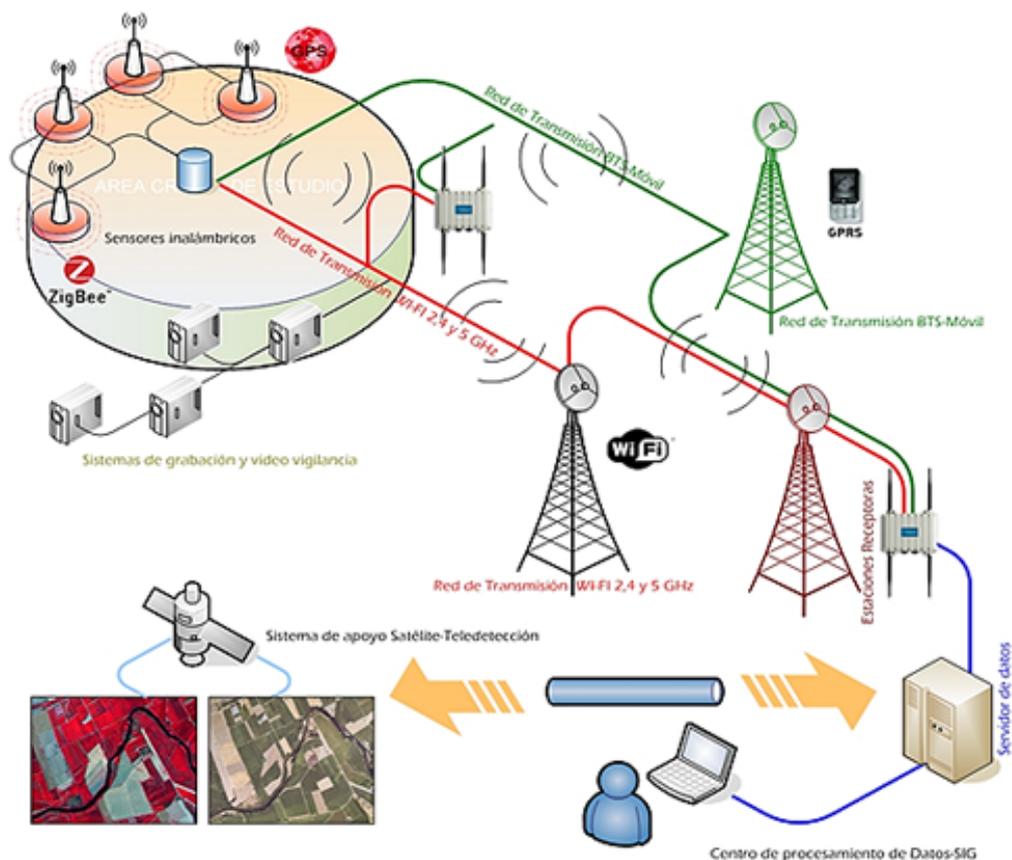


Figura 2.15: Arquitectura do sistema da Libelium, usado no combate a fogos florestais

As principais características destas redes são:

- Nós da rede podem cooperar de modo a atingir-se um objetivo comum;
- Geralmente apresentam baixas taxas de transmissão com pequeno volume de dados transmitidos, recorrendo o menos possível às comunicações;
- Baixa carga;
- Comunicações *multi-hop*;
- Baixo consumo energético, sendo um requisito um nó ter uma duração de alguns meses até alguns anos;
- Transmissões de curto alcance com protocolos eficientes de modo a permitir também uma melhor gestão energética;
- Dispositivos de baixa complexidade e custo;

- Funcionamento *ad-hoc*;
- Alta densidade de nós;
- Devem ser escaláveis;
- Auto-organizáveis.

Estas redes devem apresentar requisitos de *Quality of Service*(QoS), deve ser tolerante a falhas de modo a prevenir que a rede continua operacional mesmo que alguns nós falhem. Por vezes torna-se impossível, devido à localização, substituírem-se as baterias que alimentam os nós sensoriais, e desta forma são aplicados mecanismos de *energy harvesting*, onde os nós conseguem retirar energia do meio ambiente, por exemplo, através da luz solar, vibrações e/ou diferenciais térmicos. Outro requisito destas redes é a escalabilidade, ou seja, a rede deve poder suportar um largo número de nós, sem que os seus princípios básicos sofram alterações. A distribuição dos nós pela área de interesse, de acordo com a aplicação deve poder ser mais ou menos densa. Pode ser também um requisito da rede que os nós possam ser reprogramados remotamente, de forma a adaptar melhor as suas tarefas em função das alterações que o meio possa sofrer. Em diversas situações os nós da rede podem servir de intermediários de outros nós para atingirem o *gateway* da rede, funcionando numa arquitectura *multi-hop* (Figura 2.16).

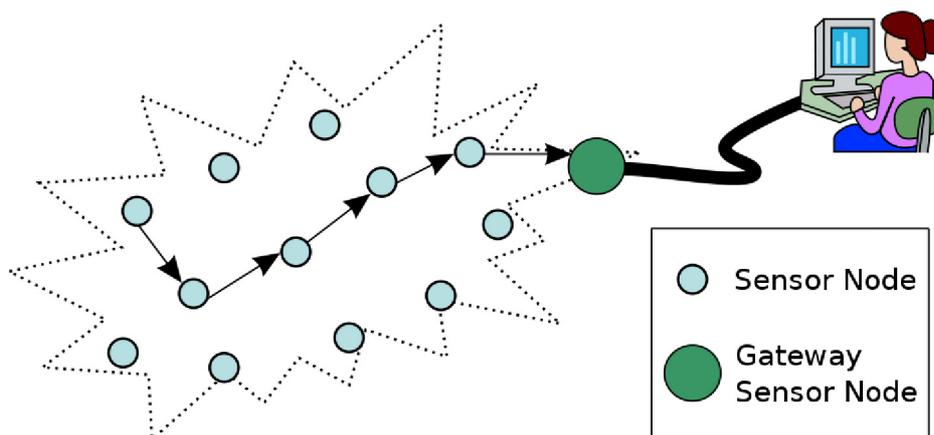


Figura 2.16: Arquitectura *multi-hop*, típica de uma rede de sensores sem fios

Grande da parte das aplicações destas redes de sensores sem fios exigem miniaturização de modo a poderem-se integrar estes sensores em quase todos os locais

possíveis e de modo a torná-los discretos, resultando por vezes em baixa complexidade e consequentemente baixo custo de implementação. Estes três factores são muito importantes dado que certas aplicações exigem uma elevada densidade de nós espalhados pelo meio ambiente.

2.2.2 Arquitectura de um nó sensorial

Um nó sensorial deve ser constituído por cinco principais componentes de modo a poder operar nas condições e requisitos anteriormente descritos:

- Microprocessador, microcontrolador;
- Transmissor RF;
- Sensores/actuadores;
- Memória;
- Fonte de energia

A Figura 2.17 ilustra a organização dos componentes necessários na arquitectura de um nó sensorial.

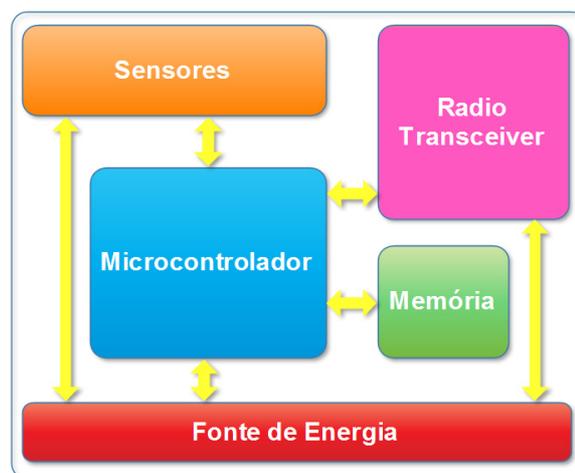


Figura 2.17: Arquitectura típica de um nó sensorial

Cada um destes blocos tem uma função importante no funcionamento de um nó sensorial, sendo que um dos mais importantes será a bateria, pois é desta que depende o funcionamento de todo o sistema, e dado que por vezes não há forma de a substituir,

toda a sua energia tem que ser usada de forma inteligente de modo a aumentar a sua eficiência. Desta forma, todos os outros componentes apresentam características *low power*, como é o caso do *transceiver RF* que possui vários modo de operação. Além dos modos normais de TX e RX, o modo *sleep* de um *transceiver RF* permite que este se desligue quando não está a enviar informação, e o modo *idle* permite desligar partes do mesmo quando não está a ser recebida qualquer informação através do canal de rádio. Exemplos destes dispositivos no mercado podem ser o CC1111 da Texas Instruments [15], o rfPIC12F675 (microcontrolador com *transceiver RF* integrado) ou MRF24WB0MA (*transceiver RF* para o *standard* IEEE802.15.4) da *Microchip* [16] ou o AT86RF230 (presente na placa de desenvolvimento *AVR Raven*, Figura 2.18) da Atmel [17], entre outros. A Texas apresenta soluções interessantes, pois organiza todos os componentes do nó sensorial num único *chip*, apelidado de *System-on-Chip*(SoC). Este tipo de dispositivos conseguem dimensões mais reduzidas e de baixo consumo energético em comparação com outros apelidados de *System-in-Package*(SiP), que apresentam os componentes de forma modular que se podem retirar ou acrescentar ao sistema, de forma a formar o sistema pretendido.

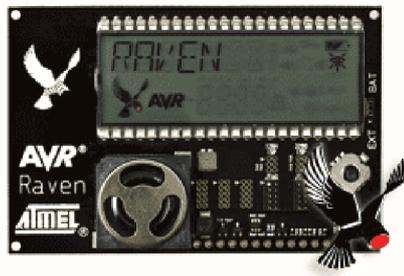


Figura 2.18: AVR Raven da Atmel que utiliza o *transceiver RF* AT86RF230

2.3 *Standard* IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15 é um grupo de trabalho que especifica os *standards* para as redes de área pessoal sem fios (PAN). Dentro do IEEE 802.15 existe o grupo de trabalho 4 que especifica a camada física (PHY) e a camada de controlo de acesso ao meio (MAC) para redes de área pessoal sem fios de baixo débito, originando o *standard* IEEE 802.15.4 [18].

Este *standard* pretende oferecer redes sem fios de área pessoal com baixos custos

2.3. Standard IEEE 802.15.4

de implementação, reflectindo um protocolo de comunicações e *hardware* simples, com baixos consumos de energia. A Figura 2.19 [19] ilustra uma pequena comparação [20], no que diz respeito à complexidade, consumo energético e taxas de transferência de dados de vários *standards* de redes sem fios de área pessoal (WPAN) e de área local (*Wireless Local Area Network*, WLAN).

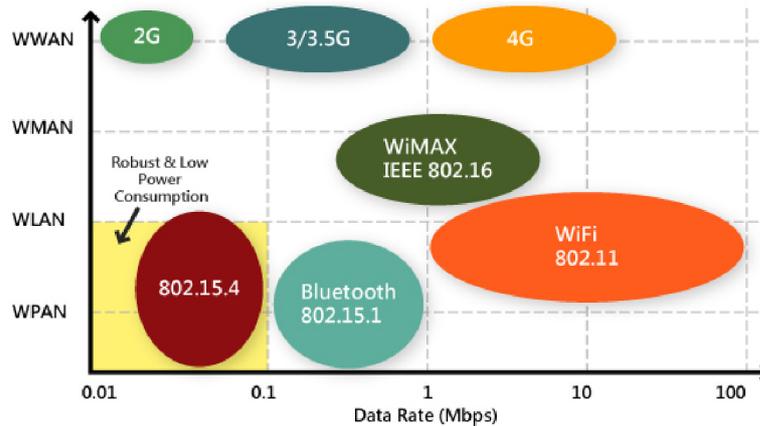


Figura 2.19: Comparação de *standards* de redes WLAN e WPAN relativamente ao consumo de energia e robustez. Fonte: *Advantech*

2.3.1 Camada física

A camada física especifica o serviço de transmissão de dados, controlando fisicamente o *transceiver RF* de modo a poder controlar o canal usado para transmissão de dados, bem como a potência do sinal emitido. Pode operar dentro de 2 bandas possíveis, não licenciadas, ilustradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Bandas de frequência e taxas de transmissão.

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chiprate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902-928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (optional)	868-868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902-928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (optional)	868-868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary Orthogonal
	902-928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

As gamas de frequência mais baixas, diferem devido a ser possível o seu uso em países com diferentes alocações do espectro, sendo 868MHz usado na Europa e 915MHz na América do Norte. A gama de frequência mais alta, 2450MHz pertencente à gama ISM (Industrial, Scientific and Medical) já apresenta compatibilidade a nível global.

Estas duas gamas de frequências diferem em vários aspectos, tais como as técnicas de modulação do sinal bem como os débitos de transmissão de dados. A revisão de 2006 do *standard* IEEE802.15.4 já permite um débito de 250kbps nas gamas 868MHz e 915MHz, idêntico ao da gama 2450MHz, o que torna estas gamas interessantes de usar em certas aplicações, tais como as *Body Sensor Networks* (BSN) que requerem os sensores perto do corpo humano.

Relativamente aos canais, existe um canal para a banda 868MHz e 10 canais, de 2MHz cada, para a banda de 915MHz. A banda de 2450MHz possui 16 canais com 5MHz de largura de banda cada.

2.3.2 Camada MAC

O protocolo MAC especifica o controlo de acesso ao meio, usando para isso duas técnicas, a *Contention-Based* que usa as técnicas do protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Colision Avoidance*) para evitar colisões, e a *Schedule-Based*, que através do mecanismo de *Guaranteed Time Slot* (GTS), utiliza alocação de *slots* de tempo para transmissão.

O protocolo especifica também dois tipos de nós da rede, os *full-function devices* (FFD) e os *reduced-function devices* (RFD). Os FFD podem operar como coordenadores de uma PAN, como também funcionar como nó. Podem também servir como encaminhadores de mensagens, caso a topologia o especifique. Os RFD devido às suas reduzidas capacidades apenas podem comunicar com FFD's e nunca podem assumir funções destes. Cada rede tem que ter, no entanto, pelo menos um dispositivo do tipo FFD de modo a poder operar.

Relativamente às topologias de rede, as redes podem ter uma topologia em estrela ou *peer-to-peer*, como mostra a Figura 2.20.

Na topologia em estrela, existe um coordenador para onde os dispositivos terminais enviam mensagens, funcionando este dispositivo como encaminhador e gestor da rede. Esta topologia de rede pode funcionar no modo *Beaconed Mode*, em que o coordenador envia periodicamente uma mensagem com indicação do funcionamento

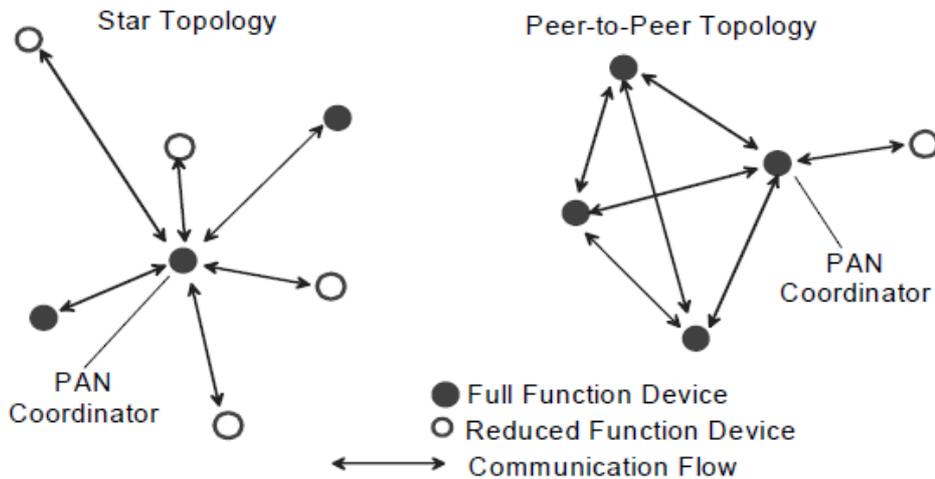


Figura 2.20: Topologias de rede. Fonte: *Standard IEEE 802.15.4*

da rede (como por exemplo os *time slots* alocados) e pode funcionar no modo *Non-beaconed Mode*, em que quando os nós necessitam de trocar informação com o coordenador usam o protocolo CSMA/CA. Neste modo de funcionamento o coordenador não pode entrar em modo *sleep* pois necessita de estar constantemente acordado para trocar mensagens com os nós terminais. No modo anterior, como existem períodos de tempo alocados, o coordenador pode entrar em modo *sleep* pois tem conhecimento dos períodos de transmissão.

Na topologia de rede *peer-to-peer*, qualquer dispositivo pode comunicar entre si, desde que estejam no alcance dos mesmos. Apesar de o *standard* não definir funções de *routing* é possível construírem-se redes complexas, do tipo *mesh* com comunicações *multi-hop*, em que dispositivos FFD desempenham funções de encaminhamento, sendo os dispositivos RFD os dispositivos terminais desta topologia. A especificação *ZigBee*, sendo um conjunto de *standards* de alto nível para comunicações sem fios baseados no *standard IEEE802.15.4*, define topologias de rede que permitem a utilização de funções de encaminhamento. A Figura 2.21 ilustra três topologias definidas nos *standards* do *ZigBee*, em estrela, em árvore e *mesh*.

Na topologia em estrela, tal como define o *standard IEEE 802.15.4*, o coordenador da rede é o nó central e está ligado a todos os nós *end device*. Todas as mensagens trocadas entre os elementos da rede passam pelo nó coordenador.

Na topologia em árvore o nó coordenador é o nó *root* da rede. Neste tipo de topologia é necessário haver pelo menos um nó FFD com funções de encaminhador

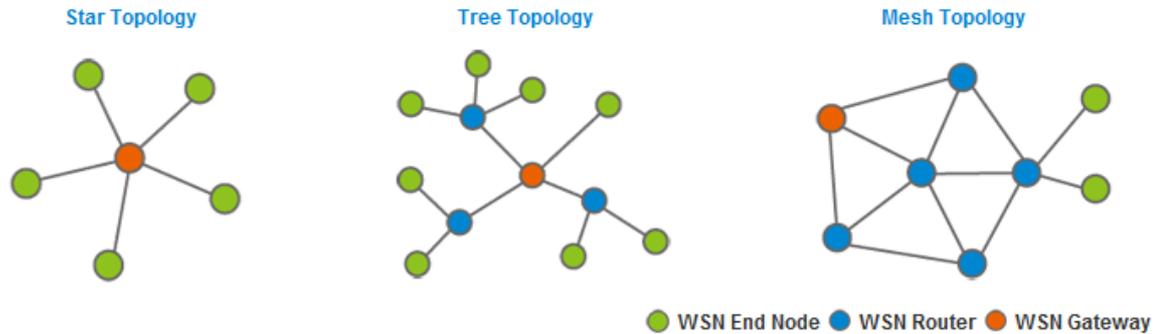


Figura 2.21: Topologias de rede do ZigBee. Fonte: Advantech

para encaminhar mensagens entre os nós. Ao contrário dos *End Devices*, os nós do tipo *router* nunca podem usufruir do modo *sleep* pois devem permanecer em funcionamento para encaminharem mensagens que podem chegar a qualquer altura. Para atingir o seu destino, uma mensagem entre *end devices* viaja pela árvore no sentido ascendente, e depois no sentido descendente, passando sempre pelos nós *router*. A desvantagem desta topologia é não apresentar rotas alternativas no caso de um *link* falhar.

A topologia *mesh* é idêntica à topologia em árvore, sendo o coordenador o nó *root* da rede, e precisa também de pelo menos um *router*. A diferença é que os dispositivos FFD, que implementam os *routers* podem comunicar entre si, desde que estejam no alcance, constituindo uma enorme vantagem já que podem apresentar rotas alternativas para as mensagens em caso de falha de um nó ou *link*.

2.4 Sistemas Operativos para microcontroladores

Nesta secção serão abordados sistemas operativos para microcontroladores, que sendo uma camada de alto nível, podem tirar partido do *standard* IEEE 802.15.4 para comunicações entre dispositivos. Estes sistemas operativos são minimalistas e foram já pensados para operarem em dispositivos com recursos reduzidos.

Exemplos destes sistemas operativos são o *TinyOS* [21], [22], o *Pixie* [23] e o *PARTOS11* [24].

O *TinyOS* é um sistema operativo *open-source* com alvo nas redes de sensores sem fios. Este sistema operativo está escrito na linguagem de programação *nesC* [25], uma linguagem derivada do C pensada nos limitados recursos dos dispositivos das

WSNs. Foi também desenvolvido com o intuito de ser usado nas *smartdust networks* em que vários nós são despejados numa área com o intuito de retirar informações da mesma (temperatura, luminosidade, vibrações, etc.) e cooperando entre si fazem a informação chegar a um coordenador central ou *gateway*.

Os programas para este sistema operativo são construídos a partir de componentes de software, dos quais alguns são *hardware abstracted*, ou seja independentes do *hardware*, estando ligados entre eles através de *interfaces*. O *TinyOS* fornece *interfaces* e componentes para as funções mais comuns tais como comunicações, *routing*, sensores, actuadores e armazenamento.

Pixie é um sistema operativo para WSNs que explora o modelo de *resource-aware programming*, onde as aplicações recebem *feedback* da utilização de recursos e tem controlo explícito sobre os mesmos. Isto permite que as aplicações possam alterar e adaptar o seu comportamento em função da disponibilidade de recursos e de carga. Este sistema operativo é orientado para aplicações que requerem grandes quantidades de dados (processamento, transmissão), como por exemplo monitorização acústica, sísmica, aceleração, etc. O sistema operativo *Pixie* é baseado no paradigma de programação *dataflow programming*, e é baseado no conceito de *resource tickets*, uma abstracção para a utilização de recursos, baseada na sua disponibilidade, e reserva dos mesmos. Este sistema operativo foi programado em *nesC* e garante compatibilidade, embora limitada, com o *TinyOS*.

Outro sistema operativo com utilização nas WSNs é o *PARTOS11*, um sistema operativo tempo real eficiente desenvolvido para microcontroladores com limitados recursos, tais como memória e velocidade de processamento. O tamanho do *kernel* é de 2KBytes e permite tarefas *hard* e *soft real-time* a correr concorrentemente. O escalonador do sistema operativo utiliza o algoritmo de escalonamento *rate-monotonic* para as tarefas *hard real time*, que garante que todas as tarefas atingem o seu tempo limite. Implementa também o modelo *Slack Sharing Service* (SSS), que consiste num servidor para tarefas de *soft real time* correrem conjuntamente com tarefas de *hard real time* num sistema embebido tempo-real limitado.

Outros exemplos de sistemas operativos existentes podem ser o *SenSpite OS* [26], o *Unison RTOS* [27] o *ACORN kernel* [28] ou o *FreeRTOS* [29]. Todos têm como alvo dispositivos de recursos limitados e pretendem apresentar uma solução minimalista de sistemas operativos para microcontroladores. Na consulta do estado da arte relativamente a este tema, todos os sistemas operativos mencionados mereceram a

mesma atenção e estudo, apesar de não apresentarem todos o mesmo destaque nesta dissertação. A utilização, ou não, de um sistema operativo já existente será decidida após análise da arquitectura proposta e das vantagens que pode ou não trazer, um sistema deste tipo, à plataforma de monitorização Weco.

2.5 Resumo

Neste capítulo foi apresentado o estado da arte relativamente a sistemas de monitorização do nível de enchimento de ecopontos ou sistemas relacionados com o panorama da recolha de resíduos urbanos, tanto em Portugal como no estrangeiro. Foi apresentado também um estudo das WSNs e do *standard* IEEE 802.15.4, uma vez que estão directamente relacionados com o desenvolvimento deste projecto. É também apresentado um resumo sobre sistemas operativos para microcontroladores, de forma a poder-se aferir posteriormente se será uma boa solução dotar os dispositivos da rede com *software* deste tipo.

Capítulo 3

Especificação do Sistema

Neste capítulo é feita uma descrição do sistema actual, bem como uma apresentação da plataforma Weco. É feita também uma análise dos componentes a usar, tais como o microcontrolador, a bateria, a sonda ultra sónica e uma protecção com um *IP Rating* adequado aos requisitos do sistema.

3.1 Solução Wise Waste

O sistema actual [30] apresenta a arquitectura ilustrada na Figura 3.1.

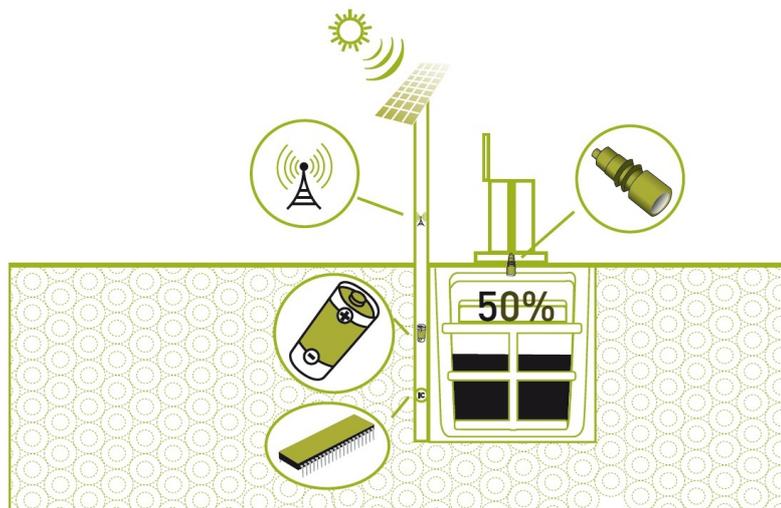


Figura 3.1: Organização do sistema Wise Waste

Cada ilha ecológica é composta por uma placa de processamento, alimentada por uma bateria, que é alimentada por um painel solar, e que fornece ao sistema uma tensão DC média de 12V. Esta placa de processamento é constituída por um micro-controlador, um circuito de medição da carga da bateria e um circuito de potência que alimenta as sondas e os restantes componentes do sistema. Cada ilha está equipada com um módulo GSM para as comunicações via TCP/IP por GPRS ou SMS, com o sistema remoto. Em cada contentor é instalada uma sonda de ultra-sons, que está ligada por fios à placa de processamento para alimentação e envio das amostras recolhidas relativamente ao nível de enchimento do ecoponto.

Este sistema, apresentando uma arquitectura local de comunicações com fios, impossibilita a sua utilização em qualquer tipo de contentor, sendo a sua utilização possível apenas nos contentores enterrados ou onde a instalação de cabos não impede o normal funcionamento do processo de recolha de resíduos.

Recolhidos os níveis de enchimento em cada ilha e enviados os dados para o *web server* via GPRS ou SMS através do módulo GSM, a aplicação *web* consultando o *web server*, representa num mapa vectorial (Figura 3.2) ou sobre um mapa com imagem de satélite (Figura 3.3), a ilha ecológica em questão com todas as informações relevantes, tais como a matrícula (identificador) da ilha, a data da última recolha, e o nível de enchimento de cada contentor.



Figura 3.2: Aplicação *web* com visualização de imagem vectorial de uma ilha ecológica e do nível de enchimento.



Figura 3.3: Aplicação *web* com visualização de imagem satélite de uma ilha ecológica e do nível de enchimento

3.2 Solução Weco

O sistema Weco pretende apresentar uma solução *wireless* de uma plataforma de monitorização do nível de enchimento de ecopontos que deve ser compatível com o sistema actual Wise Waste, introduzindo melhorias significativas e acrescentando algumas novas funcionalidades. Esta solução, com arquitectura ilustrada na Figura 3.4, deve ser implementada explorando as redes de sensores sem fios, de forma a poder cumprir os requisitos deste sistema.

Como requisitos do sistema enumeram-se:

- Deve ser simples e robusto, com baixo custo de implementação;
- Deve permitir fácil instalação e montagem de forma a poder ser facilmente instalado por pessoal técnico;
- Configurações do sistema devem poder ser feitas “*on the fly*” e remotamente;
- Deve possuir uma arquitectura *wireless* de muito baixo custo energético;
- Deve possuir *IP Rating* adequado (*standard* ANSI/IEC 60529-2004 [31]), já que a atmosfera no interior de um contentor é altamente corrosiva e está sujeita a

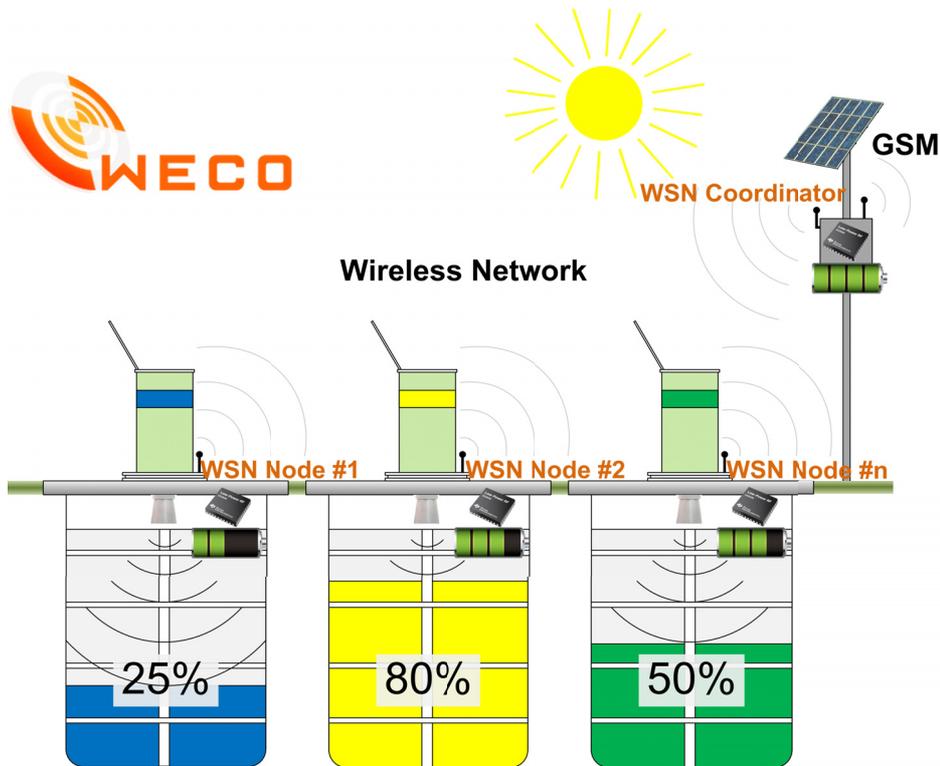


Figura 3.4: Arquitectura do sistema Weco

várias variações de temperatura e humidade;

- O custo global de fabrico do PCB e dos componentes necessários, sem a caixa com protecção IP, não deve ultrapassar o valor máximo de 50€. Este preço final é extremamente ambicioso tendo como objectivo ser o preço mais baixo do mercado;
- Deve ser fisicamente robusto. As sondas instaladas no interior dos contentores devem estar protegidas contra choques a que estes contentores estão constantemente sujeitos. Os contentores enterrados podem pesar mais de 1 tonelada e como a recolha é feita com o auxílio de uma grua, podem provocar danos elevados às sondas em situações de choque;
- Deve ser possível estar sujeito a lavagens de alta pressão (*IP Rating* adequado), já que os contentores estão sujeitos regularmente a um processo de lavagem;
- Deve ser energeticamente autónomo, pois a rede eléctrica muitas vezes não está acessível, pelo que a solução deve ser independente desta;
- Devido à sua natureza *wireless*, os módulos instalados no interior dos contento-

- res, alimentados por uma bateria, devem apresentar uma autonomia energética de pelo menos 6 anos;
- Deve ser possível a sua instalação em todos os tipos de contentores (interiores, exteriores, sejam estes enterrados ou não);
 - Deve ser possível uma fácil integração com o sistema actual, Wise Waste, de forma a minimizar os custos associados à instalação em ilhas ecológicas que já o estejam a utilizar.

O diagrama de blocos da Figura 3.5 ilustra todos os componentes do sistema e a forma como estão relacionados e conectados.

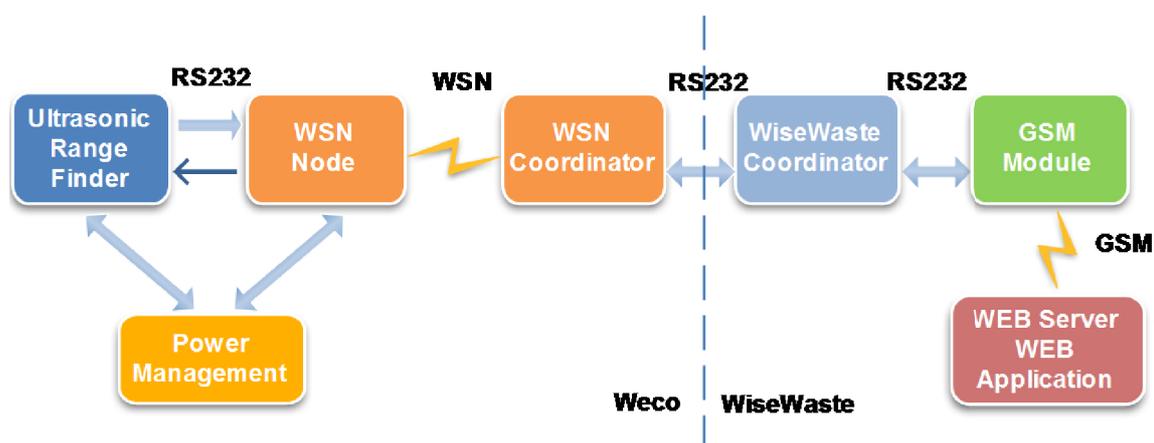


Figura 3.5: Diagrama de blocos de todo o sistema

Cada ilha ecológica deverá conter um nó sensorial por contentor seguindo o modelo de uma arquitectura de rede sem fios. Cada nó, equipado com sensores (para leitura do nível de enchimento do contentor, nível de bateria, etc.) é alimentado por uma bateria e deve implementar um modelo ou sistema de gestão energética de forma a garantir que não há desperdício de energia e que a longevidade de um nó cumprirá com os requisitos. As comunicações entre os vários elementos da rede, nomeadamente os nós e o coordenador, é feita via protocolo de comunicações *wireless*. Cada coordenador deve, por sua vez, comunicar com o sistema remoto (*web server*) através dos serviços de SMS ou GPRS, usando para isso um módulo de comunicações GSM.

3.3 Estudo e selecção dos componentes

Nesta secção são analisadas as tecnologias e alguns dos componentes adequados para a implementação da solução, nomeadamente o microcontrolador que vai implementar os elementos da rede, a bateria que vai alimentar os nós da rede, o índice de protecção *IP Rating* adequado para o invólucro que vai proteger o nó sensorial e a sonda de ultra-sons utilizada para a leitura do nível de enchimento do ecoponto.

3.3.1 Elementos da rede

Para implementar o controlador da rede, um dos componentes chave de um nó sensorial, optou-se pela utilização de um *System-on-Chip* (SoC) ao invés de se utilizar um microcontrolador ligado a um *transceiver RF*. A grande vantagem de um sistema destes face a um microcontrolador comum, reside no facto de estar tudo integrado num único *chip*, resultando num componente de dimensões mais reduzidas e com uma maior eficiência energética.

A selecção deste componente revelou-se importante devido às normas e restrições relativamente às regulações de ocupação do espectro radioeléctrico e também porque as frequências usadas apresentam diferentes vantagens e desvantagens. Desta forma tomou-se a decisão de se implementar a solução usando dois *SoCs* diferentes, explorando as duas bandas disponíveis no *standard* IEEE 802.15.4, 868MHz e 2450MHz. Desta forma será possível avaliar o comportamento dos dois dispositivos a operarem em frequências diferentes e também avaliar o desempenho e a ocupação destas duas gamas de frequências.

Texas Instruments System-on-Chip CC2530

Para avaliar a solução na gama de frequências de 2450MHz, optou-se por se utilizar um SoC da *Texas Instruments* [32], o CC2530 [33], tal como ilustra a Figura 3.6.

Este *System-on-Chip*, segunda geração dos SoC da *Texas Instruments* que veio substituir o SoC CC2430, foi concebido como uma solução *low power* para aplicações 2.4GHz do *standard* IEEE 802.15.4, RF4CE¹ e ZigBee.

¹RF4CE (*Radio Frequency for Consumer Electronics*) é uma especificação do *standard ZigBee* que define uma leve camada de rede baseada no *standard* 802.15.4 para controlar dispositivos electrónicos de consumo, tais como TVs, *Set-Top-Boxes*, leitores de DVD, controlos remoto, etc., substituindo a tecnologia tradicional por infra-vermelhos, permitindo o controlo sem que o dispositivo esteja em linha de vista.



Figura 3.6: *System-on-Chip CC2530 da Texas Instruments no package QFN40*

Com especial aplicação em redes de sensores sem fios, permite criar nós de rede robustos e de baixo custo de implementação pois com a integração de vários componentes num só *chip*, a quantidade de componentes requeridos é muito baixa. Permite programar a potência de sinal emitida, quando necessário, até uma potência de 4.5dBm. Devido às suas dimensões reduzidas ($6\text{mm} \times 6\text{mm}$ no *package* QFN40), permite também uma fácil integração em sistemas com limitações de dimensões.

Este SoC devido a sua natureza *low power*, e permitindo vários modos de operação diferentes, permite a sua utilização em aplicações que requerem soluções de muito baixo consumo energético. A Tabela 3.1, mostra as características dos vários modos de funcionamento deste dispositivo.

Tabela 3.1: Características *low power* do SoC CC2530

CC2530 Low Power Characteristics	
Active-Mode RX (CPU Idle)	24mA
Active Mode TX at 1 dBm (CPU Idle)	29mA
Power Mode 1 (4 μs Wake-Up)	0.2mA
Power Mode 2 (Sleep Timer Running)	1 μA
Power Mode 3 (External Interrupts)	0.4 μA
Wide Supply-Voltage Range	2V - 3.6V

O microcontrolador incluído neste SoC, arquitectura 8051 de alta *performance* e baixo consumo energético, está disponível com uma *flash In System-Programmable* ISP de 32, 64, 128 e 256 KB. É composto por uma RAM de 8KB com retenção de dados em todos os modos de operação, permitindo assim que em modos de baixo consumo energético os dados não se percam. O microcontrolador também tem suporte a *debug* por *software* permitindo assim um desenvolvimento mais rápido e eficiente.

Equipado com um *IEEE 802.15.4 MAC Timer*, *timers* genéricos (um de 16bit e 2 de 8bit), com uma implementação do protocolo CSMA/CA, com monitorização do nível de bateria e sensor de temperatura, ADC de 12 bit com 8 canais de resolução

3.3. Estudo e selecção dos componentes

configurável, co-processador com mecanismos de segurança AES, duas USARTs com implementação de diversos protocolos série, 21 pinos ($19 \times 4mA$ e $2 \times 20mA$) de uso genérico (GPIO - *General Purpose Input/Output*), e *Watch Dog timer*, este SoC revelou-se ser uma boa escolha para implementar o sistema proposto na gama de frequências de 2450MHz.

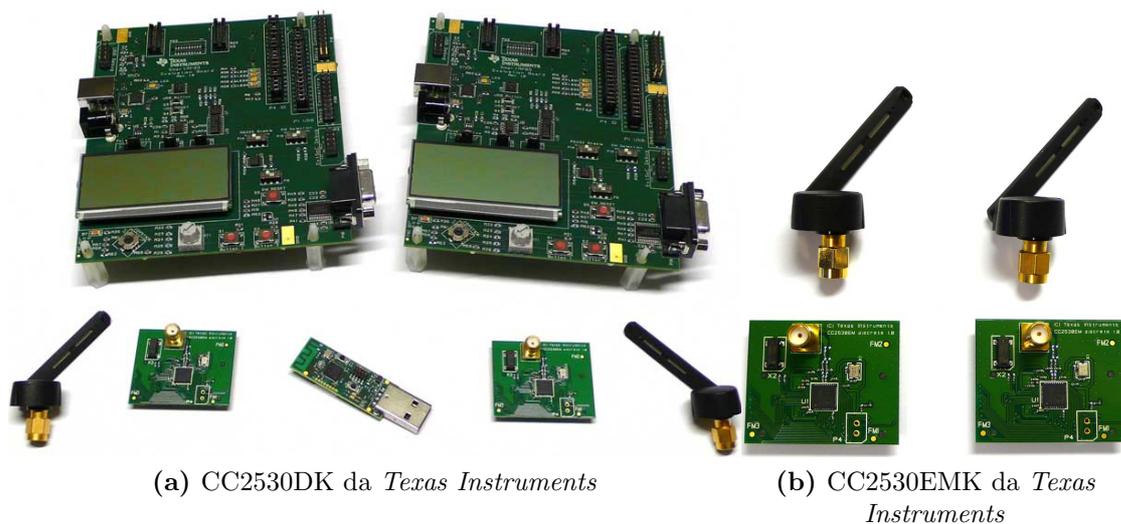


Figura 3.7: Kits de desenvolvimento CC2530DK e CC2530EMK da *Texas Instruments*

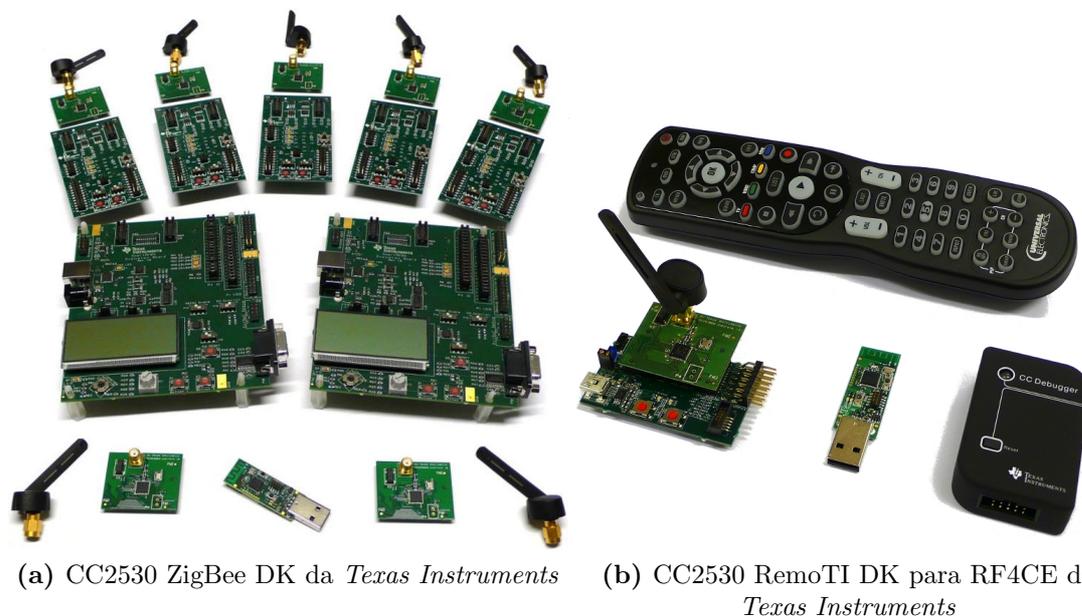


Figura 3.8: Kits de desenvolvimento CC2530ZDK e CC2530RemoTIDK da *Texas Instruments*

O desenvolvimento de soluções neste SoC também se torna mais fácil devido às ferramentas de desenvolvimento disponíveis: CC2530DK [34] e CC2530EMK [35] (Figura 3.7), CC2530 ZigBee DK [36] (Figura 3.8a), CC2530 RemoTI DK para RF4CE [37] (Figura 3.8b), *SmartRF software* e um *packet sniffer*, desenvolvidas pela *Texas Instruments*.

Este SoC, CC2530, vai ser usado para implementar os nós da rede bem como o coordenador da mesma. O baixo custo deste dispositivo faz com que a sua utilização não esteja limitada, não havendo a preocupação de se usar um dispositivo com características *low power* e funcionalidades de *deep sleep*, por vezes mais caro, para implementar os nós da rede, e um dispositivo diferente para implementar o coordenador. Isto porque o coordenador da rede em certas arquitecturas e topologias não tem a possibilidade de entrar em modo *sleep*, tendo que estar constantemente acordado à espera de pacotes proveniente de outros elementos da rede. Não tem também limitações no fornecimento de energia, sendo por isso os modos de *sleep* um requisito descartável. Deste modo, por vezes, é possível implementar diferentes elementos da rede, com diferentes funções, em diferentes sistemas de processamento, permitindo assim redução de custos na implementação de toda a rede.

Enocean *System-on-Chip* STM300 e TCM300

Para a implementação dos nós da rede de sensores sem fios, na gama de frequências dos 868MHz, optou-se por usar microcontroladores de outro fabricante. Desta forma consegue-se testar as duas gamas de frequência oferecidas pelas WSNs e ao mesmo tempo consegue-se também testar dois SoCs com microcontroladores distintos, ambos direccionados para aplicações *low power* de redes de sensores sem fios.

Para esta gama de frequências, 868MHz, usaram-se dois módulos programáveis para redes de sensores sem fios da *Enocean* [38], o módulo TCM300 [39] e o STM300 [40], ilustrados na Figura 3.9.

A *Enocean* tem dedicado esforços em desenvolver tecnologia para redes de sensores sem fios para aplicações industriais e de domótica. Os produtos desenvolvidos, tal como os módulos aqui referidos, são em grande parte orientados à utilização em ambientes onde o conceito de *energy harvesting* (recolha de energia do meio ambiente por parte de dispositivos electrónicos) pode ser aplicado. A Figura 3.10 ilustra o princípio de funcionamento de uma arquitectura de rede sem fios *Enocean*. Os módulos programáveis, apresentando num único circuito integrado um microcontrolador e *trans-*

3.3. Estudo e selecção dos componentes

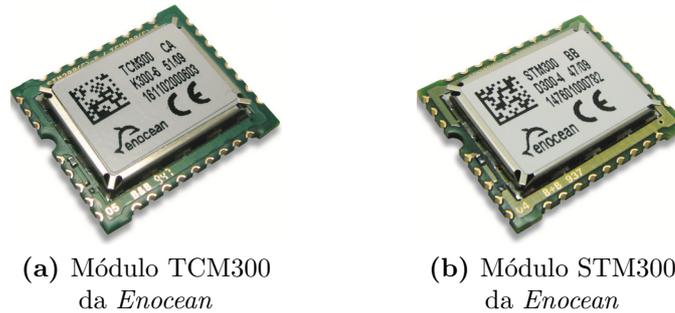


Figura 3.9: Módulos programáveis para redes de sensores sem fios da *EnOcean*

ceiver RF, entre outros componentes, tal como o SoC CC2530, providenciam uma boa utilização em ambientes onde é necessário implementar uma rede de sensores sem fios. Apesar de apresentarem um custo elevado, comparando com o SoC CC2530 da *Texas Instruments*, estes módulos possuem uma certificação CE, cumprindo as directivas: *Electromagnetic Compatibility Directive 2004/108/EC* [41], *Low-Voltage Directive 73/23/EC* [42] e a directiva *Radio and telecommunications Terminal Equipment Directive R&TTE 1999/5/CE* [43], que dizem respeito à frequência de 868MHz e à caracterização dos dispositivos em relação à sua utilização em ambientes *wireless* na gama pública do espectro radioelétrico em meios industriais. Isto representa uma grande vantagem pois reduz à solução final o custo associado à obtenção obrigatória da certificação CE.

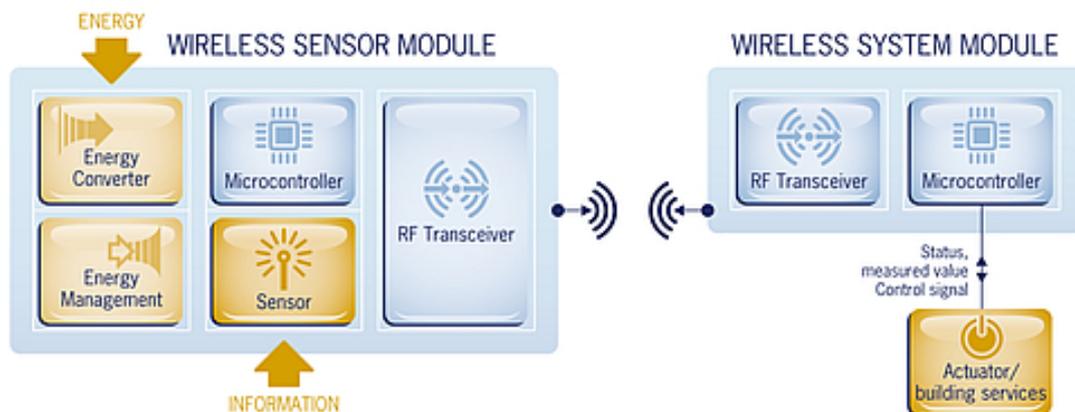


Figura 3.10: Solução *wireless* e *energy harvesting* para redes de sensores da *EnOcean*

Tabela 3.2: STM300/TCM300 Technical Data

STM300/TCM300 Technical Data		
	STM300	TCM300
Antenna	50 Ω antenna mountable	
Frequency	868.3 MHz	
Radio Standard	EnOcean 868 MHz	
Data rate/Modulation type	125 kbps/ASK	
Receiver Sensitivity (at 25°C)	typ. -96dBm	
Conducted Output Power @50 Ω min/typ/max	3.0dBm/5.7dBm/7.0dBm	
Power Supply	2.1V-4.5V, 2.6V needed for start-up	2.6V-4.5V
Current Consumption	Deep Sleep mode: typ. 0.2 μ A (if available) Transmit mode: typ. 24mA, max. 33mA Receive mode: typ. 33mA, max. 43 mA	
Start-up time	—	< 500ms
Wake Inputs	2	—
Input Channels	4x digital input, 3x analog input Resolution: 3x 8bit or 1x 10bit, 1x 8bit, 1x 6bit	
I/Os	Up to 16 configurable I/Os	Up to 14 configurable I/Os
Radio Regulations	R&TTE EN 300 220	
PCB Dimensions	22 x 19 x 3.1 mm	
Weight	1.9g	

Os módulos STM300 e TCM300 apresentam características muito idênticas, Tabela 3.2, sendo que a diferença reside no facto da aplicação alvo destes módulos ser diferente. São compostos por um microcontrolador 8051 com 32KB de *Flash* e 2KB de SRAM. com relógio de 16MHz.

Os módulos STM300 podem ser usados como nós sensoriais de uma rede de sensores sem fios em que, devido às características destas, os nós necessitam de modos *low power*, nomeadamente modos de *sleep* para poderem aumentar substancialmente a sua longevidade de acordo com o método usado para fornecimento de energia (bateria ou *energy harvesting*). Os módulos TCM300, são muitas vezes usados como coordenadores ou *RF repeaters* na rede de sensores sem fios, estando otimizados para o efeito, pois estes elementos da rede não podem geralmente entrar em modo de poupança energética, ao contrário dos módulos STM300, não possuem características

3.3. Estudo e selecção dos componentes

de *wake up* do modo *deep sleep* (apenas possuem modos de *power down*), pois nos STM300 esta funcionalidade é conseguida através de 2 pinos externos, o que permite um esquema de poupança energética mais eficiente. Desta forma podem-se também usar módulos distintos na plataforma Weco, SoCs mais complexos para implementar o elemento coordenador da rede (FFDs) e os menos complexos para implementarem os nós sensoriais (RFDs), visto haver uma diferença de preço substancial entre estes dois módulos.

No que diz respeito ao desenvolvimento, estão disponíveis vários *kits* e ferramentas que facilitam o desenvolvimento de aplicações para estes módulos. A Figura 3.11 ilustra o *kit* EDK300 [44] da *EnOcean*.

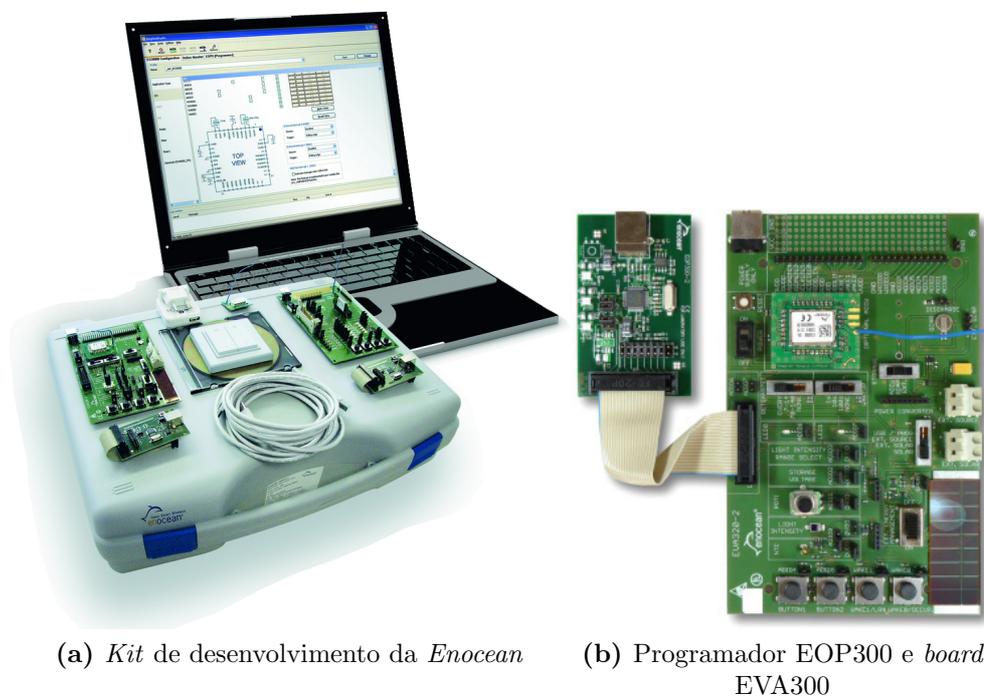


Figura 3.11: Kit de desenvolvimento EDK300 para os módulos da *EnOcean*

3.3.2 Baterias

Um dos desafios deste sistema, e recorrendo a uma arquitectura de rede de sensores sem fios, é o facto de os nós serem alimentados por uma bateria. Neste ponto do projecto foi necessário um pequeno estudo sobre que bateria usar, nomeadamente ao tipo de tecnologia e ao tipo de bateria. Recarregável (também designada por secundária), ou descartável (primária). As características da bateria, que cumpra os

requisitos do sistema, não se podem avaliar nesta fase sem primeiro se obterem dados acerca do consumo energético do mesmo.

Tabela 3.3: Comparação de *performance* entre vários tipos de baterias recarregáveis

Performance Comparison of various Rechargeable Batteries					
Parameters	Lead acid	Ni-Cd	Ni-M-H	Liquid Li-Ion	Polymer Li-ion
Voltage (V)	2	1.2	1.2	3.6	3.6
Weight energy density (Wh/Kg)	35	50	80	125	170
Volume energy Density (Wh/l)	80	150	200	320	400
Cycle life (times)	300	500	500	800	1000
Self discharge (%/ month)	0	25-30	30-35	6-9	2-5
Electrolyte state	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Polymer Gel
Min. thickness	> 10mm	> 3mm	> 3mm	> 3mm	< 1mm
Memory effect	no	yes	no	No	No
Pollution	yes	yes	No	No	No
Production cost	lowest	Low	middle	High	Middle
Advantages	High drain current and low cost	Middle drain current and low cost, smaller volume	Middle drain current and cost, higher capacity	higher capacity and lighter weight	Highest capacity, lighter weight and flexible shape
Disadvantages	Too heavy	Environmental not friendly	Higher self-discharge and weight	Low drain current and higher cost	Low drain current and very high cost
Applications	Car and lighting	Power tool, cordless phone and emergency lighting etc.	Toy, PDA, MP3 and digital camera etc.	Cellular phone and laptop computer	Laptop computers

A primeira decisão a tomar passa por determinar se se deverá utilizar uma bateria descartável ou recarregável. As baterias descartáveis são normalmente usadas em aplicações em que a descarga será feita de forma muito lenta e onde a sua utilização não é regular. Como o *self-discharge rate*² nestas baterias é muito baixo, a mesma pode manter a carga por longos períodos de tempo. As baterias recarregáveis são direccionadas para aplicações de utilização mais frequente onde o seu uso corrente

²Fenómeno de auto descarga de uma bateria mesmo quando não existe nenhuma ligação entre os seus eléctrodos. Este fenómeno reduz o tempo de vida da bateria mesmo sem esta ter sido usada e as altas temperaturas desencadeiam-no mais rapidamente.

3.3. Estudo e selecção dos componentes

implica vários ciclos de carga/descarga, como por exemplo um leitor de ficheiros de música portátil ou computadores portáteis. Estas baterias apresentam um *self-discharge rate* maior que as descartáveis que dependendo da tecnologia pode variar entre 2% até 35%. A Tabela 3.3 [45] mostra uma comparação entre várias tecnologias usadas em baterias recarregáveis.

Como se pode concluir pela tabela, as baterias de *Lithium Polymer* apresentam uma taxa de *self discharge* muito baixa e recorrendo à Figura 3.12, que ilustra a densidade de energia das várias tecnologias usadas no fabrico de baterias, é notório que estas baterias são actualmente a melhor opção, pois apresentam uma maior densidade energética, resultando numa maior durabilidade da bateria para o mesmo tamanho, comparativamente com outras baterias.

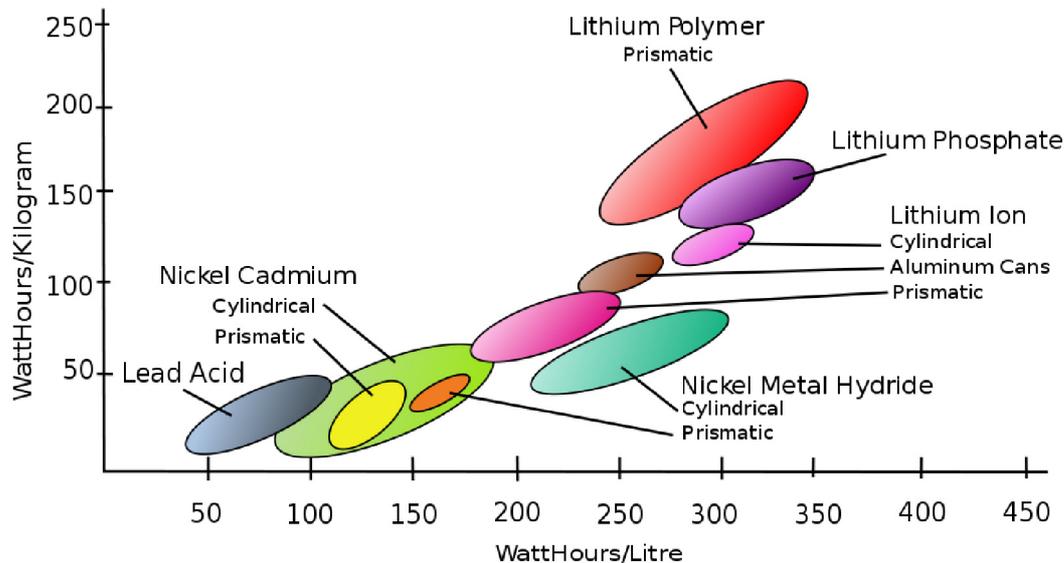


Figura 3.12: Comparação da densidade de energia dos vários tipos de baterias existentes

Relativamente ao tipo de bateria a usar, optou-se por se usar uma bateria descartável de iões de lítio, pelas seguintes razões:

- Custo de uma bateria descartável muito inferior a uma bateria recarregável;
- Para aplicação em questão (arquitecturas de WSNs) é adequada a utilização de uma bateria descartável;
- A localização e composição de um nó sensorial localizado no interior do contenedor dificulta a substituição da bateria recarregável, e como estas descarregam

mais rapidamente seria uma tarefa de manutenção a acrescentar ao sistema, que com a instalação de um grande número de nós espalhados pelas várias ilhas ecológicas, representaria um custo de manutenção elevado;

- A dificuldade de instalar um sistema de carga para as baterias recarregáveis implicaria a colocação de um painel solar no exterior do contentor, não trazendo nenhuma vantagem ao sistema pois seria necessária instalação de cabos. É importante salientar que o objectivo principal do sistema é apresentar uma arquitectura sem fios e uma decisão deste tipo traria também custos adicionais ao sistema.
- As taxas de *self-discharge* das baterias descartáveis são muito inferiores às das baterias recarregáveis;
- A longevidade da bateria deve ser de pelo menos 6 anos (requisito do sistema), pelo que uma bateria descartável será sempre a melhor opção.

Dos vários fabricantes de baterias para aplicações industriais, tais como a Sanyo [46], a Sharp [47] ou a Varta [48], o fabricante escolhido foi a *Saft Batteries* [49], devido a utilizações anteriores bem sucedidas de baterias deste fabricante. Dedicada ao fabrico de baterias de alta tecnologia e de elevado nível de qualidade e robustez, a *Saft* oferece uma vasta gama de baterias (descartáveis e recarregáveis) para todo o tipo de aplicações. Para a aplicação em causa escolheu-se uma bateria da gama LS [50] (Figura 3.13). Estas baterias, segundo o fabricante são especialmente desenhadas para aplicações de automação industrial, alarmes e soluções *wireless*, GPS, aplicações militares de comunicações rádio, telemetria, etc.



Figura 3.13: Gama de baterias LS ($Li - SOCl_2$) da *Saft Batteries*

3.3. Estudo e selecção dos componentes

Estas baterias são construídas recorrendo a tecnologia *Lithium-thionyl chloride* ($Li - SOCl_2$). Este tipo de baterias são compostas por um ânodo de lítio metálico (o mais leve de todos os metais) e um cátodo líquido composto por um colector de corrente poroso em carbono preenchido com cloreto de tionila ($SOCl_2$). Estas baterias oferecem uma tensão de 3.6V aos seus terminais numa única célula que pode variar entre os formatos 1/2AA até D. Este factor é importante pois usando uma única célula consegue-se reduzir o espaço de todo o nó sensorial, já que este componente costuma ser o maior ou o que ocupa maior volume. As baterias de $Li - SOCl_2$ apresentam uma alta densidade energética, podendo algumas versões atingir 1220 Wh/L (Watt Hora por litro) e 760 Wh/kg (Watt/hora por Kilograma).

Esta gama oferece baterias de 3.6V com várias capacidades disponíveis. A bateria final só será escolhida após os testes de consumo a efectuar aos vários protótipos a desenvolver. Contudo, para efeitos de teste, optou-se por se escolher uma bateria recarregável, a bateria 3VTD70 (Figura 3.14) da *Saft Batteries*. O facto de ser recarregável pode permitir o seu uso mais que uma vez, que para efeitos de teste ao sistema torna-se muito útil.



Figura 3.14: Bateria recarregável 3VTD70 da *Saft Batteries*

É importante referir que esta bateria, sendo de tecnologia diferente da gama LS escolhida, é usada apenas para testes de consumos de corrente, pelo que taxas de *self-discharge* não foram consideradas, porque como é sabido, são maiores neste tipo de baterias. Os factores aqui considerados foram a temperatura de funcionamento, a capacidade da bateria e a corrente de descarga máxima. Com estes valores é possível escolher uma bateria da gama LS idêntica sem ser necessário recorrer a testes em todas as baterias da gama LS existentes. Posteriormente a bateria escolhida será sujeita a todos os testes possíveis de forma a assegurar o seu funcionamento no sistema

proposto. Esta bateria recarregável serve meramente para orientação na escolha da bateria final. As características da bateria 3VTD70 [51] estão ilustradas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: 3VTD70 Battery Characteristics

Battery Characteristics	
Nominal capacity	4000 mAh
Nominal voltage	3.6 V
Typical impedance(1000Hz)	6mΩ
Charge Current	Standard: 400mA Permanent: 200mA Trickle: 100-200mA
Charge Duration	16h
Discharge Current	
Maximum continuous current	14A
Max Peak(< 1s)	150A
External Height:	65mm
External Width:	98mm
External Depth:	35mm
Typical weight	411g

De forma a garantir o bom funcionamento desta bateria e a garantir a sua carga total, a bateria será carregada usando o método de *trickle charging*, que significa carregar a bateria com uma taxa idêntica à sua taxa de *self-discharge*. Neste caso e segundo as especificações do fabricante deve ser com uma corrente entre 100 a 200mA. Este método deve ser usado com precaução pois se a taxa de carga for maior que a de *self-discharge*, ou se a bateria não for desligada pelo carregador no fim de estar totalmente carregada, esta pode sofrer graves danos ficando inutilizável ou com comportamentos fora do normal para este tipo de baterias.

3.3.3 Ingress Protection Rating

O IP Rating, definido na norma IEC 60529-2004 consiste num código de classificação do nível de protecção de um determinado material contra a intrusão de objectos sólidos, incluindo partes do corpo humano (tais como as mãos e os dedos), pó, contactos acidentais e até mesmo água. Este código, consiste em duas letras, IP, seguido de um ou dois números que correspondem à classificação atribuída, e pode ainda ter uma letra, opcional, no final. O objectivo deste *standard* é fornecer informação detalhada ao consumidor acerca de determinado produto em vez de apenas referir termos como, por exemplo, “à prova de água”.

3.3. Estudo e selecção dos componentes

Tabela 3.5: Sólidos, *IP Rating*. Tabela retirada do *standard* ANSI/IEC 60529-2004.

Nível	Tamanho do objecto	Protegido contra
0	Sem protecção	Nenhuma protecção contra o contacto e entrada de objectos
1	> 50mm	Contacto accidental com as mãos
2	> 12.5mm	Contactos com dedos ou outros objectos similares
3	> 2.5mm	Ferramentas, fios, etc.
4	> 1mm	fios, ferramentas, pequenos parafusos, etc.
5	À prova de poeiras	Total protecção contra o contacto, no entanto pequenas poeiras podem entrar.
6	Totalmente à prova de poeiras	Total protecção contra contacto e poeiras

Tabela 3.6: Líquidos, *IP Rating*. Tabela retirada do *standard* ANSI/IEC 60529-2004.

Nível	Protegido contra	Teste	Detalhes
0	Sem protecção	—	—
1	Gotas de água	Quedas de gotas de água verticalmente	Duração do teste: 10min Água equivalente a $1mm^3$ de chuva por minuto
2	Gotas de água	Quedas de gotas de água sobre o invólucro com um ângulo de 15°	Duração do teste: 10min Água equivalente a $3mm^3$ de chuva por minuto
3	Pulverização de água	Pulverização de água sobre o invólucro de qualquer ângulo até 60°	Duração do teste: 5min Volume de água: 0.7l/min Pressão: 80-100 kN/m^2
4	Salpicos de água	Salpicos de água sobre o invólucro de qualquer direcção	Duração do teste: 5min Volume de água: 10l/min Pressão: 80-100 kN/m^2
5	Jactos de água	Água projectada por um bico (6.3mm) de qualquer direcção	Duração do teste: pelo menos 3min Volume de água: 12.5l/min Pressão: 30 kN/m^2 a uma distância de 3m
6	Potentes jactos de água	Água projectada por um bico (12.5mm) de qualquer direcção	Duração do teste: pelo menos 3min Volume de água: 100l/min Pressão: 100 kN/m^2 a uma distância de 3m
7	Imersão até 1m	Imersão em água até 1m	Duração do teste: 30min Imersão a uma profundidade de até 1m
8	Imersão a partir de 1m	Imersão em água a partir de 1m	Duração do teste: continuamente Profundidade: especificada pelo fabricante

A tabela 3.5 ilustra os valores de *rating* para o primeiro dígito do código. Este dígito corresponde a protecção contra sólidos. A tabela 3.6 mostra os valores de *rating* para o segundo dígito, que corresponde à protecção contra líquidos.

Outras classificações estão definidas no *standard*, como letras adicionais que de-

finem por exemplo a natureza do dispositivo ou a resistência a impactos. Como exemplo podemos referir a letra H que significa que o dispositivo é de alta tensão. Na aplicação em questão, para protecção do circuito a colocar no interior do contentor é apenas relevante estudar a protecção contra sólidos e líquidos. A protecção contra choques, apesar de ser um requisito do sistema, será feita recorrendo a uma protecção metálica, colocada no exterior do invólucro, não precisando este de *rating* adicional contra choques.

Consultando as Tabelas 3.5 e 3.6, e de modo a cumprir os requisitos do sistema no que diz respeito à protecção contra objectos sólidos e lavagens de alta pressão, o sistema deverá estar protegido por um invólucro com um *IP Rating IP67*. Nível 6, para protecção total contra poeiras e nível 7 para ambientes sujeitos a imersão, garantindo este último claramente que o sistema pode estar sujeito a lavagens de alta pressão.

As dimensões e o fabricante do invólucro a ser colocado dentro dos contentores serão escolhidos posteriormente, após se avaliar as dimensões máximas do nó da rede que implementa o sistema de leitura do nível de enchimento, que inclui a bateria, a sonda e o circuito impresso com o SoC escolhido.

3.3.4 Sensores de medida por Ultra-som

Relativamente ao sensor que efectua as leituras do nível de enchimento dos contentores, foi realizado um estudo sobre quais se poderiam utilizar na solução proposta. A solução actual já utiliza um componente deste tipo, a sonda *MB7001-LV-MaxSonar-WR1* [52] da *MaxBotix* [53], pelo que este estudo teve o objectivo de apurar se se deveria manter a utilização deste componente ou se haveria outro que o poderia substituir.

Os requisitos iniciais para este componente são:

- *IP Rating* IP67, tal como o invólucro do sistema;
- Alcance de pelo menos entre 30 a 400cm;
- Preferencialmente ter várias interfaces de comunicação (série, analógica, largura de impulso);
- Consumo médio de corrente não superior a 5mA;

3.3. Estudo e selecção dos componentes

- Devido às dimensões genéricas do contentor, o campo de acção deve ter um diâmetro superior a 50 cm e inferior a 1 m;
- Baixo custo, não devendo ultrapassar os 100€.

Na procura desde componente excluiu-se os sensores que operam nos infra-vermelhos, pois o comportamento destes em materiais como o vidro, resulta em medições erradas. Desta forma, e para dotar todos os contentores com o mesmo dispositivo de leituras, incluindo o contentor de recolha do vidro, este tipo de sensores foram descartados.



Figura 3.15: Sonda SM956DN da *Schneider Electric*

Foram estudados vários sensores ultra sónicos, de acordo com as especificações dos fabricantes. A *Schneider Electric* [54] apresenta uma gama de sensores ultra sónicos, a gama SM (Figura 3.15), que cumprem os 3 primeiros requisitos. No entanto estas sondas, direccionadas para aplicações no ramo da automação industrial, além de serem consideravelmente caras, cerca de 200€ cada uma mesmo para grandes quantidades, são alimentadas entre 12 a 24V, o que torna mais difícil a sua utilização em ambientes *low power* com integração com microcontroladores nas WSNs.



Figura 3.16: Sonda *Laser* O1D100 da *IFM Electronic*

Outra característica destas sondas é o *output* analógico com uma tensão entre 0 e 10V que representa o nível de enchimento, não sendo estes valores adequados para

uma utilização destes sensores no sistema proposto. Por fim, o consumo médio de corrente é de 80mA, ultrapassando o 5º requisito para este componente.

Outro sensor estudado foi o sensor O1D100 (Figura 3.16) da *IFM Electronic* [55].

Este sensor tem a particularidade de usar tecnologia *laser* para efectuar as medições. Este sensor cumpre alguns dos requisitos mas o seu preço é elevado, cerca de 200€. Opera entre os 18 e os 30V DC e tem um consumo de corrente ate 150 mA. Desta forma este sensor não encaixa na aplicação proposta pois continua a não ser o melhor componente a escolher.

Foi também estudado o sensor TSPC-30S1-232 (Figura 3.17 da *Senix* [56]). Este sensor é especialmente adequado, entre outras aplicações, para detecção do nível de contentores ou altura de objectos. Respeita as normas IP67, tal como é requisito deste componente, mas cada unidade custa cerca de 500USD.



Figura 3.17: Sonda TSPC-30S1-232 da *Senix*

Outro sensor estudado foi o sensor *HG-M40DAI*, Figura 3.18 da *Hagisonic* [57].



Figura 3.18: Sonda *HG-M40DAI* da *Hagisonic*

Este sensor precisa de ser alimentado entre 9 e 15V. A principal desvantagem é que não tem protecção IP67, apesar de ter um custo muito competitivo, 24USD, pelo que seria necessário dotar o mesmo de uma protecção extra. Esta tarefa torna-se impraticável pois o sensor deixaria de funcionar correctamente.

3.3. Estudo e selecção dos componentes

Outros sensores idênticos a este são o URM37 (Figura 3.19a) da *YeRobot* [58], o *Seed Ultrasonic Sensor* (Figura 3.19b) da *Seed Studio Works* [59], o *Ping Ultrasonic Distance Sensor* (Figura 3.20a) da *Parallax* [60] e o SRF04 (Figura 3.20b) da *Devantech* [61].



(a) Sensor URM37 da *YeRobot*



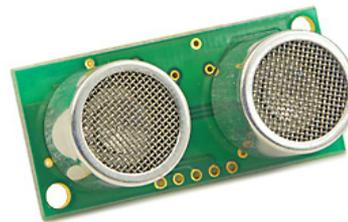
(b) Sensor *Seed Ultrasonic Sensor* da *Seed Studio Works*

Figura 3.19: Exemplos de sensores ultra sónicos.

Todos estes sensores apresentam características muito próximas. São alimentados a 5V e são bastante usados na área da robótica. Relativamente aos consumos variam entre 15mA e 150mA, em termos de custo todos apresentam valores entre os 20 e 30USD e o alcance máximo varia entre 3 a 5 metros.



(a) Sensor *Ping)))* da *Parallax*



(b) Sensor *SRF04* da *Devantech*

Figura 3.20: Exemplos de sensores ultra sónicos.

O modo de funcionamento destes sensores (Figura 3.21) é também muito idêntico, é emitido um pequeno sinal ultra sónico (40KHz) e “ouvido” o eco. O sinal “viaja” pelo ar a uma velocidade de cerca de 344m/s, atinge o objecto e é reflectido por este de volta para o sensor. O sensor gera uma onda quadrada (0-5V) com a duração do tempo de emissão do sinal até à detecção do eco.

O problema destes sensores reside no facto de não serem protegidos, não apresentando o *IP Rating* desejado, IP67. Desta forma serão postos de parte pois a sua utilização é impossível na aplicação proposta.

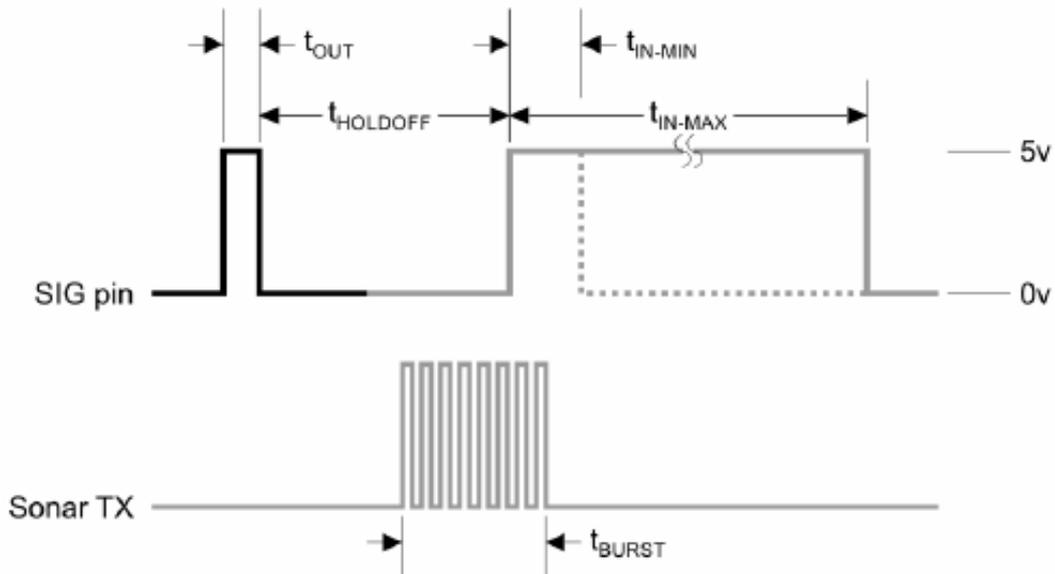


Figura 3.21: Modo de funcionamento dos sensores ultra sónicos

MB7001-LV-MaxSonar-WR1

A sonda que cumpre todos requisitos, é a *MB7001-LV-MaxSonar-WR1* (Figura 3.22) da *MaxBotix*. Esta sonda tem características idênticas aos sensores usados na área da robótica com a diferença de cumprir as normas IP67 e de ser especialmente concebida para o tipo de aplicações onde é necessário a medição do nível de enchimento ou distâncias de objectos.

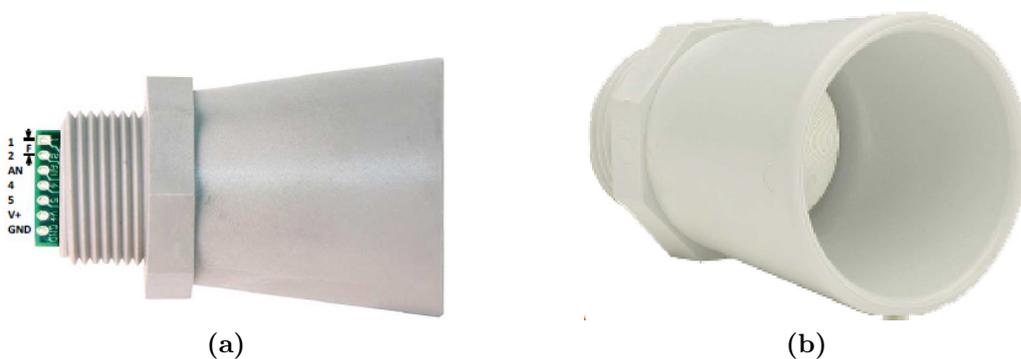


Figura 3.22: Sonda *MB7001-LV-MaxSonar-WR1* da *MaxBotix*

Esta sonda tem um campo de acção adequado para as dimensões dos contentores usados, não sendo muito amplo de modo a detectar erradamente as paredes do con-

3.3. Estudo e selecção dos componentes

tentor e assumir como resíduos nem muito estreito de modo a permitir detectar os resíduos em toda a largura do contentor.

A sonda *MB7001-LV-MaxSonar-WR1* tem as seguintes características:

- Opera entre 3 a 5.5V;
- Protecção em PVC;
- *IP Rating 67*;
- Detecta objectos numa distância até 254 polegadas (6,45m);
- Mede distâncias entre 12 a 254 polegadas (0,30 a 6,45m);
- Baixo consumo energético (consumo médio 2.1mA com picos de até 50mA);
- 3 *Outputs* possíveis: série (0 to VCC, 9600Baud, 81N), em largura de impulso (147 μ s/inch) e em tensão (Vcc/512) / inch;
- Desenhada para utilização exterior;
- Faz até 20 leituras por segundo;
- 2 modos de operação (contínuo ou por interrupção);
- Opera a 42KHz;
- Calibração automática, não sendo necessário controlar a temperatura no interior do contentor para efeitos de calibração;
- Ganho variável com compensação automática da temperatura (funciona entre -40 a 85°C);
- Campo de acção preciso.

Pin out da sonda ultra sónica *MB7001-LV-MaxSonar-WR1*:

- Pino 1 - Deixar em aberto ou com valor lógico *high* para operar no modo série (*output* pelo pino 5).
- Pino 2 - (PW) *output* do valor medido em largura de impulso. A distância pode ser calculada usando o factor de escala 147 μ s/polegada.
- Pino 3 - (AN) *output* do valor medido em tensão. O cálculo da distância pode ser feito usando o factor de escala de VCC/512/polegada. Uma tensão de alimentação de 5V produz 9.8mV/pol e com uma tensão de alimentação de 3.3V obtém-se 6.4mV/pol.

- Pino 4 - (RX) Este pino está internamente em *high*. Se o pino não for conectado ou for colocado em *high*, a sonda continua a fazer medições. Se for forçado a *low* a sonda deixa de fazer medições e fica em espera.
- Pino 5 - (TX) Se o pino 1 estiver em *high*, o pino 5 envia dados série assíncronos no formato RS232. A trama produzida é composta pela letra ASCII “R” seguida de 3 caracteres também ASCII com o valor da medição feita. No final da trama é produzido o carácter *carriage return* (CR - ASCII 13 ou 0x0D). Exemplo: “R243+CR”. Os valores dos parâmetros da porta série são uma *baudrate* de 9600bps, 8 bits, sem paridade e com 1 *stop bit*.
- Pino V+ - Pino de alimentação (3 a 5.5V). Corrente média a 3.3V é de 2.1mA (picos de 50mA) e a 5V é de 3.4mA (picos de 100mA). O pico ocorre no momento do envio do pulso por parte do sonar.
- Pino GND - Massa do circuito. Muito sensível a ruído. Caso detectados, deve-se retirar o *ripple* e eliminar ruído.

Esta sonda revelou ser o melhor sensor a usar na aplicação em questão, cumprindo todos os requisitos do projecto. É importante referir que o fabricante, alterou e optimizou o *firmware* da sonda para a aplicação em questão, de forma a melhorar o desempenho da mesma e alterou também a resolução para que as unidades pudessem aparecer em centímetros e não em polegadas.

No capítulo seguinte será abordado com mais detalhe este componente, nomeadamente na sua utilização e na questão energética.

3.4 Resumo

Neste capítulo foi apresentada a solução actual, Wise Waste, bem como apresentada a solução Weco proposta, enumerando-se os requisitos para o seu desenvolvimento. É feita também uma análise e selecção dos componentes a utilizar neste projecto, tais como os SoC, bateria, requisitos *IP Rating* e sonda ultra-sónica.

Capítulo 4

Desenvolvimento do Sistema

Este capítulo descreve o desenvolvimento do sistema especificado no capítulo anterior. De modo a avaliar o desempenho da implementação e de forma a comparar qual das duas soluções é a mais adequada, foram desenvolvidos paralelamente dois sistemas com base nos SoCs escolhidos (duas gamas de frequência distintas). A selecção da bateria será feita neste capítulo, porque o processo de selecção é muito mais simples após serem efectuados testes de consumo de energia ao sistema desenvolvido, porque mesmo com as informações de consumos fornecidos pelos fabricantes, o sistema tem outros componentes.

4.1 Topologia de rede

De acordo com as topologias de rede para redes de sensores sem fios, apresentadas no Capítulo 2, optou-se por implementar o sistema numa topologia em estrela. Para a aplicação em questão é a topologia que mais se adequa, pois os nós da rede (instalados no interior dos contentores) não necessitam comunicar entre si, apenas necessitam de comunicar com um único coordenador, localizado no centro da rede na topologia em estrela, recebendo a informação de todos os nós da rede. A Figura 4.1 ilustra a topologia de rede de todo o sistema.

Neste desenvolvimento interessa focar apenas a rede local, que é a rede de sensores sem fios. Cada ilha ecológica representa uma *Personal Area Network* (PAN) é composta por um coordenador e vários nós, até um número máximo de oito. Isto deve-se ao facto de haverem no máximo, em cada ilha ecológica, oito contentores disponíveis para colocação de resíduos. Cada nó está instalado no interior do respectivo

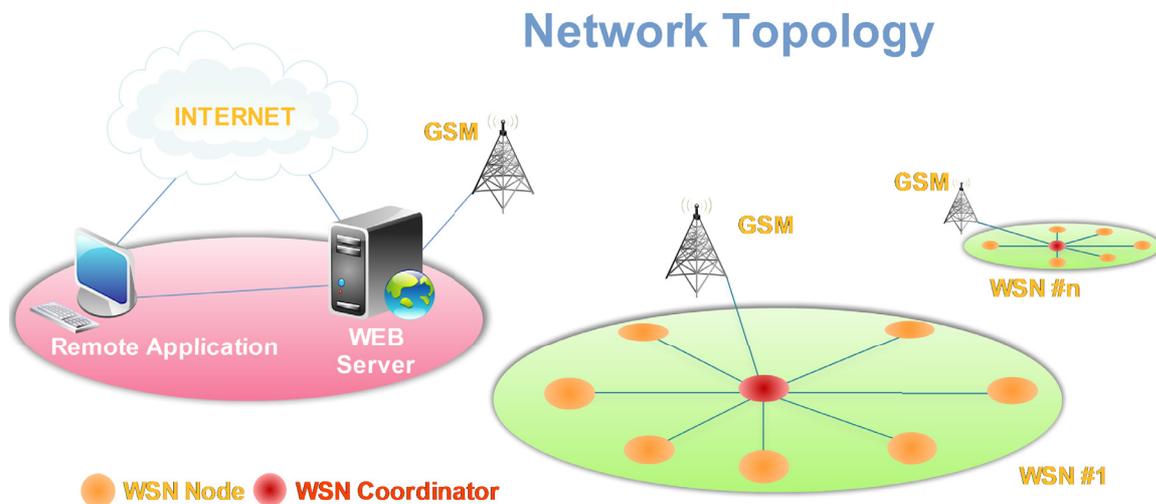


Figura 4.1: Topologia global da rede.

contenitor a monitorizar o nível de enchimento e envia periodicamente (período de tempo programável) o valor do nível de enchimento para o coordenador, que por sua vez a envia para a placa de processamento WiseWaste que por sua vez, via SMS ou GPRS, a envia para o *web server*.

4.2 Hardware desenvolvido

4.2.1 Tecnologia *Texas Instruments*

Para o desenvolvimento dos elementos da rede na plataforma da *Texas Instruments* usaram-se os módulos CC2530EMK (Figura 3.7b). Para se poderem usar esses módulos, e na ausência de um *kit* de desenvolvimento, de modo a reduzir os custos, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso para o efeito. Esta PCB, ilustrada na Figura 4.2 (esquemático B.1 encontrado no Anexo B e PCB A.1 encontrado no Anexo A), inspirada na placa de desenvolvimento *SmartRF05EB* do *kit* CC2530DK, tem as seguintes características:

- SoC RF *Connector*- Para os módulos CC2530EM;
- Leds - Para funções de *debug*;
- Porta RS232 - Para comunicações série;
- SoC *Debug/Flash Connector* - Para Programação e *debug* do SoC;

- 2x *push button* - Para funções de teste e *debug*;
- 2x I/O Connector - Com todos os pinos do SoC disponíveis.

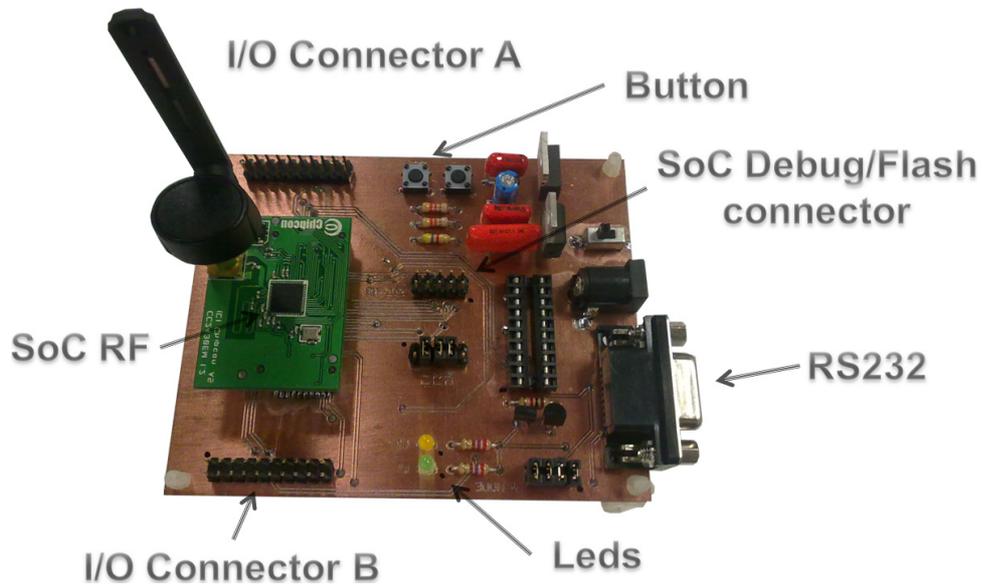


Figura 4.2: Placa de desenvolvimento criada, CC25XXEB-ESRG

Para programar os SoC na placa de desenvolvimento usou-se o programador *CC-Debugger* (Figura 4.3), da *Texas Instruments*. Este dispositivo permite fazer *flash/debug* e é compatível com vários dispositivos da família CC25XX.



Figura 4.3: CC-DEBUGGER da *Texas Instruments*

O coordenador da rede foi implementado usando placa de desenvolvimento criada, a CC25XXEB-ESRG. Nesta fase foram apenas implementadas funções mínimas

para o coordenador tais como implementação da API da camada MAC para o *standard* IEEE 802.15.4 para testes com os nós. Para os nós da rede foi construído um protótipo, Figura 4.4 (esquemático B.2 encontrado no Anexo B e PCB A.2 encontrado no Anexo A). Este protótipo, alimentado por uma bateria, contém o *hardware* mínimo necessário para o seu funcionamento. É composto por um conector para o CC2530EM, um conector para a bateria, Um botão *on/off* para ligar/desligar o nó quando este não estiver em uso (permitindo que a bateria seja poupada), um botão para o processo de *learning* (no mecanismo criado de associação de nós da rede a um coordenador) e um conector para a sonda ultra-sónica.



Figura 4.4: Protótipo que implementa um nó da rede.

A sonda ultra-sónica comunica com o microcontrolador usando o protocolo série RS232. De modo a garantir o tempo de vida de 6 anos, requisito deste projecto, este protótipo possui um circuito (explicado posteriormente na secção dedicada à gestão energética) que desliga completamente a sonda quando esta não está a ser usada, garantindo que não existem consumos desnecessários de energia (a arquitectura anterior mantinha as sondas em *standby*) e garantindo também que de cada vez que a sonda é ligada para recolher leituras é feita sempre uma nova calibração, adaptada ao nível de enchimento do contentor, permitindo assim leituras mais precisas.

Os pinos utilizados para ligar a sonda à placa de processamento são:

- pino 7 da sonda - GND
- pino 6 da sonda - alimentação, ligado ao circuito de *on/off*
- pino 5 da sonda - RS232(TX), que liga ao pino P0.2 do CC2530.

4.2.2 Tecnologia *Enocean*

No o desenvolvimento dos elementos da rede na plataforma da *Enocean* usaram-se os módulos STM300 e TCM300 directamente no *hardware* desenvolvido. Usando apenas o programador EOP300 (Figura 3.11b) do kit EDK300.

O coordenador da rede foi implementado no módulo TCM300. O PCB desenvolvido, Figura 4.5 (esquemático B.3 encontrado no Anexo B e PCB A.3 encontrados no Anexo A), fica inserido na cavidade inferior do painel solar, visível na Figura 5.1, no capítulo 5, para ligação com a placa de processamento Wise Waste e posteriormente ligação directa com o módulo GSM implementando toda a arquitectura do projecto.



Figura 4.5: Protótipo que implementa o coordenador usando tecnologia *Enocean*

O coordenador da rede, alimentado pela placa de processamento actual com uma tensão de 5V, contém o *hardware* mínimo necessário, de modo a evitar consumos desnecessários de energia. É composto por um conector para alimentação, um botão *on/off* para ligar/desligar o coordenador, um botão para o processo de *learning* (no mecanismo criado de associação de nós da rede a um coordenador), um conector para programação do SoC, um conector SMA 50Ω para ligar uma antena otimizada para funcionar na frequência de 868MHz e um conector série RS232 para interligar o coordenador à placa de desenvolvimento Wise Waste.

Para os nós da rede foram construídos vários protótipos, que diferem basicamente na morfologia do PCB que deve ser construído de forma a caber na caixa IP67 escolhida e na utilização de dois tipos de antena. Numa primeira versão foi usada a caixa DPCP050704GE da *Eldon* [62], com uma antena interior. Esta caixa veio mais tarde a ser substituída por outra mais adequada às dimensões do PCB com a bateria incluída. Esta caixa [63], modelo 1555B (Figura 4.6) é fabricada pela *Hammond Manufacturing* [64] e preenche todos os requisitos relativamente a este componente. É importante referir também que esta caixa, apresentando as dimensões $65mm \times 65mm \times 40mm$ consegue tornar os nós da rede do sistema Weco como a solução mais pequena do mercado, comparando com as dimensões das caixas dos sistemas apresentados no Capítulo 2.



Figura 4.6: Caixa 1555B com IP67 da *Hamming Manufacturing* usada no protótipo final.

Numa versão posterior foi construído um protótipo que utiliza duas versões de antena, uma antena exterior idêntica à usada no coordenador (SMA para 868MHz) ilustrada na Figura 4.7b, e outra versão com antena monopolo situada no interior da caixa, ilustrada na Figura 4.7c (esquemático B.4 encontrado no Anexo B e PCB A.4 encontrado no Anexo A).

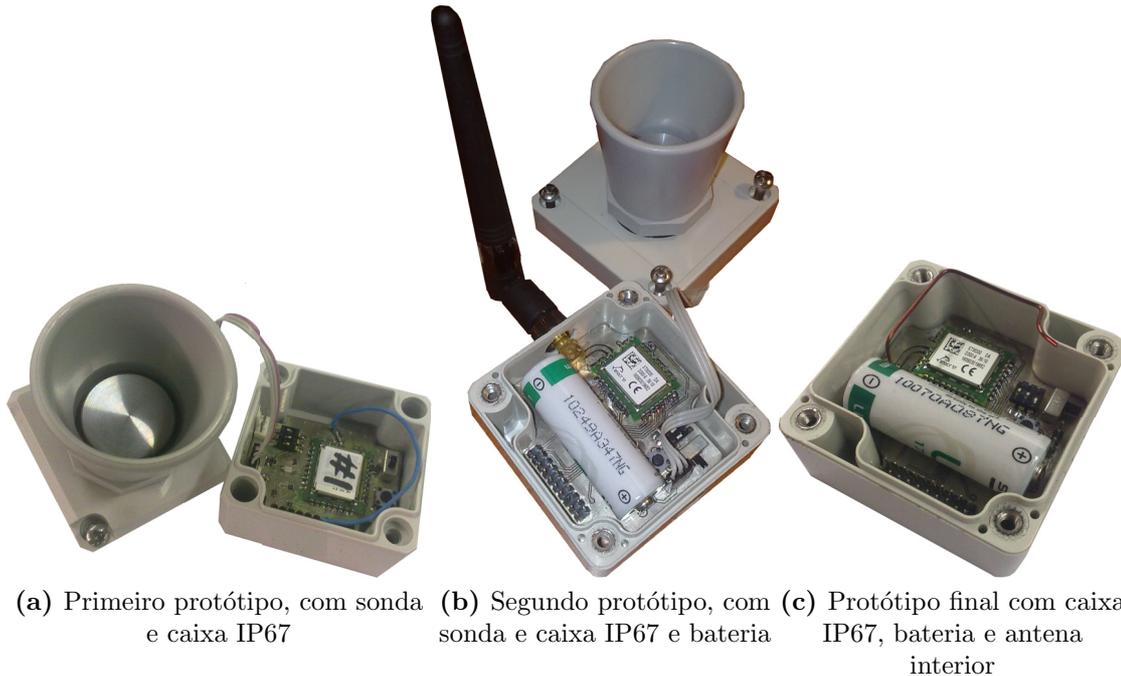


Figura 4.7: Protótipos do nó da rede usando tecnologia *Enocean*

A versão com antena exterior acabou por ser substituída pela versão com antena interior, pois na primeira, havia a necessidade de perfurar a caixa, fazendo com que as características IP67 se perdessem. Desta forma seria necessário encontrar uma forma de garantir a norma IP67 através da utilização de algum tipo de resina ou cola isolante, o que traria custos adicionais ao protótipo. Como se vai poder constatar posteriormente, nos testes de desempenho efectuados com os dois tipos de antena, as diferenças não são muito significativas, pelo que se optou pelo protótipo com antena no interior da caixa.

O protótipo do nó da rede é composto por uma bateria para alimentação e contém o *hardware* mínimo necessário, de modo a evitar consumos desnecessários de energia. Possui um botão *on/off* para ligar/desligar o nó quando este não estiver em uso (permitindo que a bateria seja poupada), um botão para o processo de *learning* (no

mecanismo criado de associação de nós da rede a um coordenador), um conector para a sonda ultra-sónica, um conector para ligar o programador EOP300 e contém também um espaço livre para se poder instalar um conector SMA 50Ω para se poder ligar uma antena de 868MHz ou um fio, previamente estudado, que funciona como antena, estando o protótipo final equipado com uma antena interior.

Os pinos utilizados para ligar a sonda à placa de processamento são:

- pino 7 da sonda - GND
- pino 6 da sonda - alimentação, ligado ao circuito de *on/off*
- pino 5 da sonda - RS232(TX), que liga ao pino ADIO6 do SCM300.

Este protótipo está também munido de um *dip-switch* de 3 posições, que permite seleccionar, por *hardware*, o tipo de contentor onde está instalado o nó. A Tabela 4.1 ilustra o código de *bits* estabelecido para atribuir uma identificação do tipo de contentor.

Tabela 4.1: Código de 3 *bit* para identificação do tipo de contentor.

Tipos de contentor		
Código	Tipo	Cor
000	Papel	
001	Embalagens	
010	Vidro	
011	Indiferenciados	
100	Orgânicos	
101	Extra1	
110	Extra2	
111	Extra3	

4.3 Protocolos de comunicações

4.3.1 Protocolo da WSN

O protocolo de comunicações entre os nós da rede e o coordenador estabelecido é composto por cinco tipos de mensagens: Alive (AL), ReadingTelegram (RT), ConfigSet (CS), After-WakeInstruction (AWI) e ConfigGet (CG).

- Tipo 1 - AL: É usada para registar um nó na rede no processo de *learning* entre o nó e o coordenador, ou quando o nó perde conectividade com o resto da rede.
- Tipo 2 - RT: Trocada entre o nó e o coordenador. Contém as amostras das leituras do nível de enchimento do ecoponto. Pode ser usada para enviar outro tipo de informação tal como o nível de bateria ou a temperatura.
- Tipo 3 - CS: Esta mensagem é enviada pelo coordenador da rede para um nó, quando este se regista, ou quando for pretendido. Contém novas configurações que deverão ser sobrepostas às actuais, como por exemplo a frequência de leituras. Esta mensagem é muito útil pois permite tornar as leituras dinâmicas, diminuindo a frequência de leituras em épocas com menor actividade, traduzindo-se numa maior longevidade da bateria.
- Tipo 4 - AWI: O coordenador da rede apenas consegue comunicar com os nós quando estes estão acordados, pois 99% do tempo estão a dormir. Desta forma, só quando um nó acorda para enviar uma mensagem do tipo 2 (RT) é que o coordenador pode comunicar com ele. Esta mensagem pode conter uma mensagem do tipo 3 com uma nova configuração, leituras de outros sensores conectados ao nó, ou para entrar em *sleep mode*.
- Tipo 5 - CG: O coordenador da rede pode requisitar ao nó o seu estado, relativamente a configurações ou a valores presentes.

O protocolo foi implementado em ambas as tecnologias, sendo que a implementação, adequada ao formato de cada tecnologia utilizada, está explicada nas secções seguintes. A Figura 4.8 mostra a sequência normal das mensagens trocadas entre os nós da rede e o coordenador quando um nó é ligado pela primeira vez. É assumido que não existem erros de leitura do nível de enchimento dos ecopontos nem do canal rádio.

Quando um nó é ligado, envia uma mensagem do tipo 1 de forma a notificar o coordenador da sua existência, e se ambos estiverem no modo de *learning*, este é

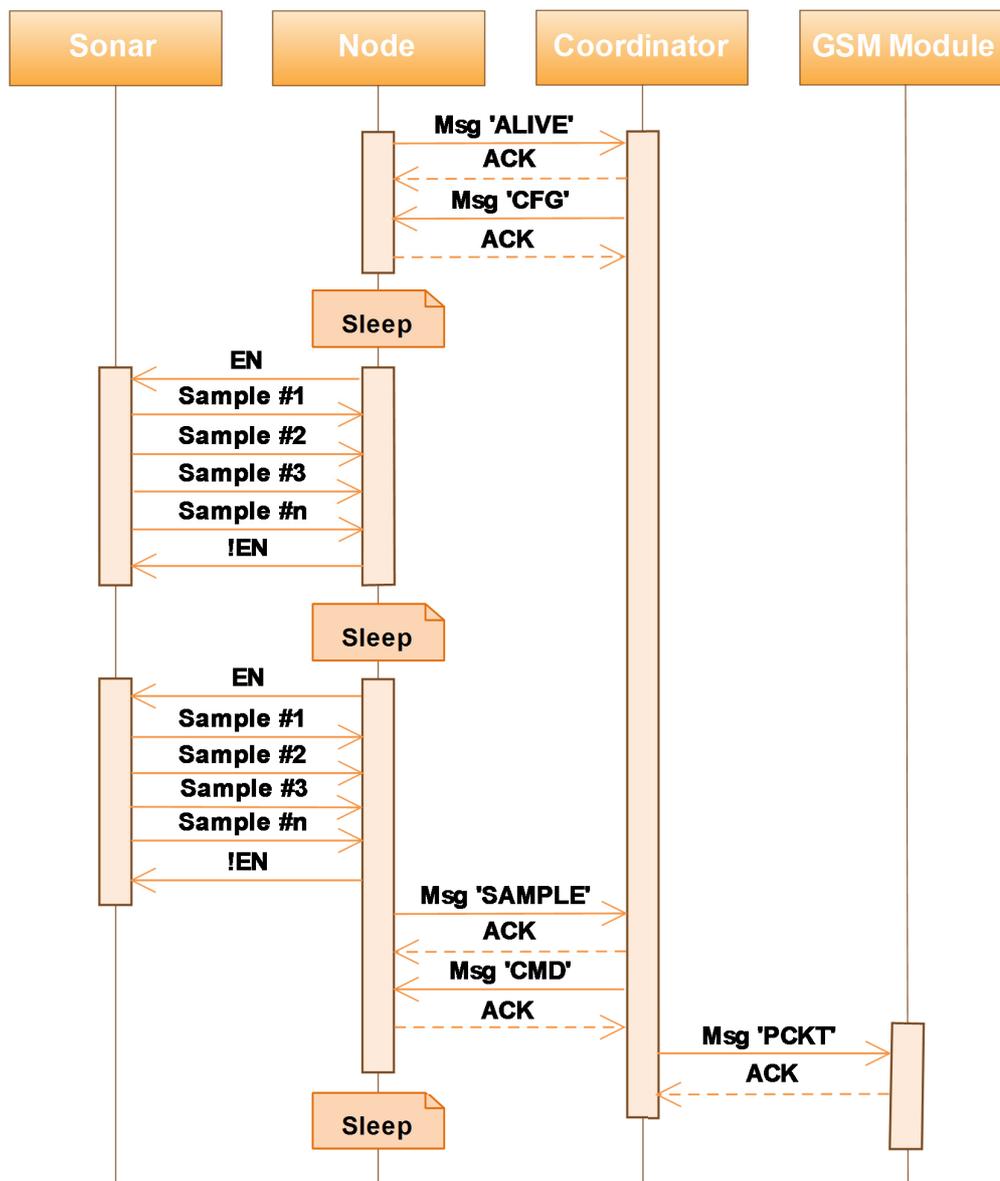


Figura 4.8: Sequência de mensagens trocadas entre os elementos da rede

registrado na rede pelo coordenador. Depois disso o coordenador envia uma mensagem do tipo 3 para o nó. Este aplica as configurações recebidas e entra em *sleep mode* por um período de tempo (configurável), recebido na mensagem tipo 3. Quando o nó acorda, inicia o processo de leitura do nível de enchimento do contentor (número de amostras e qualidade da amostra definidos também nas configurações recebidas na mensagem tipo 3), e envia essa informação para o coordenador numa mensagem do tipo 2. Depois de enviar esta mensagem, o nó da rede espera uma mensagem do tipo

4, com a “instrução” proveniente do coordenador. Depois de executar a instrução recebida, caso haja, o nó entra novamente em modo *deep sleep*, pelo tempo definido na mensagem de configuração tipo 3 recebida.

Implementação do protocolo no CC2530

Usando a tecnologia da *Texas Instruments* as mensagens trocadas entre o nó da rede e o coordenador são enviadas nas *Data Frames* do protocolo MAC do *standard* IEEE 802.15.4 (Figura 4.9).



Figura 4.9: MAC Frame genérica do *standard* IEEE 802.15.4

Para a plataforma desenvolvida, o formato desta *frame* foi adaptado (Figura 4.10). Como a PAN de destino é a mesma, este campo não foi usado. O campo *Aux Sec Header* também não é usado de momento, mas pode ser usado a qualquer altura. Os dois *bytes* do campo *Source Address* foram também modificados passando-se a usar apenas 1 *byte* para o *Source Address* e o outro *byte* para identificar o tipo de mensagem das anteriormente definidas.



Figura 4.10: MAC Frame adaptada do *standard* IEEE 802.15.4

As mensagens definidas anteriormente estão inseridas no *payload* da *Data Frame* do protocolo MAC estabelecido e o tipo da mensagem está contido no campo *Type*.

• Mensagem tipo 1: Nó → Coordenador

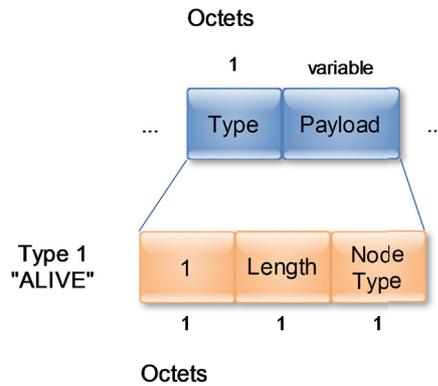


Figura 4.11: Formato da mensagem tipo 1.

Tabela 4.2: Formato da mensagem tipo 1

Campo	Tamanho	Descrição
Length	8 bit	Tamanho da mensagem
Node type	8 bit	Tipo de nó

• Mensagem tipo 2: Nó → Coordenador

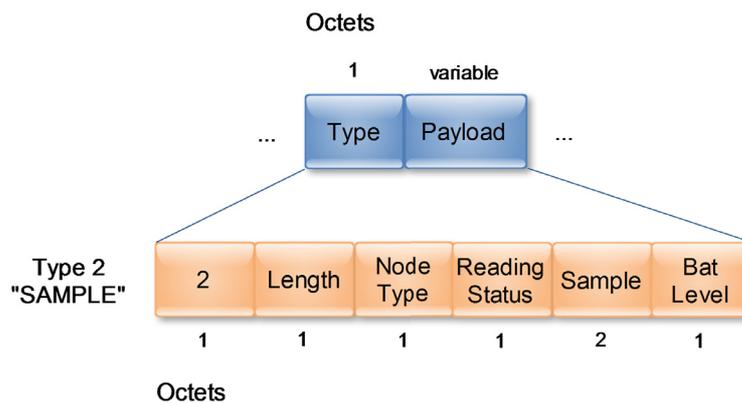


Figura 4.12: Formato da mensagem tipo 2.

Tabela 4.3: Formato da mensagem tipo 2

Campo	Tamanho	Descrição
Length	8 bit	Tamanho da mensagem
Node type	8 bit	Tipo de nó
Reading Status	8 bit	Indica as condições em que as leituras foram realizadas. 2 leituras sem erros, 4 leituras sem erros, 4 leituras com valores acima da margem de erro estabelecida.
Sample	16 bit	Valor da ultima leitura feita.
Battery Level	8 bit	Valor do nível da bateria. Valor só enviado no período estabelecido na configuração.

• Mensagem tipo 3: Coordenador → Nó

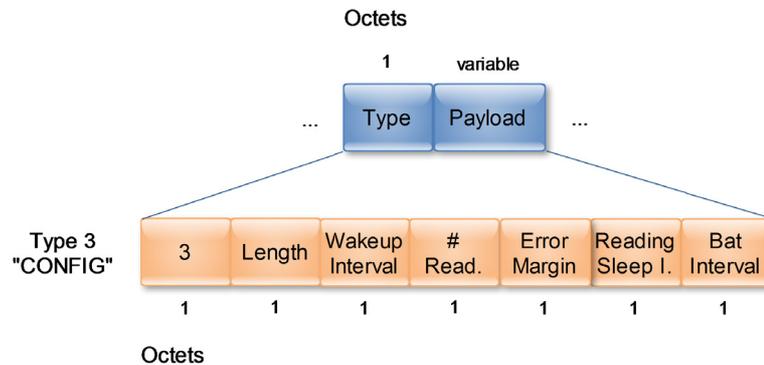


Figura 4.13: Formato da mensagem tipo 3.

Tabela 4.4: Formato da mensagem tipo 3

Campo	Tamanho	Descrição
Length	8 bit	Tamanho da mensagem
Wakeup Interval	8 bit	Período de amostragem, ou seja, o tempo de espera entre cada leitura do nível de enchimento. Resolução: 30 minutos. Valor default: 120 min.
#Readings	8 bit	Número de amostras realizadas em cada leitura. Resolução: 2 leituras. Default: 6 leituras.
Error Margin	8 bit	Margem de erro entre duas leituras consecutivas. Resolução: 5%. Default: 10%.
Reading Sleep Interval	8 bit	Tempo de espera entre as duas leituras S1 e S2. Resolução: 5 seg. Default: 5 segundos.
Battery Level	8 bit	Indica o período de leitura do nível de bateria. Resolução: 30 min. Default: 60 min.

• Mensagem tipo 4: Coordenador → Nó

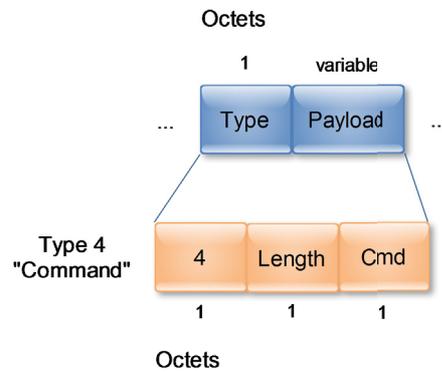


Figura 4.14: Formato da mensagem tipo 4.

Tabela 4.5: Formato da mensagem tipo 4

Campo	Tamanho	Descrição
Length	8 bit	Tamanho da mensagem
Cmd	8 bit	Indica o comando a enviar para o nó. Pode ser a indicação que deve voltar a dormir, pode ser um pedido de uma mensagem tipo 5, ou pode ser o envio de uma nova configuração, mensagem tipo 3, que vai sobrepor a actual.

• Mensagem tipo 5: Nó → Coordenador

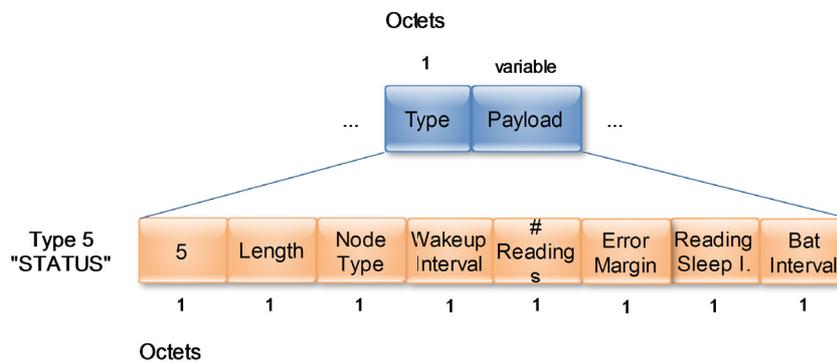


Figura 4.15: Formato da mensagem tipo 5.

Tabela 4.6: Formato da mensagem tipo 5

Campo	Tamanho	Descrição
Length	8 bit	Tamanho da mensagem
Node type	8 bit	Tipo de nó
Wakeup Interval	8 bit	Período de amostragem, ou seja, o tempo de espera entre cada leitura do nível de enchimento. Resolução: 30 minutos. Valor default: 120 minutos
#Readings	8 bit	Número de amostras realizadas em cada leitura. Resolução: 2 leituras. Default: 6 leituras.
Error Margin	8 bit	Margem de erro entre duas leituras consecutivas. Resolução: 5%. Default: 10%.
Reading Sleep Interval	8 bit	Tempo de espera entre as duas leituras S1 e S2. Resolução: 5 segundos. Default: 5 segundos.
Battery Level Interval	8 bit	Indica o período de leitura do nível de bateria. Resolução: 30 minutos. Default: 60 min.

Implementação do protocolo no STM300/TCM300

Na tecnologia *Enocean* o protocolo definido foi implementado de um modo ligeiramente diferente. Aqui as mensagens, também ditas telegramas, têm um *payload* fixo de 4 *bytes*, de forma que os campos do protocolo aproveitam melhor os bits disponíveis, por exemplo o *node type* como só tem 3 *bits* para configuração, só ocupa 3 *bits* do *payload* de um telegrama. As mensagens do tipo 1 e 4 não são usadas, pois na arquitetura *Enocean* o protocolo MAC já trata destas questões.

• Mensagem tipo 1: Nó → Coordenador

Não é utilizada pois o processo de *learning* é diferente e a API fornecida pelo fabricante já implementa esta funcionalidade.

• Mensagem tipo 2: Nó → Coordenador

A mensagem tipo 2 está implementada da seguinte forma:



■ - *Bits* reservados para o processo de *learning*, controlados pela API.

Tabela 4.7: Formato da mensagem tipo 2

Campo	Tamanho	Descrição
Type	3 bit	Tipo da mensagem
Node type	3 bit	Tipo de nó
Reading Status (RS)	2 bit	Indica as condições em que as leituras foram realizadas. 2 leituras sem erros, 4 leituras sem erros, 4 leituras com valores acima da margem de erro estabelecida.
Sample	16 bit	Valor da ultima leitura feita.
Battery Level (BL1 e BL0)	6 bit	Valor do nível da bateria. Valor só enviado no período estabelecido na configuração.

• Mensagem tipo 3: Coordenador → Nó

A mensagem tipo 3 está implementada da seguinte forma:



■ - Bits reservados para o processo de *learning*, controlados pela API.

Tabela 4.8: Formato da mensagem tipo 3

Campo	Tamanho	Descrição
Type	3 bit	Tipo da mensagem
Wakeup Interval (WI)	8 bit	Período de amostragem, ou seja, o tempo de espera entre cada leitura do nível de enchimento. Resolução: 30 minutos. Valor default: 120 min.
#Readings (NR)	3 bit	Número de amostras realizadas em cada leitura. Resolução: 2 leituras. Default: 6 leituras.
Error Margin (EM)	3 bit	Margem de erro entre duas leituras consecutivas. Resolução: 5%. Default: 10%.
Reading Sleep Interval (RSI)	4 bit	Tempo de espera entre as duas leituras S1 e S2. Resolução: 5 seg. Default: 5 segundos.
Battery Level (BAT)	6 bit	Indica o período de leitura do nível de bateria. Resolução: 30 min. Default: 60 min.

• Mensagem tipo 4: Coordenador → Nó

Não é utilizada pois a API já implementa esta funcionalidade.

• Mensagem tipo 5: Nó → Coordenador

A mensagem tipo 5 está implementada da seguinte forma:



■ - Bits reservados para o processo de *learning*, controlados pela API.

Tabela 4.9: Formato da mensagem tipo 5

Campo	Tamanho	Descrição
Type	3 bit	Tipo da mensagem
Node type (NT)	3 bit	Tipo de nó
Wakeup Interval	8 bit	Período de amostragem, ou seja, o tempo de espera entre cada leitura do nível de enchimento. Resolução: 30 minutos. Valor default: 120 minutos
#Readings (NR)	3 bit	Número de amostras realizadas em cada leitura. Resolução: 2 leituras. Default: 6 leituras.
Error Margin (EM)	3 bit	Margem de erro entre duas leituras consecutivas. Resolução: 5%. Default: 10%.
Reading Sleep Interval (RSI)	4 bit	Tempo de espera entre as duas leituras S1 e S2. Resolução: 5 segundos. Default: 5 segundos.
Battery Level Interval (BAT)	6 bit	Indica o período de leitura do nível de bateria. Resolução: 30 minutos. Default: 60 min.

4.3.2 Protocolo Weco-WiseWaste (WWW)

Para se poder integrar a plataforma Weco com o sistema actual, foi desenvolvido um protocolo entre o coordenador da rede e a placa de processamento do sistema Wise Waste (WW), pois nesta fase inicial, como o objectivo não é substituir completamente o sistema, é necessário garantir compatibilidade entre ambos.

Como a placa de processamento WW tem funcionalidades de *sleep*, o protocolo irá funcionar por *polling*, ou seja, quando o sistema WW acordar, faz pedidos ao coordenador da rede e este responderá de acordo com o pedido efectuado.

Foram definidos três tipos de mensagens:

- Config Get (G), WW → WECO: Usada para pedir ao coordenador da rede as configurações actuais de cada nó associado à rede;

4.3. Protocolos de comunicações

- Config Set (C), WW → WECO: Usada para enviar ao coordenador da rede novas configurações para cada nó associado à rede;
- Sample (S), Weco → WW: Usada para enviar à placa de processamento WW os pacotes de *sample* de cada nó da rede.

Mensagem “Config Get (G)”: WW → WECO

Esta mensagem tem o seguinte formato:

0	7 8	15 16	23 24	31 32	39
<(ASCII 60)	<(ASCII 60)	<(ASCII 60)	G (ASCII 71)	>(ASCII 62)	

O coordenador Weco responderá ao pedido com as configurações de todos os nós que lhe estejam associados. A mensagem tem o seguinte formato:

0	7 8	15 16	23 24	31 32	39
<	<	<	G		
ADDR1.7	ADDR1.6	ADDR1.5	ADDR1.4	ADDR1.3	
ADDR1.2	ADDR1.1	ADDR1.0	;	NT1.2	
NT1.1	NT1.0	;	WI1.2	WI1.1	
WI1.0	;	NR1.2	NR1.1	NR1.0	
;	EM1.2	EM1.1	EM1.0	;	
RSI1.2	RSI1.1	RSI1.0	;	BAT1.2	
BAT1.1	BAT1.0	;	DIRTY1		
ADDR2.7	ADDR2.6	ADDR2.5	ADDR2.4	ADDR2.3	
Repete a informação					
para cada nó associado					
BAT8.1	BAT8.0	;	DIRTY8	>	

OS campos ADDR_x representam o endereço MAC de cada nó e NT_x, WI_x, EM_x, RSI_x, BAT_x, representam os campos já explicados anteriormente, para cada nó. Os campos novos que aparecem aqui são os que contém o *byte* ASCII |, que separa a informação referente a cada nó, o campo ; que separa os dados de cada nó e o campo DIRTY_x, que indica se os valores enviados são actuais ou não (1 - valores novos; 0 - valores já enviados anteriormente, significando que no momento do pedido o nó ainda não tinha acordado desde a última vez que enviou informação).

Exemplo de um pedido com respectiva resposta:

WW → WECO

<<< G >

Resposta WECO → WW

<<<G|00001234;003;002;008;015;010;005;0|00001235;003;002;008;015;010;005;0|00001236;003;002;008;015;010;005;0|00001237;003;002;008;015;010;005;0|00001238;003;002;008;015;010;005;0|00001239;003;002;008;015;010;005;0|0000123A;003;002;008;015;010;005;0|0000123B;003;002;008;015;010;005;0|>

Mensagem “Config Set (C)”: WW → WECO

Pedido para Configuração do nó. O pedido deve ser um pacote semelhante ao recebido em *ConfigGet*, contudo, sem o campo NT porque este é configurado por *hardware* através dos *jumper*s existentes na placa. É possível configurar simultaneamente todos os nós com a mesma configuração, sendo necessário para isso preencher os *bytes* do ADDR com o valor 0x00. Esta mensagem tem o seguinte formato:

0	7 8	15 16	23 24	31 32	39
<	<	<	G		
ADDR.7	ADDR.6	ADDR.5	ADDR.4	ADDR.3	
ADDR.2	ADDR.1	ADDR.0	;	WI1.2	
WI1.1	WI1.0	;	NR1.2	NR1.1	
NR1.0	;	EM1.2	EM1.1	EM1.0	
;	RSI1.2	RSI1.1	RSI1.0	;	
BAT1.2	BAT1.1	BAT1.0	>		

4.3. Protocolos de comunicações

Exemplo de pedido de configuração de um nó:

WW → WECO

<<<C|00001234;003;002;008;015;010;005>

O coordenador não enviará qualquer resposta assíncrona. Para determinar o estado do envio das configurações é necessário enviar a seguinte mensagem:

WW → WECO

<<<Z>

À qual o coordenador da rede responderá com a seguinte mensagem:

0	7 8	15 16	23 24	31 32	39
<	<	<	Z		
ADDR1.7	ADDR1.6	ADDR1.5	ADDR1.4	ADDR1.3	
ADDR1.2	ADDR1.1	ADDR1.0	;	SUCCESS	
;	DIRTY1		ADDR2.7	ADDR2.6	
Repete a informação					
para cada nó associado					
;	SUCCESS8	;	DIRTY8	>	

O campo SUCCESS indica o estado do envio das configurações. Valor “0” as configurações foram aplicadas com sucesso, “1” nó não está associado à rede, “2” a configuração está inválida não estando na formatação correcta e “3” o nó não aplicou a nova configuração.

Exemplo da resposta WECO → WW, face ao pedido enviado anteriormente:

<<<Z|00001234;0;0|00001235;0;1|00001236;0;0|0000123A;0;1|
0000123B;0;0|0000123C;0;0|0000123D;0;0|0000123E;0;0>

Mensagem “Sample (S)”: WECO → WW

Esta mensagem é usada para pedir os valores das amostras recolhidas pelos sensores no interior dos contentores. A mensagem tem o seguinte formato:

0	7 8	15 16	23 24	31 32	39
<(ASCII 60)	<(ASCII 60)	<(ASCII 60)	S (ASCII 83)	>(ASCII 62)	

O WECO irá enviar uma resposta com os valores armazenados das últimas amostras para os 8 elementos em memória. O pacote de resposta tem o seguinte formato:

0	7 8	15 16	23 24	31 32	39
<	<	<	S		
ADDR1.7	ADDR1.6	ADDR1.5	ADDR1.4	ADDR1.3	
ADDR1.2	ADDR1.1	ADDR1.0	;	NT1.2	
NT1.1	NT1.0	;	VAL1.2	VAL1.1	
VAL1.0	;	STAT1.0	LBAT1.2	LBAT1.1	
LBAT1.0	;	DIRTY		ADDR2.7	
Repete a informação					
para cada nó associado					
LBAT8.1	LBAT8.0	;	DIRTY8	>	

Os campos VAL contêm o valor da amostra, em centímetros, do nível de enchimento do ecoponto associado ao nó e os campos LBAT o valor do nível de bateria. O campo STAT indica o estado da amostra: “0” ocorreram erros na amostragem, de acordo com a margem de erro (EM) estabelecida nas configurações e “1” se não ocorreram erros e os valores lidos estão dentro da margem de erro estabelecida. O funcionamento interno dos elementos da rede e a forma como estes implementam estes campos estabelecidos no protocolo será explicado na secção seguinte.

4.4 Software desenvolvido

Para os elementos da rede implementados na tecnologia *Texas Instruments* foi desenvolvida uma API de comunicações usando a *stack* do *standard* IEEE 802.15.4, tal como uma API para *interface* e controlo da sonda ultra-sónica. Foram também desenvolvidas camadas de aplicação para estes dispositivos, bem como uma API de gestão de energia.

Relativamente à tecnologia *EnOcean*, foram usadas as APIs já disponíveis pelo fabricante. Contudo o funcionamento dos vários dispositivos usados segue o mesmo algoritmo, por isso apresentam o mesmo comportamento.

4.4.1 Software que implementa o coordenador da rede

A camada de aplicação que implementa o coordenador da rede segue o algoritmo ilustrado na Figura 4.16.

O coordenador da rede recebe uma mensagem do tipo 1 quando um nó se quer registar na rede. No caso do coordenador implementado na tecnologia *enocean*, como foi explicado anteriormente, esta mensagem já está implementada na API no mecanismo de *learning*. Recebida a mensagem do tipo 1, o coordenador da rede responde com uma mensagem do tipo 3, contendo as configurações do nó. Posteriormente e periodicamente, o coordenador vai receber mensagens do tipo 2 contendo as amostras com os valores do nível de enchimento do ecoponto bem como o nível da bateria.

Depois de cada mensagem do tipo 2 recebida, o coordenador da rede responde com uma mensagem do tipo 4. Se esta mensagem envolver a necessidade de uma resposta, como por exemplo de pedido de configurações, o nó responde, caso contrário entra no modo *sleep* e o processo repete-se periodicamente, de acordo com as configurações em uso.

4.4.2 Software que implementa o nó da rede

A camada de aplicação que implementa um nó da rede segue o algoritmo ilustrado na Figura 4.17 e Figura 4.18.

Quando o nó é ligado, este precisa de se associar à rede de sensores sem fios, enviando uma mensagem tipo 1 para o coordenador. Após o envio desta mensagem espera por uma mensagem do tipo 3, contendo as configurações que vai usar. Caso não receba esta mensagem no tempo definido, o nó usa as configurações atribuídas

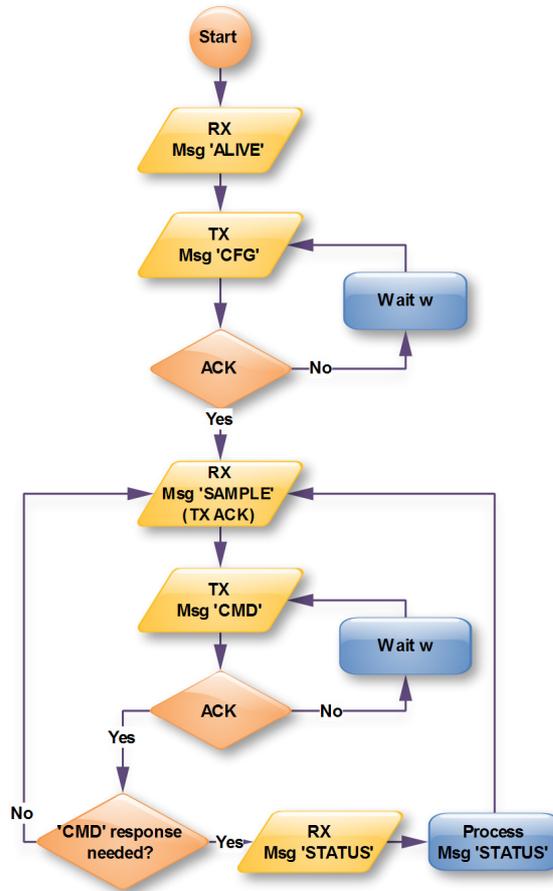


Figura 4.16: Fluxograma do funcionamento do coordenador da rede

por defeito. Depois de receber esta mensagem o nó entra em modo *sleep*. Este procedimento está ilustrado na Figura 4.17. Periodicamente o nó da rede acorda e inicia o processo de recolha de amostras do nível de enchimento do contentor. Inicialmente o nó recolhe o número de amostras estabelecido no parâmetro NR, que por defeito contém o valor 6. Recolhidas estas amostras o nó elimina a amostra de valor mais alto e a de valor mais baixo, consideradas as piores amostras, e entra em modo de *sleep* pelo período de tempo estabelecido no parâmetro de configurações RSI. Após este tempo de espera o nó repete o processo de amostragem. Se a média das amostras recolhidas da segunda vez (S2) for igual à média das amostras recolhidas da primeira (S1) dentro da margem de erro definida no parâmetro EM ($S1 = S2 \pm 15\%$), por defeito 15%, o nó aceita as amostras como válidas e correctas e envia uma mensagem do tipo 2 para o coordenador, caso contrário o nó volta a entrar no modo

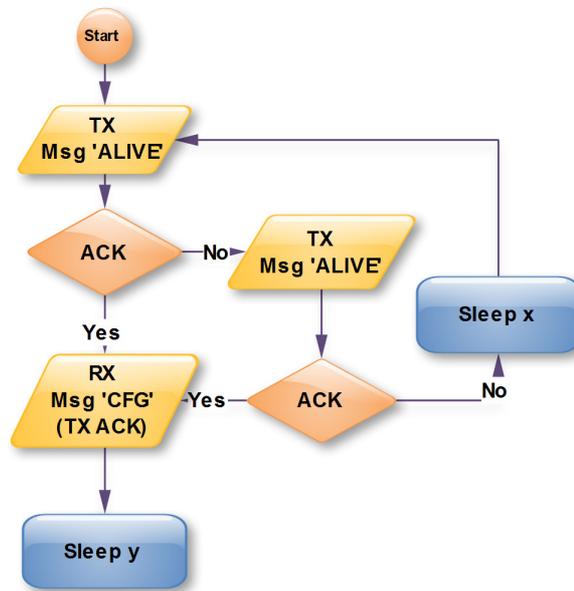


Figura 4.17: Fluxograma 1 do funcionamento do nó da rede

sleep por um período específico de tempo, parâmetro WI, acordando para repetir o processo de amostragem.

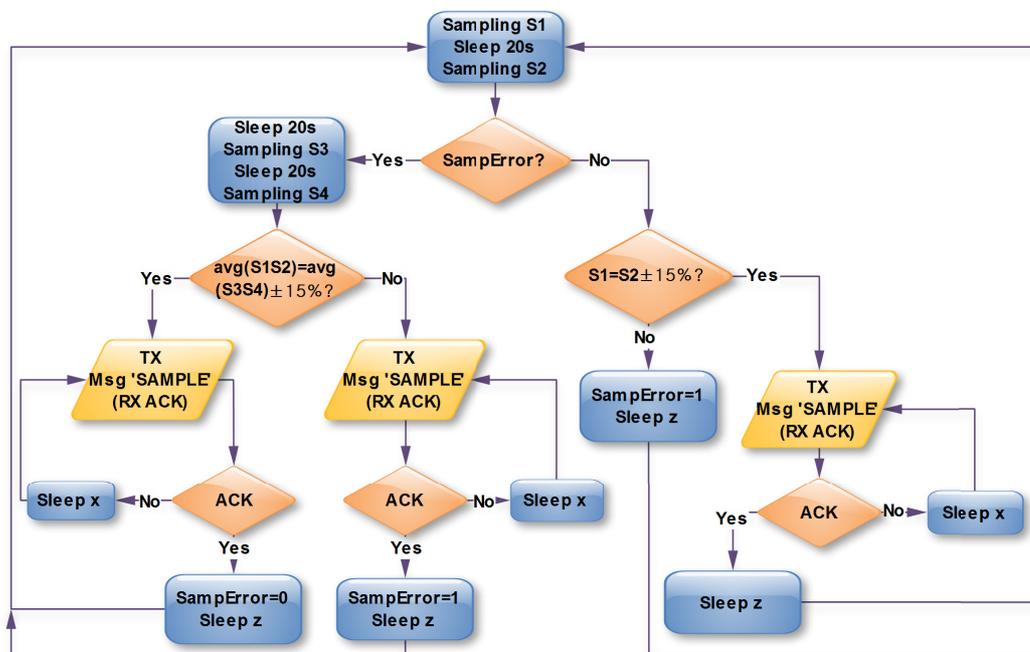


Figura 4.18: Fluxograma 2 do funcionamento do nó da rede

Se as amostras S1 e S2 voltarem a falhar, ou seja, $S1 \neq S2 \pm 15\%$, O nó volta a repetir o processo de amostragem, recolhendo as amostras S3 e S4. Se as amostras voltarem a falhar novamente a comparação com a margem de erro estabelecida, o nó envia na mesma a mensagem do tipo 2 para o coordenador, mas com a indicação que existiram erros nas leituras (campo RS). Caso S3 e S4 estejam dentro da margem estabelecida, o nó envia uma mensagem tipo 2 normal.

Este processo foi implementado para evitar o pior cenário, que é o caso em que as leituras do nível de enchimento são efectuadas no momento em que alguém se encontra a depositar resíduos no interior do contentor. Nestes casos ocorrem leituras erradas do nível de enchimento do ecoponto, que serão corrigidas mais tarde nas amostras S3 e S4. Caso as amostras continuem fora da margem estabelecida, como foi referido anteriormente, o campo RS assinala estas situações servindo como um alarme, indicando que existem problemas com aquele sensor ou com o contentor em questão. Entre cada mensagem enviada para o coordenador da rede é esperada uma mensagem do tipo 4. Se a mensagem requer uma resposta o nó executa e entra posteriormente no modo *sleep*, caso contrário o nó entra directamente no modo *sleep*.

4.4.3 Software de teste à plataforma

Para testar a plataforma Weco, foi desenvolvido *software* em C# (Figura 4.19) que simula a placa de processamento Wise Waste. Desta forma é possível testar todo o protocolo desenvolvido bem como o funcionamento de todo o sistema.

O coordenador da rede, após ter nós associados e estes iniciarem o processo de leitura do nível de enchimento do ecoponto correspondente, está pronto para enviar a informação recolhida para o controlador WW, de acordo com o protocolo WecoWiseWaste (WWW) estabelecido. Neste caso o controlador WW é simulado recorrendo ao *software Weco Simulator*.

Para as comunicações é usado o protocolo RS232, sendo necessário escolher a porta COM associada. A janela “Sample” apresenta os seguintes campos:

- Sample #: Permite visualizar o número de amostras recebidas;
- Address: Indica o endereço físico único (MAC) do nó correspondente;
- Type: Indica o tipo de contentor de onde provém a amostra (papel, vidro, etc);
- Batt: Indica o nível da bateria que alimenta o nó;

4.4. Software desenvolvido

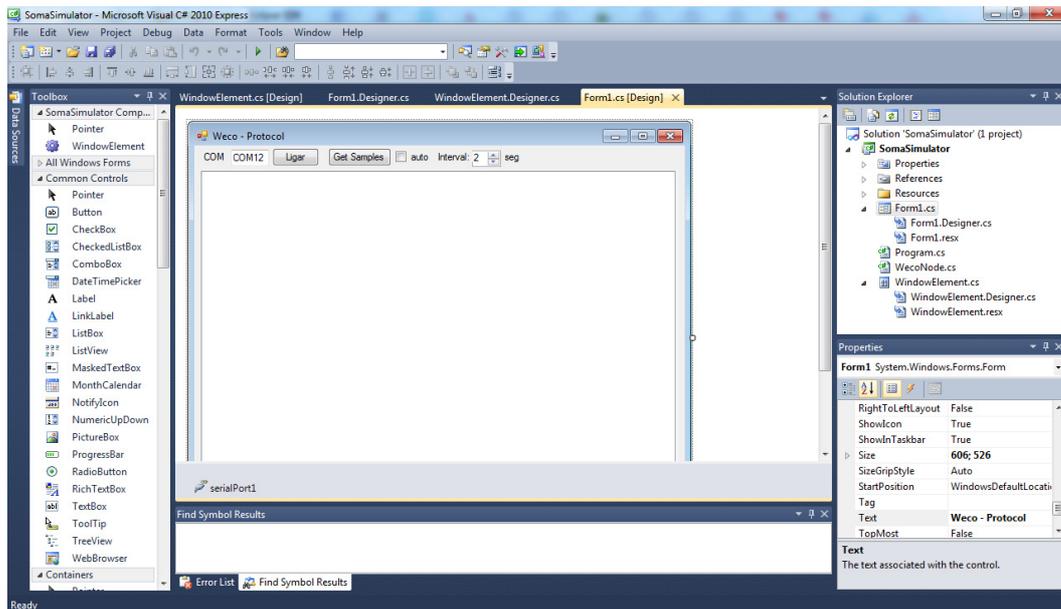


Figura 4.19: Ambiente de desenvolvimento da aplicação Weco Simulator

- Success: Indica se as amostras recolhidas, mediante as configurações presentes no nó correspondente, foram obtidas com ou sem erros, de acordo com o algoritmo de recolha de amostras estabelecido;
- Level: Indica o nível de enchimento do contentor em e de acordo com a profundidade do mesmo. Visualmente é apresentado um contentor que indica o nível de enchimento, bem como apresenta a cor relativa ao tipo de contentor de onde provém a amostra.

O botão “Get Samples” é usado para se pedir ao coordenador, como estabelecido no protocolo, o envio dos dados relativos ao enchimento de cada contentor.

O botão “GetConfigs” permite obter as configurações de cada nó. Cada campo representa os parâmetros configuráveis, como estabelecido no protocolo:

- Address: Permite indicar qual o nó que se pretende obter as configurações;
- WI: Indica o período de *sleep time*, com uma resolução de 30 minutos, entre cada amostragem;
- NT: Indica o tipo de contentor que está associado ao nó, de acordo com a tabela estabelecida;

- EM: Indica a margem de erro, em percentagem, que o nó está a usar no processo de amostragem;
- NR: Indica o número de leituras do nível de enchimento feitas em cada amostragem;
- BAT: Mostra o intervalo de leituras do nível de bateria;
- RSI: Indica o intervalo entre leituras de cada amostragem.

O botão “SetConfigs” permite enviar um novo conjunto de configurações para um nó específico. Cada campo representa os parâmetros configuráveis, como estabelecido no protocolo:

- Address: Permite indicar qual o nó que se pretende enviar novas configurações;
- WI: Configura o período de *sleep time*, com uma resolução de 30 minutos, entre cada amostragem;
- EM: Configura a margem de erro, em percentagem, que o nó está a usar na amostragem;
- NR: Configura o número de leituras do nível de enchimento feitas em cada amostragem;
- BAT: Configura o intervalo de leituras do nível de bateria;
- RSI: Configura o intervalo entre leituras de cada amostragem;
- Reply: Mostra a resposta do nó, que indica se as configurações foram estabelecidas com sucesso ou não.

Na parte inferior da aplicação foi colocada uma *debug window* que permite visualizar os pacotes trocados entre o coordenador e a aplicação.

4.4.4 Gestão de energia

Dado que a plataforma proposta implementa uma arquitectura típica de uma WSN, os dispositivos que implementam os nós da rede são alimentados por uma bateria. Numa configuração de testes do nó da rede usando o SoC CC2530, e usando a bateria recarregável 3VTD70 da *Saft Batteries*, com a sonda em medição contínua do nível de enchimento do ecoponto, mediu-se um consumo médio de corrente de 46.47mA. Com a bateria citada, o sistema não durou mais de 70 horas. Claramente

4.4. Software desenvolvido

foi necessário recorrer aos mecanismos de *low power* dos microcontroladores, tais como os modos de *sleep* e de *deep sleep*.

Alterando o modo de funcionamento da sonda, e implementando um circuito electrónico (Figura 4.20) capaz de desligar completamente o *hardware* adjacente à placa do nó, e explorando os modos de *sleep* do microcontrolador conseguiu-se uma redução significativa no consumo energético dos nós da rede, que passou de 70 horas para o valor teórico de 92027 horas, como se pode verificar posteriormente.

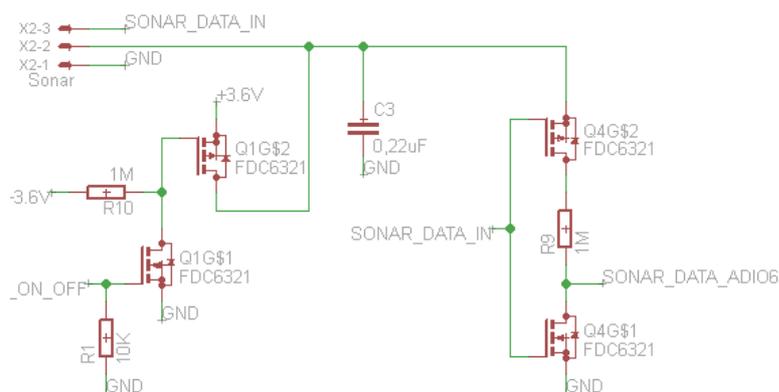


Figura 4.20: Circuito electrónico construído para ligar/desligar completamente a sonda ultra-sónica

A tabela 4.10 ilustra a capacidade necessária para a bateria a escolher de forma a satisfazer o requisito de duração de pelo menos 6 anos. Num período de tempo que não ultrapassa 500ms, o sistema é capaz de recolher informação do nível de enchimento do ecoponto, processar e enviar esta mesma informação com sucesso para o coordenador e voltar a entrar em modo *sleep*. O consumo destas operações, em média é de 0.05A no modo activo e de $60\mu A$ no modo *deep sleep*. Para um cenário de 24 leituras por dia, 6 leituras do nível de enchimento em cada amostra e considerou-se sempre amostras recolhidas erradas, o que forçaria o nó a recolher sempre as amostras S1, S2, S3 e S4 entre cada período de amostragem. Assumiu-se uma taxa de envelhecimento de 20% (valor atribuído por excesso), pois as baterias, mesmo usando tecnologia de *Lithium-thionyl chloride* ($Li - SOCl_2$) que apresentam uma taxa de auto descarga muito baixa, acabam sempre por sofrer perdas de capacidade com o passar do tempo e com as variações de temperatura.

De acordo com os dados da tabela é então necessário recorrer a uma bateria com uma capacidade de pelo menos 3520mA de forma a satisfazer os requisitos de duração

Tabela 4.10: Bateria necessária

Bateria necessária	
Consumption in Operation (A)	0,05
# Daily Readings	24
Consumption Time (s)	0.5
Idle Time (s) in 1 hour	3599.50
Consumption in Idle (A)	0.000060
Average consumption (A-h)	0.000067
Required Capacity	3.52A-h

dos nós da rede. A bateria seleccionada foi a bateria LS17500 [65] (Figura 4.21) da *SAFT Batteries*. As características desta bateria estão ilustradas na Tabela 4.11.



Figura 4.21: Bateria LS7500 da *SAFT Batteries*

Tabela 4.11: Características da Bateria LS7500.

Características da bateria LS7500	
Nominal capacity	3.6 Ah
Nominal voltage	3.6 V
Nominal energy	12.96 Wh
Diameter (max)	17.13 mm
Height (max)	50.90 mm
Typical weight	21.90 g

Como se pode retirar da Tabela, esta bateria tem uma capacidade de 3600mA, o que encaixa perfeitamente nos requisitos do sistema. A tecnologia usada no fabrico destas baterias, permite as características ideais para se poderem implementar no tipo de aplicações onde se insere este projecto. A construção desta bateria, devido aos seus terminais desenhados especialmente para instalação em PCB, facilita a sua integração com a placa do nó da rede.

Usando agora os módulos da *EnOcean* para testar a duração da bateria, foram estudados com mais detalhe os diferentes modos de operação que compõe os módulos STM300 e TCM300. Para isso foram definidos e avaliados todos os modos de funcionamento destes dispositivos. Os modos de funcionamento bem como os consumos médios de cada um estão ilustrados na Tabela 4.12

Tabela 4.12: Modos de operação de um nó da rede

Modos de operação	
Estado	Consumo médio
Idle + Sonda ligada	5,1135616mA
Smart TX	3,8369272mA
RX	32,2455648mA
Deep Sleep	0,037028128mA
Idle	3,4639496mA

A Figura 4.22 ilustra os vários estados e o consumo médio de cada um.

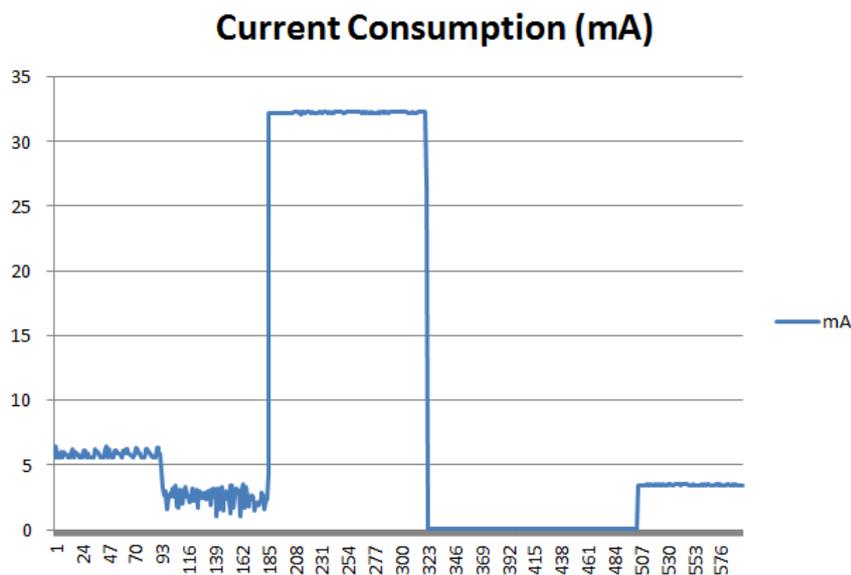


Figura 4.22: Consumo médio de corrente para cada modo de operação.

Para ser possível realizar uma previsão da duração desta bateria face a estes estados, identificou-se também o tempo máximo de cada um. Assumindo que o nó da rede opera no pior cenário possível: leituras periódicas com período de 1h com 4 amostras (S1, S2, S3, S4) por período, representando o cenário em que as leituras

estão erradas por haverem resíduos a serem introduzidos no momento da medição do nível de enchimento. A tabela 4.13 ilustra a previsão da bateria de acordo com o consumo e duração dos vários estados.

Tabela 4.13: Consumo e duração de cada modo numa hora de funcionamento

Modos de operação		
Modo de operação	Consumo médio (A)	Tempo (s)
Amostra sonda	$5,1140 \times 10^{-03}$	$3,5000 \times 10^{-01}$
Idle	$3,4640 \times 10^{-03}$	$1,0000 \times 10^{-03}$
Deep Sleep	$3,7030 \times 10^{-05}$	5,0000
Amostra sonda	$5,1140E - 03$	$3,5000E - 01$
Idle	$3,4640 \times 10^{-03}$	$1,0000 \times 10^{-03}$
Deep Sleep	$3,7030 \times 10^{-05}$	5,0000
Amostra sonda	$5,1140 \times 10^{-03}$	$3,5000 \times 10^{-01}$
Idle	$3,4640 \times 10^{-03}$	$1,0000 \times 10^{-03}$
Deep Sleep	$3,7030 \times 10^{-05}$	5,0000
Amostra sonda	$5,1140 \times 10^{-03}$	$3,5000 \times 10^{-01}$
Idle	$3,4640 \times 10^{-03}$	$1,0000 \times 10^{-03}$
Smart TX	$3,8370 \times 10^{-03}$	$4,0000 \times 10^{-02}$
RX	$2,9420 \times 10^{-02}$	$8,0000 \times 10^{-03}$
Idle	$3,4640 \times 10^{-03}$	$1,0000 \times 10^{-03}$
Deep Sleep/hora	$3,7030 \times 10^{-05}$	3558,5450

Feito este procedimento obtém-se um consumo médio, por hora, de $3,911914 \times 10^{-05}A$ ou $39\mu A$. Com a bateria seleccionada que apresenta uma capacidade de 3600mA, a bateria duraria idealmente para 92027 horas, que representa 3834 dias ou 10,5 anos. Dado que a bateria não é ideal e apresenta taxas de descarga, mesmo que baixas, e considerando uma taxa de envelhecimento de 40%, a bateria duraria 6,3 anos. Este valor garante-nos assim o requisito de duração dos nós da rede por um período mínimo de 6 anos.

De forma a comprovar estes dados, foi feita uma simulação usando a pilha seleccionada. Os resultados estão apresentados no capítulo seguinte.

Todos os consumos de energia foram medidos usando equipamentos de media adequados. Usou-se o multímetro digital KEI2100 [66] (Figura 4.23a) da *Keithley Instruments* [67] e foram corroborados usando o micro wattímetro de potencia LMG95 [68] (Figura 4.23b) da ZES ZIMMER [69].

4.5. Resumo



(a) KEI2100, *Digit USB Digital Multimeter*



(b) LMG95, *Single Phase Precision Power Analyzer*

Figura 4.23: Protótipos do nó da rede usando tecnologia *EnOcean*

4.5 Resumo

Neste capítulo foram apresentados os vários protótipos desenvolvidos durante o projecto bem como o seu funcionamento. Foram também apresentados os protocolos de comunicações desenvolvidos, nomeadamente o protocolo da rede de sensores sem fios bem como o protocolo Weco-WiseWaste (WWW) que garante a compatibilidade desta plataforma com o sistema existente. A bateria, componente essencial que compõe um nó da rede, foi escolhida nesta fase, pois com o *hardware* desenvolvido, os testes de consumo energético são mais realistas. Os testes de consumo conseguem prever que a bateria seleccionada terá a duração esperada de seis anos, um dos requisitos importantes deste projecto.

Capítulo 5

Avaliação do sistema

Este capítulo descreve os resultados obtidos após implementação do sistema Weco. São apresentados os resultados de *performance* do sistema, relativamente ao alcance das comunicações via rádio, cujos testes foram realizados numa ilha ecológica que se encontra instalada nas instalações da SOMA. São também apresentados os resultados do consumo energético do sistema final, que permitem aferir a duração da bateria escolhida pelo período de tempo mínimo estabelecido. Por fim são apresentados dados estatísticos dos benefícios da utilização do sistema numa implementação real do mesmo.

5.1 Resultados de performance

Para os testes de *performance* do sistema, foram efectuados diversos testes na ilha ecológica presente nas instalações da SOMA (Sociedade de Montagem Automóvel S.A.), ilustrada na Figura 5.1, que permitiram aferir o desempenho da plataforma no cenário real onde esta vai ser implementada. Foram testados ambos os protótipos desenvolvidos, o que utiliza o SoC da *Texas Instruments* e o que usa o SoC da *Enocean*, que exploram diferentes espectros radioelétricos.

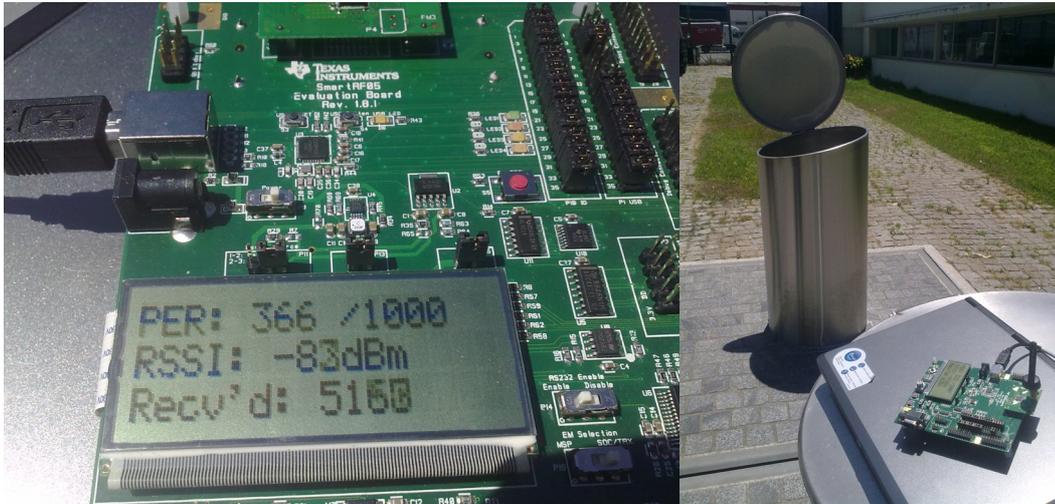
No teste realizado com o SoC CC2530, os resultados de performance do canal rádio foram obtidos usando a placa de desenvolvimento *SmartRF05EB* do *kit* CC2530EMK. Estes dispositivos, que operam na frequência de 2450MHz, apresentaram resultados um pouco desanimadores. Instalado um nó da rede no interior do contentor enterrado, que possui uma estrutura metálica, tal como o resto da infra-estrutura, o canal de rádio apresentou várias deficiências. Com o coordenador colocado imediatamente na



Figura 5.1: Ilha ecológica instalada nas instalações da SOMA

parte de fora do contentor, a uma distância de cerca de 2 metros, estando o contentor com a tampa aberta, a potência obtida do sinal recebido foi de -83 dBm apresentando uma taxa de perda de pacotes, *packet error rate* (PER) superior a 50%. A Figura 5.2 ilustra os resultados deste teste. No momento de captura da imagem, esta taxa era já superior a 30%. Neste teste foram enviados 100000 pacotes consecutivamente com um intervalo de tempo entre eles de 100 ms, usando o canal de rádio 20 do *standard* IEEE 802.15.4.

O segundo teste foi realizado nas mesmas condições, 100000 pacotes consecutivos com um intervalo de tempo entre eles de 100 ms, usando o canal de rádio 20 do *standard* IEEE 802.15.4, com a diferença de o contentor ter sido fechado. Neste teste o canal de rádio apresentou degradação quase total, sendo recebidos apenas alguns pacotes no momento em que se abriu a tampa por uns instantes, para se comprovar que era esta acção que permitia estabelecer/quebrar o canal de rádio. O sinal obtido foi de -91 dBm apresentando um PER maior que 90%. A Figura 5.3 ilustra os



(a) Potência do sinal recebido

(b) Primeiro teste, realizado com tampa do contentor aberta

Figura 5.2: Primeiro teste de performance do canal de rádio usando o SoC CC2530 com a tampa do contentor aberta.

resultados deste teste. No momento de captura da imagem é visível a potência média do sinal recebida, sendo que os pacotes que aparecem devem-se ao facto de se ter aberto a tampa do contentor num instante anterior, durante a execução do teste.



(a) Potência do sinal recebido

(b) Segundo teste, realizado com tampa do contentor fechada

Figura 5.3: Segundo teste de performance do canal de rádio usando o SoC CC2530 com a tampa do contentor fechada.

5.1. Resultados de performance

Os resultados obtidos neste teste revelaram que a plataforma, usando o SoC CC2530 da *Texas Instruments*, para este canal de rádio, não seria possível de ser implementada usando a gama de frequências 2450MHz.

Usando os SoC da *EnOcean*, que operam na gama de frequência de 868MHz, os resultados obtidos foram bem mais animadores. Os testes foram realizados com os protótipos finais do sistema, tendo sido testados os dois modelos desenvolvidos, um com antena exterior e outro com a antena localizada no interior da caixa IP67. Os testes foram realizados enviando uma sequência de 1000 pacotes com um intervalo de 100 ms entre eles.

Instalado o nó da rede, com antena exterior, no interior do contentor metálico, com a tampa fechada obtiveram-se os resultados ilustrados na Figura 5.4. Os resultados foram obtidos iniciando o teste com o coordenador localizado perto do contentor, que foi sendo deslocado a uma velocidade constante até se perderem alguns pacotes na recepção.

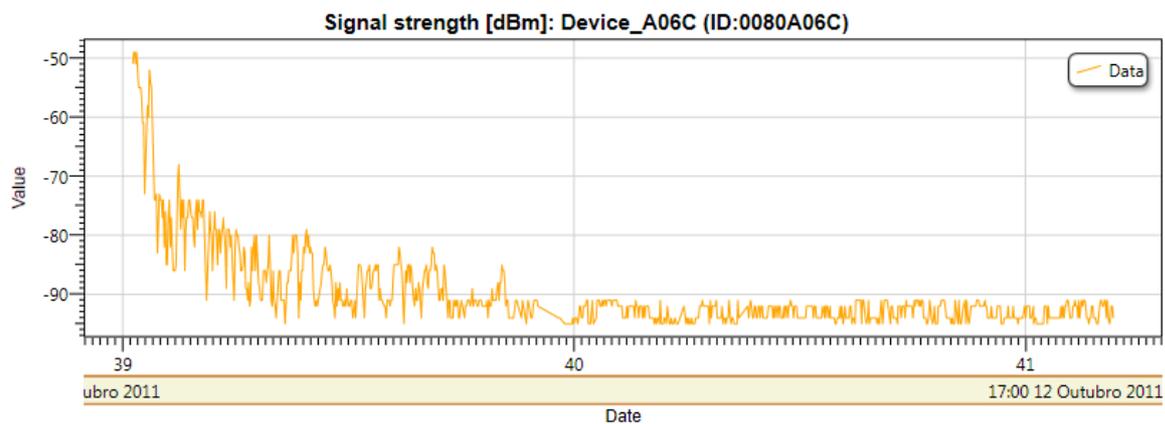


Figura 5.4: Resultados de performance do canal rádio na gama 868MHz com nó da rede a usar antena exterior

A figura 5.4 revela um canal de rádio com uma qualidade superior aos testes realizados com os SoC CC2530. Inicialmente a potência do sinal recebida é inferior a -50dBm, que à medida que o coordenador foi sendo deslocado decresce com o quadrado da distância, característica comum dos canais de rádio. A distância percorrida foi de cerca de 40 metros, sendo que nesta posição a potência do sinal recebida rondava os -92 dBm, sendo o valor de potência mais baixa recebida de -95dBm. Como mostra o histograma da Figura 5.5 foram recebidos 909 pacotes dos 1000 enviados: 705 na potência de -91dBm, 180 na potência de -80dBm, 11 na potência de -65dBm e 13

na potência de -50dBm, representando um PER inferior a 10%. Os pacotes perdidos devem-se ao facto de se ter atingido a distância máxima necessária para se estabelecer um canal de comunicações via rádio entre o coordenador e o nó da rede, caso contrário a taxa de PER seria de 0%.

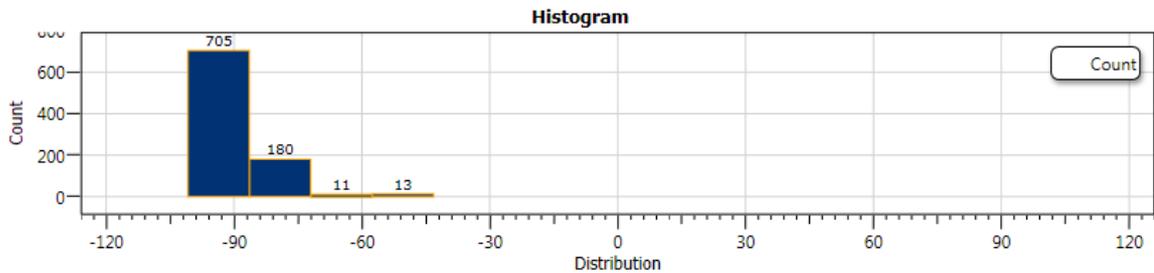


Figura 5.5: Histograma com a contabilização do número de pacotes recebidos no teste com nó da rede com antena exterior.

O segundo teste, realizado nas mesmas condições que o primeiro (1000 pacotes consecutivos com um intervalo de 100 ms deslocando o coordenador a uma velocidade constante até ao local onde terminou o teste anterior), utilizou o nó da rede com antena localizada no interior da caixa IP67.

A figura 5.6 revela os resultados obtidos deste teste. Inicialmente a potência do sinal recebida é inferior a -50dBm, à medida que o coordenador foi sendo deslocado decresce também com o quadrado da distância. A distância percorrida foi de cerca de 40 metros, mesma que no teste anterior. Nesta posição a potência do sinal recebida rondava os -94 dBm, sendo o valor de potência mais baixa recebida de -95dBm. Como mostra o histograma da Figura 5.7 foram recebidos 556 pacotes dos 1000 enviados: 418 na potência de -91dBm, 74 na potência de -76dBm, 32 na potência de -64dBm e 32 na potência de -50dBm, representando um PER de cerca de 50%.

Estes resultados revelam que a antena localizada no interior da caixa tem um desempenho inferior à antena exterior, como seria de esperar, para a mesma distância do nó da rede ao coordenador.

Contudo, foi realizado um último teste. Dado que o coordenador irá ser instalado no interior do painel solar, que fica situado a uma distância nunca superior a 15 metros, os testes realizados anteriormente apenas revelaram o alcance máximo atingido pelo sistema nas condições estabelecidas, mas não revelam se a antena do nó da rede pode ou não ser instalada no interior da caixa IP67, garantindo o funcionamento do sistema, reduzindo os custos fixos e de montagem.

5.1. Resultados de performance

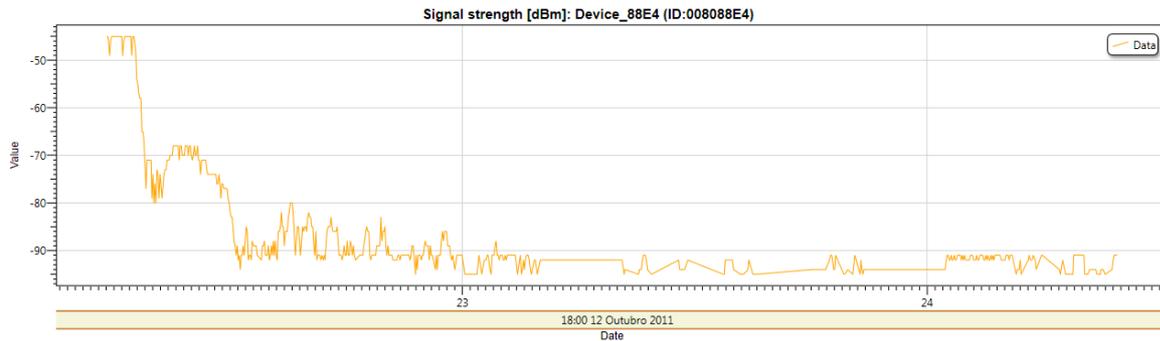


Figura 5.6: Resultados de performance do canal rádio na gama 868MHz com nó da rede a usar antena exterior

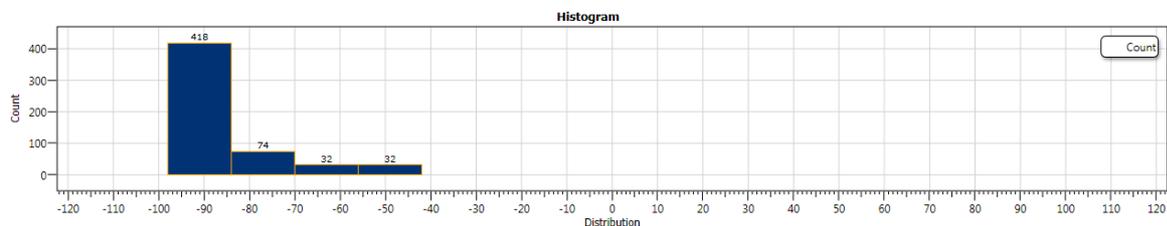


Figura 5.7: Histograma com a contabilização do número de pacotes recebidos no teste com nó da rede com antena exterior.

Desta vez o coordenador da rede foi colocado a uma distância fixa de cerca de 30 metros, tal como mostra a Figura 5.8, e foi iniciado o teste. Os resultados de performance do canal estão ilustrados na Figura 5.9.

Como se pode ver pela Figura 5.9, o valor médio da potência recebida é de cerca de -87dBm. Neste teste, tal como ilustra o histograma da Figura 5.10, foram recebidos 976 pacotes dos 1000 enviados, representando um PER inferior a 3%. Foram recebidos 577 pacotes na potência de -91dBm e 399 na potência de -79dBm. Dado que o coordenador da rede irá ficar a uma distância não superior a 15 metros, facto visível na Figura 5.8, em que a localização do coordenador, no decorrer do teste, está localizado a uma distância muito superior à do mastro que suporta o painel solar, fica garantida a robustez e funcionamento do sistema na gama dos 868MHz.

Desta forma e avaliando os resultados dos testes nas duas gamas de frequência usadas, a solução que usa o SoC CC2530 da *Texas Instruments* foi forçada a ser abandonada. Como foi possível verificar, o alcance oferecido, com o nó instalado no interior do contentor metálico, não é suficiente, apresentando também esta solução



Figura 5.8: Teste de performance do canal rádio na gama 868MHz a uma distância de 30 metros, com nó da rede instalado com antena interior

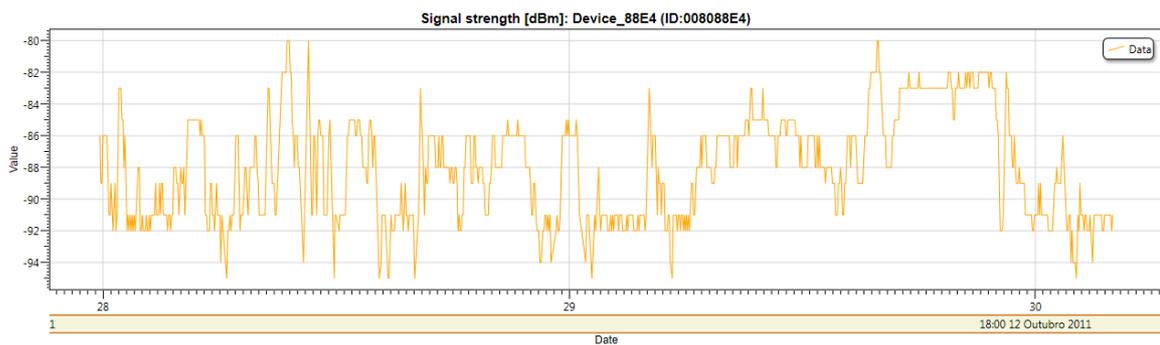


Figura 5.9: Resultados de performance do canal rádio na gama 868MHz a uma distância de 30 metros, com nó da rede instalado com antena interior

5.1. Resultados de performance

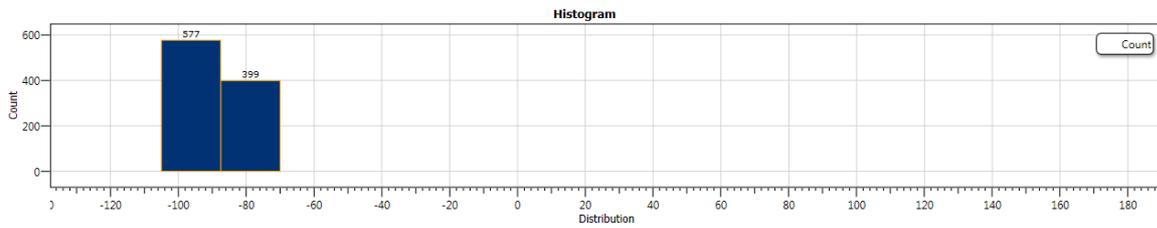


Figura 5.10: Histograma com a contabilização do número de pacotes recebidos no teste com nó da rede com antena interior.

graves dificuldades em atravessar obstáculos com as características do contentor. A solução que implementa os SoC da *EnOcean* revelou óptimos resultados a todos os níveis, e pelo facto de já possuir, ao contrário dos SoC da *Texas Instruments*, uma certificação CE, torna esta solução a solução escolhida para implementar o sistema Weco. A Figura 5.11 ilustra o protótipo final, usando tecnologia *EnOcean*, com antena no interior da caixa com *IP Rating 67*.

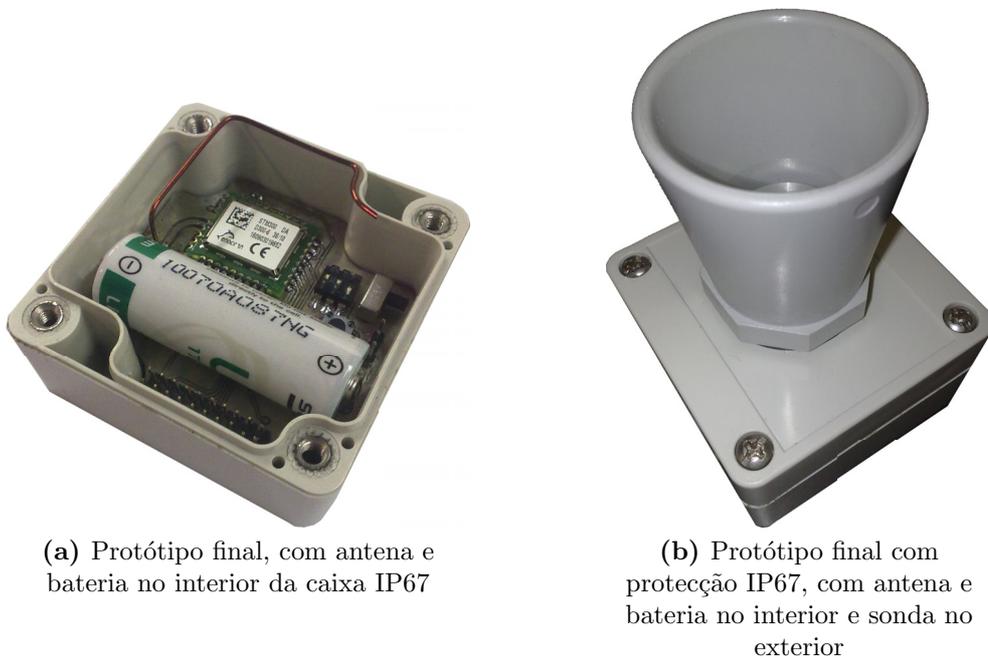


Figura 5.11: Protótipo final, com protecção IP67

5.2 Tempo de vida da solução

Para garantir o funcionamento da bateria seleccionada no período mínimo de seis anos, estabelecido nos requisitos da plataforma desenvolvida, foram realizados testes em laboratório ao sistema desenvolvido na gama de frequências de 868MHz.

Para garantir a duração da bateria, foram realizados testes no *hardware* final, em que foram ajustados os tempos de cada ciclo nos diferentes modos de operação, aumentando, por exemplo, o tempo em *idle* e diminuindo o tempo em *deep sleep*. Foi usado também o *led* instalado no PCB, de forma a aumentar o consumo de um modo de operação e de forma a permitir informação visual para se poder detectar os vários estados de funcionamento permitindo também detectar quando o sistema deixaria de funcionar.

Os modos de operação, bem como a sua duração e respectivos consumos, estão ilustrados na Tabela 5.1. Os testes foram nas condições do pior cenário do sistema, que é quando as leituras do nível de enchimento são realizadas quando alguém se encontra a depositar resíduos no interior do contentor, sendo necessário que o sistema processe as amostras S1, S2, S3 e S4, ligando a sonda de ultra-sons mais vezes, o que aumenta significativamente o consumo.

É também importante referir que os testes não ultrapassam a corrente contínua máxima da bateria, que é de 130 mA, garantindo assim um teste fiável com resultados credíveis.

O consumo total destes modos de funcionamento é de $1,63 \times 10^{-02}$ A-h. Com a capacidade da bateria (3600 mA) e repetindo estes modos periodicamente com um período de 1 hora, durante 24 horas por dia, prevê-se que o sistema apresente uma duração, com um factor de envelhecimento de 20%, de 9,21 dias de pleno funcionamento. Contudo, este teste revelou, uma duração de 12 dias em pleno funcionamento, ficando no 13º dia com um comportamento que indicava baixo nível da bateria, em que o *led* piscava constantemente, revelando que o microcontrolador estaria em sucessivos *resets*, significando portanto o fim de carga da bateria.

Face a estes resultados, ficou provado que a bateria foi bem seleccionada para este sistema, sendo que a sua duração irá cumprir o requisito de seis anos de funcionamento.

Tabela 5.1: Teste de consumo energético do protótipo final com a bateria LS7500

Teste de consumo energético			
Modo de operação	Duração (ms)	Consumo médio (mA)	Consumo (A-h)
Led + Iddle	154	3,6	$1,54 \times 10^{-07}$
Amostra Sonda	350	5,1135616	$4,97 \times 10^{-07}$
Iddle	103	3,47	$9,93 \times 10^{-08}$
Deep Sleep	2000	0,001	$5,56 \times 10^{-10}$
Led + Iddle	154	3,6	$1,54 \times 10^{-07}$
Amostra Sonda	350	5,1135616	$4,97 \times 10^{-07}$
Iddle	103	3,47	$9,93 \times 10^{-08}$
Deep Sleep	2000	0,001	$5,56 \times 10^{-10}$
Led + Iddle	154	3,6	$1,54 \times 10^{-07}$
Amostra Sonda	350	5,1135616	$4,97 \times 10^{-07}$
Iddle	103	3,47	$9,93 \times 10^{-08}$
Deep Sleep	2000	0,001	$5,56 \times 10^{-10}$
Led + Iddle	154	3,6	$1,54 \times 10^{-07}$
Amostra Sonda	350	5,1135616	$4,97 \times 10^{-07}$
Iddle	103	3,47	$9,93 \times 10^{-08}$
Smart TX	150	3	$1,25 \times 10^{-07}$
RX	1800000	32,35	$1,62 \times 10^{-02}$
Iddle	103	3,47	$9,93 \times 10^{-08}$
Led + Iddle	100000	3,6	$1,00 \times 10^{-04}$

5.3 *Weco Simulator*

Para testar o protocolo WWW foi criado o software *Weco Simulator*. Este simulador, como já foi referido, permite testar o protocolo usado para comunicar com o sistema actual, WiseWaste. A Figura 5.12 ilustra a janela principal desta aplicação.

Na imagem é visível que foi recebido um pacote do tipo S (*sample*), referente ao nó com o endereço 0x5CD06C. O contentor está da cor amarela, de acordo com o tipo de contentor que representa (embalagens) e indica o nível de enchimento. A janela de *debug* apresenta sempre as mensagens trocadas entre a aplicação e o coordenador da rede presente na ilha ecológica. Caso seja adicionado outro nó à rede, será acrescentado dinamicamente outro separador contendo estas mesmas informações e funções anteriormente descritas. Na imagem é visível que existem outros contentores em monitorização, nomeadamente os nós com os endereços 0x80A06C (que correspondia a um contentor de papel) e 0x20B03F (que correspondia a um contentor de vidro).

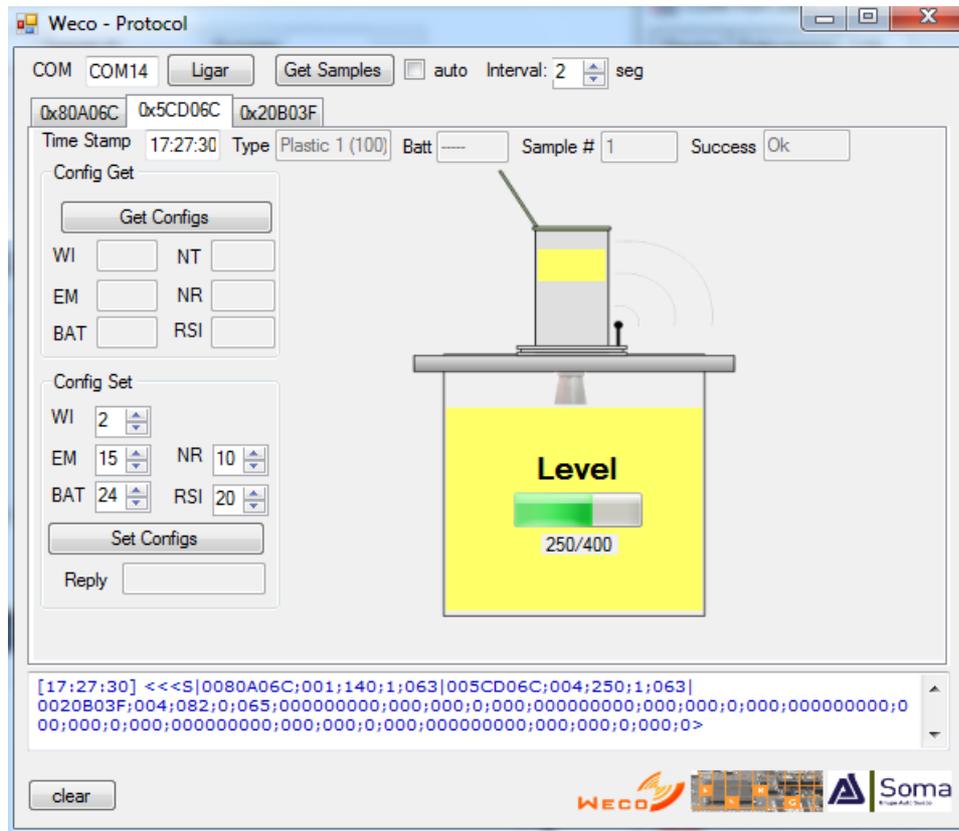


Figura 5.12: Aplicação de testes à plataforma Weco

5.4 Vantagens do Sistema Weco

As motivações que levaram ao desenvolvimento deste projecto foram melhorar a eficiência do processo de recolha de resíduos sólidos urbanos depositados nos ecopontos com destino à reciclagem. Equipamento, recursos humanos, manutenção e combustível representam gastos para as empresas de recolha de forma que um sistema de monitorização robusto e fiável com informação em tempo real do nível de enchimento dos ecopontos das ilhas ecológicas seria um grande apoio tecnológico que permitiria uma melhor gestão destes elementos.

Desta forma é importante traduzir este suporte tecnológico ao panorama da recolha de resíduos urbanos em valores monetários, de forma a poder-se verificar se o sistema, apesar de robusto e fiável, consegue realmente reduzir custos e justificar a sua implementação.

De acordo com dados estatísticos recolhidos pela SOMA, através da análise à

utilização do sistema actual, o sistema Weco pode garantir redução de custos até 40% comparativamente a um processo de recolha sem plataforma de monitorização. Isto significa que o retorno sobre o investimento pode ser obtido ao fim de 18 meses, garantindo assim que um sistema deste tipo é um investimento que trás grandes vantagens às empresas de recolha.

De forma a avaliar o valor monetário destes 40%, foi consultada uma empresa que dedica a sua actividade à recolha de roupa, com destino à caridade e apoio social, depositada em contentores próprios localizados no exterior de zonas previamente estudadas. De acordo com esta empresa, que mantém actividade em todo o país, os gastos em combustível, só na zona de Braga, ultrapassam os 9000€ mensais. Cada motorista percorre em média 400 Km por dia para verificar e recolher todos os contentores definidos na sua rota. Sem um sistema de monitorização, os problemas associados à recolha de resíduos urbanos acabam por se reflectirem também nesta empresa. Por vezes os contentores apresentam um nível de enchimento que não justifica a recolha, traduzindo-se numa deslocação que causa prejuízo, e por vezes os contentores encontram-se cheios à bastante tempo e nenhuma recolha foi realizada, traduzindo-se assim numa perda de eficiência nas recolhas. A única forma que a empresa tem para aumentar a sua eficiência de recolha é através de dados estatísticos recolhidos pelos condutores dos veículos de recolha quando estes se deslocam ao contentor ou através de chamadas telefónicas recebidas que são feitas por pessoas que foram depositar roupa no contentor e este se encontrava cheio.

Com um sistema de monitorização do nível de enchimento dos contentores de recolha de roupa, só considerando o consumo de combustível, os 9000€ mensais iriam ser reduzidos em 3600€. A acrescentar a esta redução está também associado o custo da manutenção dos veículos de recolha, que ao terem rotas optimizadas iriam percorrer menos Km, representando um menor número de horas de trabalho dos motoristas e uma menor utilização do veículo reduzindo-se assim os custos associados à sua utilização e manutenção.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

A plataforma Weco, uma plataforma de monitorização do nível de enchimento de ecopontos, com base nos resultados obtidos comportou-se como seria esperado, mostrando ser uma boa solução de baixo custo de implementação, com comunicações *wireless* e de baixo custo energético. Pode ser usada em qualquer tipo de contentor existente, pois devido á sua natureza *wireless* não necessita de cabos de alimentação e comunicação, e devido ao seu tamanho reduzido não traz nenhum constrangimento à sua colocação no interior dos diferentes contentores.

Permite fácil integração com o sistema actual, WiseWaste, podendo ser integrada em ilhas ecológicas onde este já esteja implementado, dotando assim todas as ilhas com um sistema sem fios.

Relativamente ao consumo energético, com o sistema de gestão de energia implementado, os nós da rede mostraram óptimos resultados, garantindo um período de funcionamento de pelo menos seis anos, como requerido.

No que diz respeito ao canal de comunicações via rádio, os nós da rede implementados nos módulos STM300 e TCM300 da *EnOcean* revelaram óptimos resultados, ao contrário dos nós da rede implementados nos SoCs da *Texas Instruments*, resultando no abandono da implementação da solução nestes últimos. Apesar dos resultados não terem ido ao encontro do requerido, a solução que utiliza a gama de frequência dos 2450MHz, não fica impedida de ser utilizada noutra tipo de contentores, que não os enterrados de estrutura metálica, podendo vir até a ser utilizada noutra tipo de aplicações.

A plataforma Weco assegura uma recolha de dados eficiente do nível de enchimento dos ecopontos, dados esses que são utilizados por parte das empresas de recolha de

resíduos sólidos urbanos com o objectivo de otimizar e reduzir alocação de recursos humanos, equipamento usado, traçar rotas optimizadas para os veículos de recolha reduzindo assim custos associados ao combustível consumido.

A plataforma Weco, sendo um suporte tecnológico para as empresas de recolha, consegue reduzir os custos associados à recolha de resíduos com uma redução de até 40%, permitindo um retorno sobre o investimento em apenas 18 meses. Por conseguinte, com redução do consumo de combustível por parte dos veículos de recolha, que podem consumir entre 50 a 80 litros/100Km, as emissões de gases para a atmosfera são também reduzidas, a plataforma Weco torna o processo da recolha de resíduos sólidos urbanos um processo mais eficaz e mais amigo do ambiente.

Terminado o desenvolvimento da plataforma Weco, esta será brevemente implementada pela SOMA em ilhas ecológicas que serão instaladas em diversos pontos do país.

6.1 Trabalho Futuro

Apesar do sucesso do desenvolvimento da plataforma Weco, e de todas as vantagens que esta oferece, o desenvolvimento não fica por aqui. Como trabalho futuro pode-se enumerar os seguintes pontos:

- Substituição total da plataforma actual, passando para o coordenador da rede todas as funções da placa de processamento WiseWaste, que por sua vez passa a utilizar o módulo GSM para comunicação com o sistema remoto. Os componentes actuais que não foram substituídos, por exemplo o módulo GSM, poderão ser alvo de um estudo de modo a avaliar se existem outras alternativas;
- Dotar os nós da rede com um sistema de recolha de energia do meio ambiente, explorando mecanismos de *energy harvesting*, descartando desta forma a necessidade da utilização de uma bateria para alimentar os nós da rede, garantindo assim uma utilização vitalícia da plataforma. A energia poderia ser gerada, por exemplo, através do movimento mecânico de abertura da tampa do contentor, quando são depositados resíduos nos contentores;
- Dotar os nós da rede com mais sensores de forma a poderem monitorizadas mais grandezas físicas, como por exemplo a temperatura no interior do contentor, permitindo assim introduzir-se um sistema anti-incêndios, pois muitas vezes

os contentores são alvos de actos de vandalismo, representando grandes custos para as empresas de recolha;

- Por fim, a plataforma, devido à sua implementação genérica, pode ser expandida para utilização noutra tipo de aplicações que necessitem de um sistema de monitorização sem fios deste género.

Apêndices

Apêndice A

PCBs

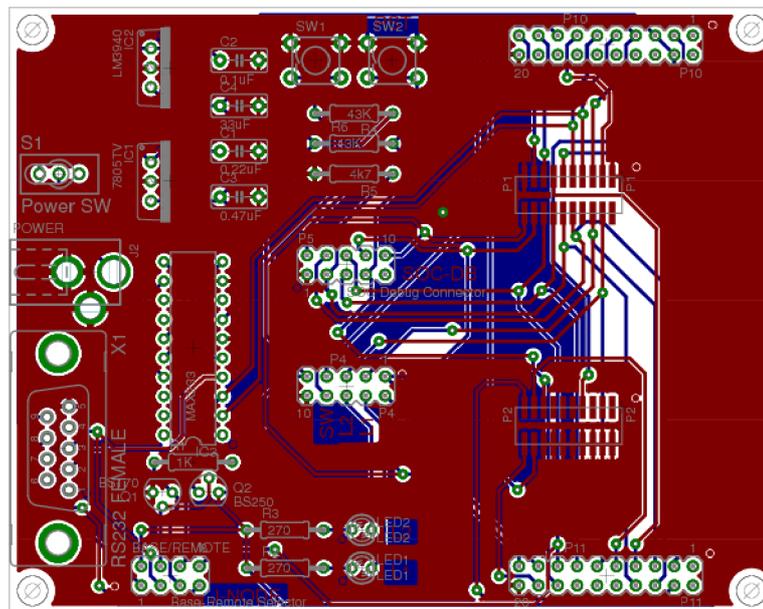


Figura A.1: PCB da placa de desenvolvimento CC25XXEB-ESRG

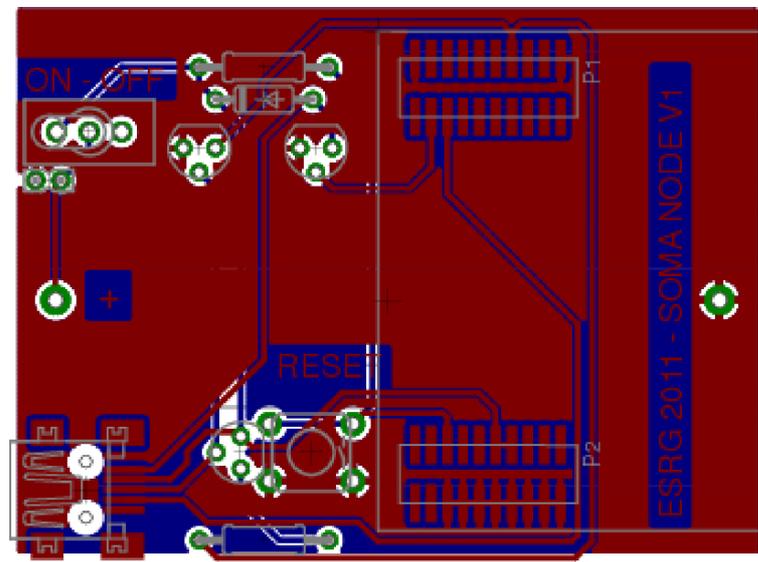


Figura A.2: PCB da placa que implementa um nó da rede

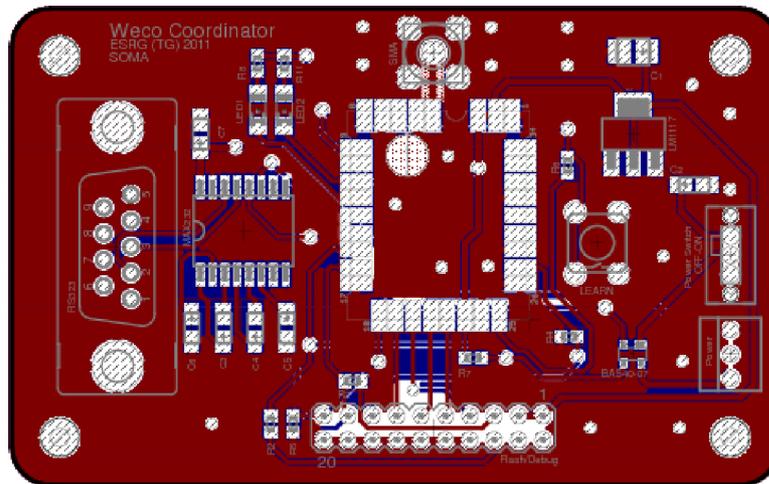


Figura A.3: PCB da placa que implementa o coordenador da rede usando tecnologia *Enocean*

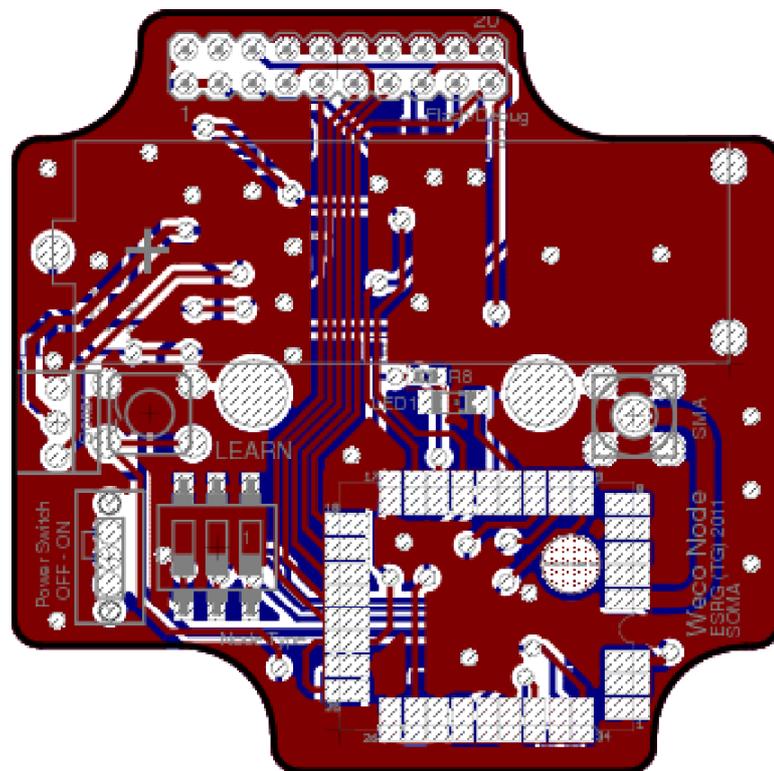


Figura A.4: PCB da placa que implementa o nó da rede usando tecnologia *Enocean*

Apêndice B

Esquemáticos

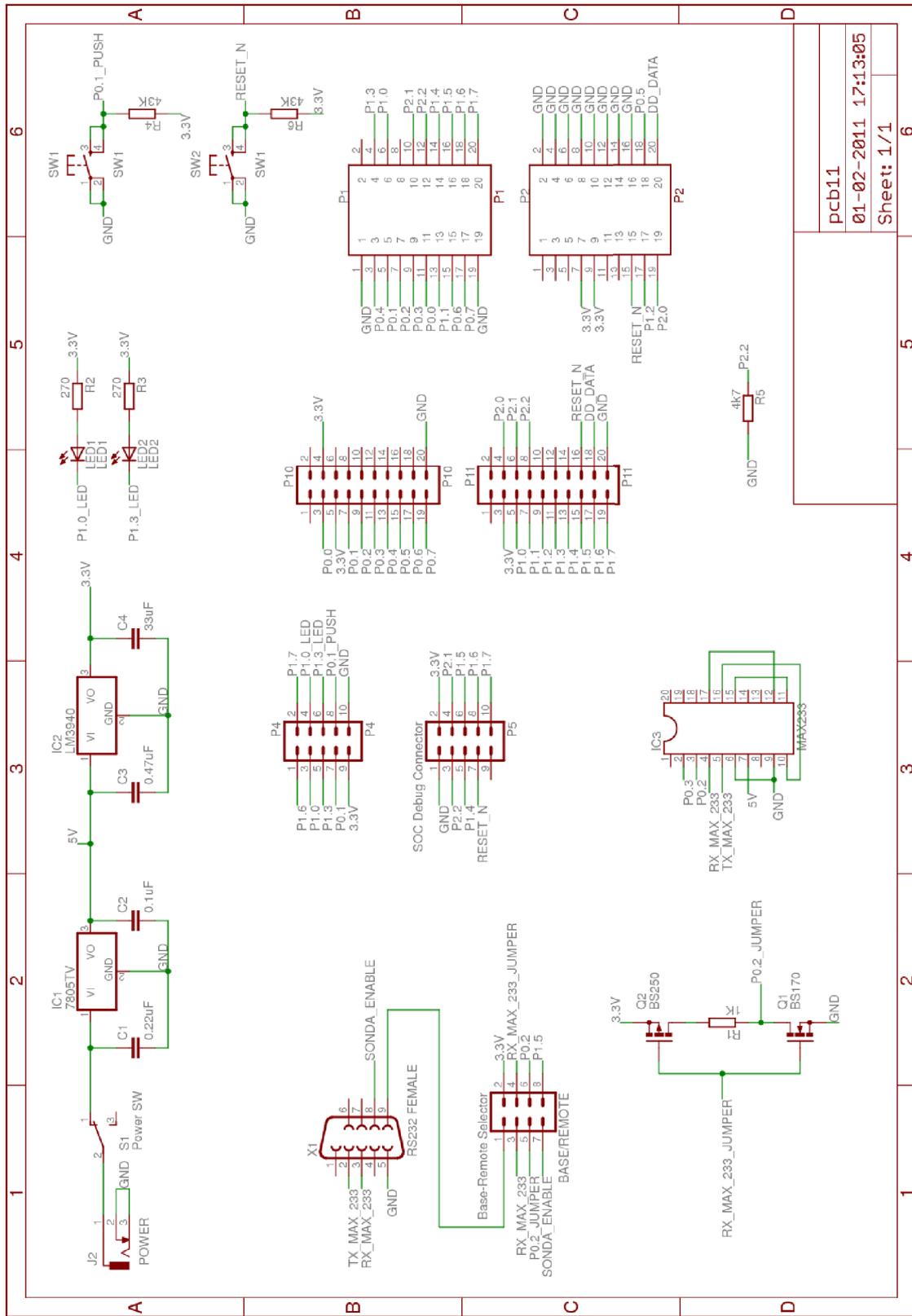


Figura B.1: Esquemático da placa de desenvolvimento CC25XXEB-ESRG

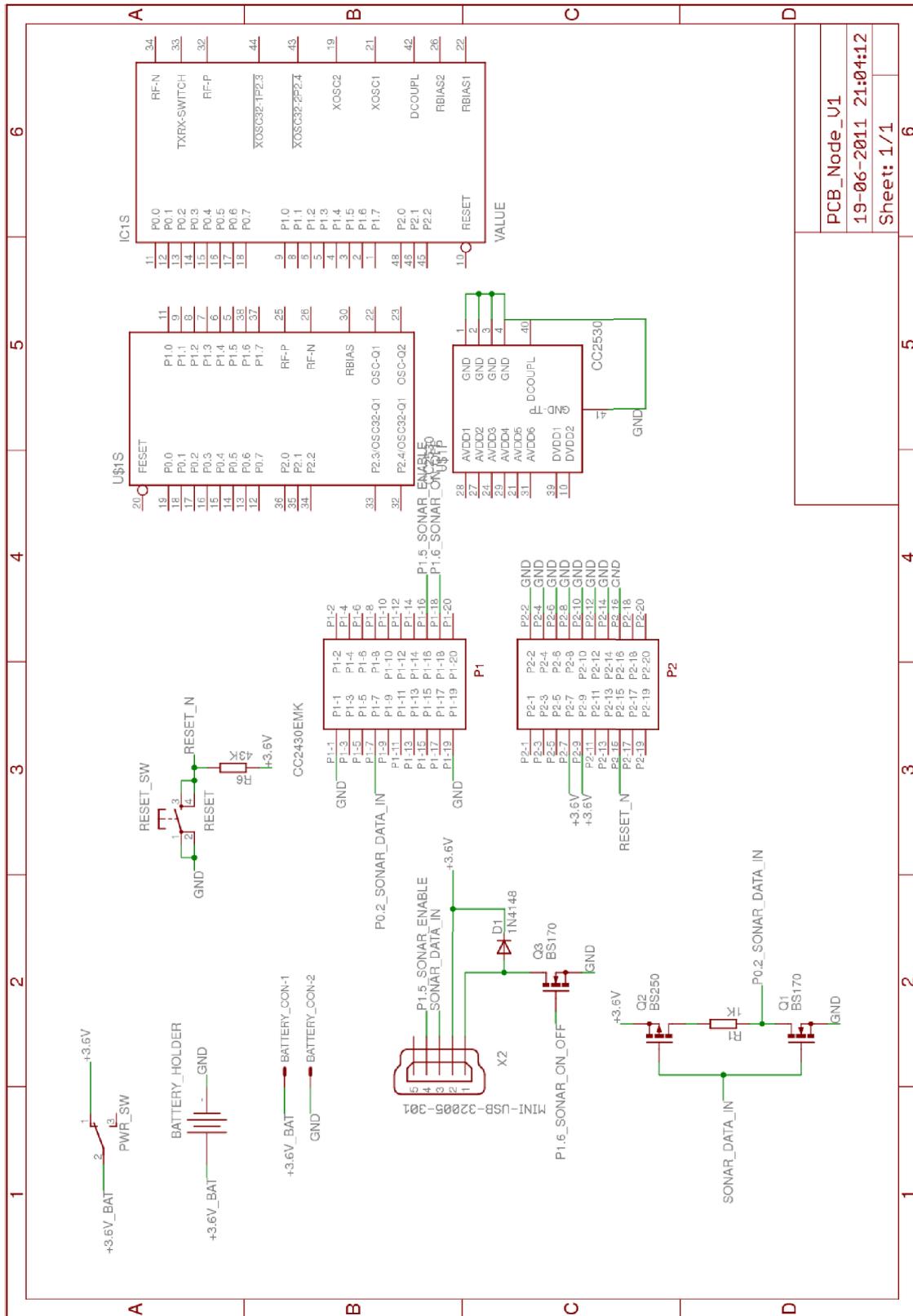
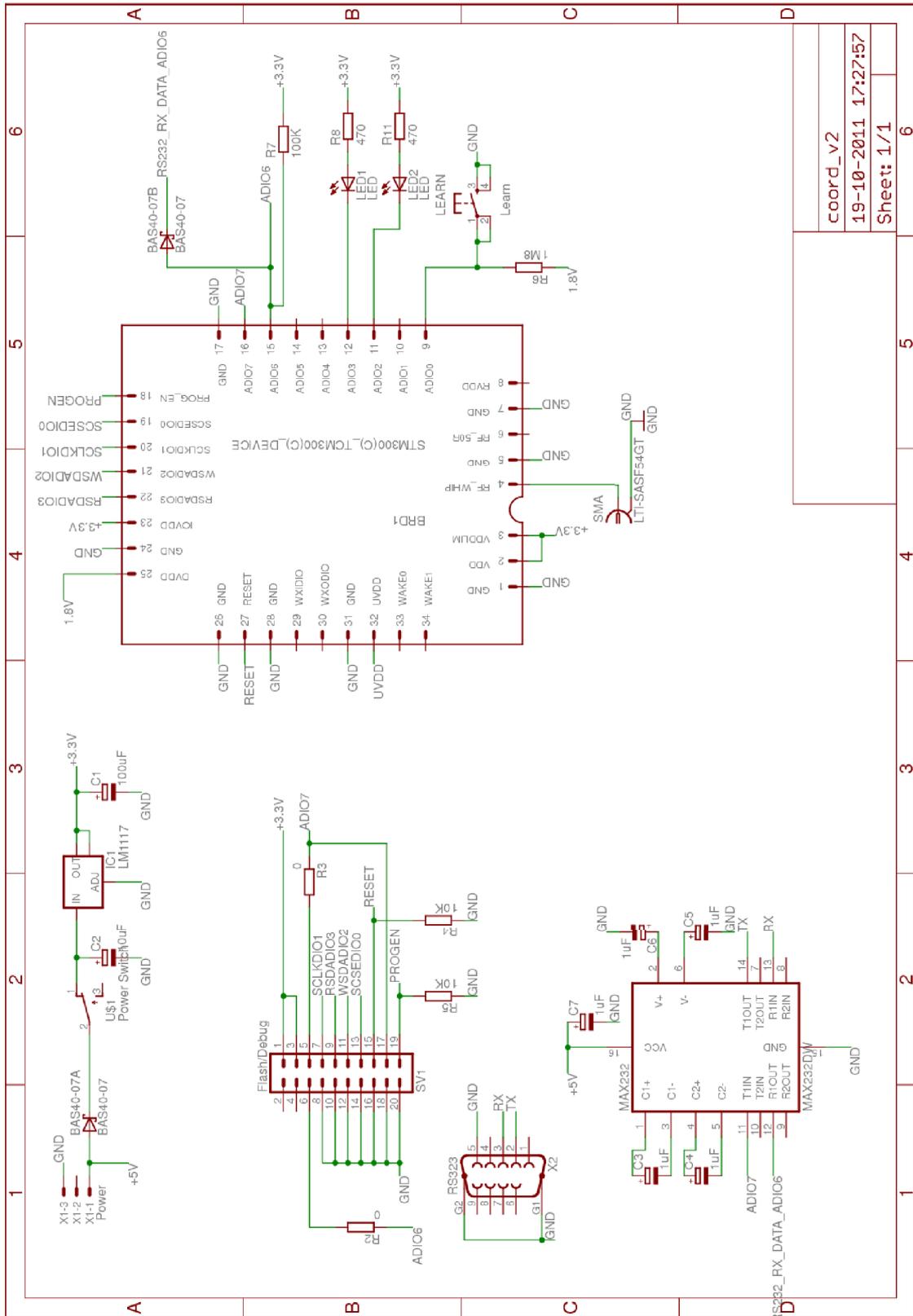


Figura B.2: Esquemático da placa que implementa um nó da rede



coord_v2
19-10-2011 17:27:57
Sheet: 1/1

Figura B.3: Esquemático da placa que implementa o coordenador da rede na solução Enocean

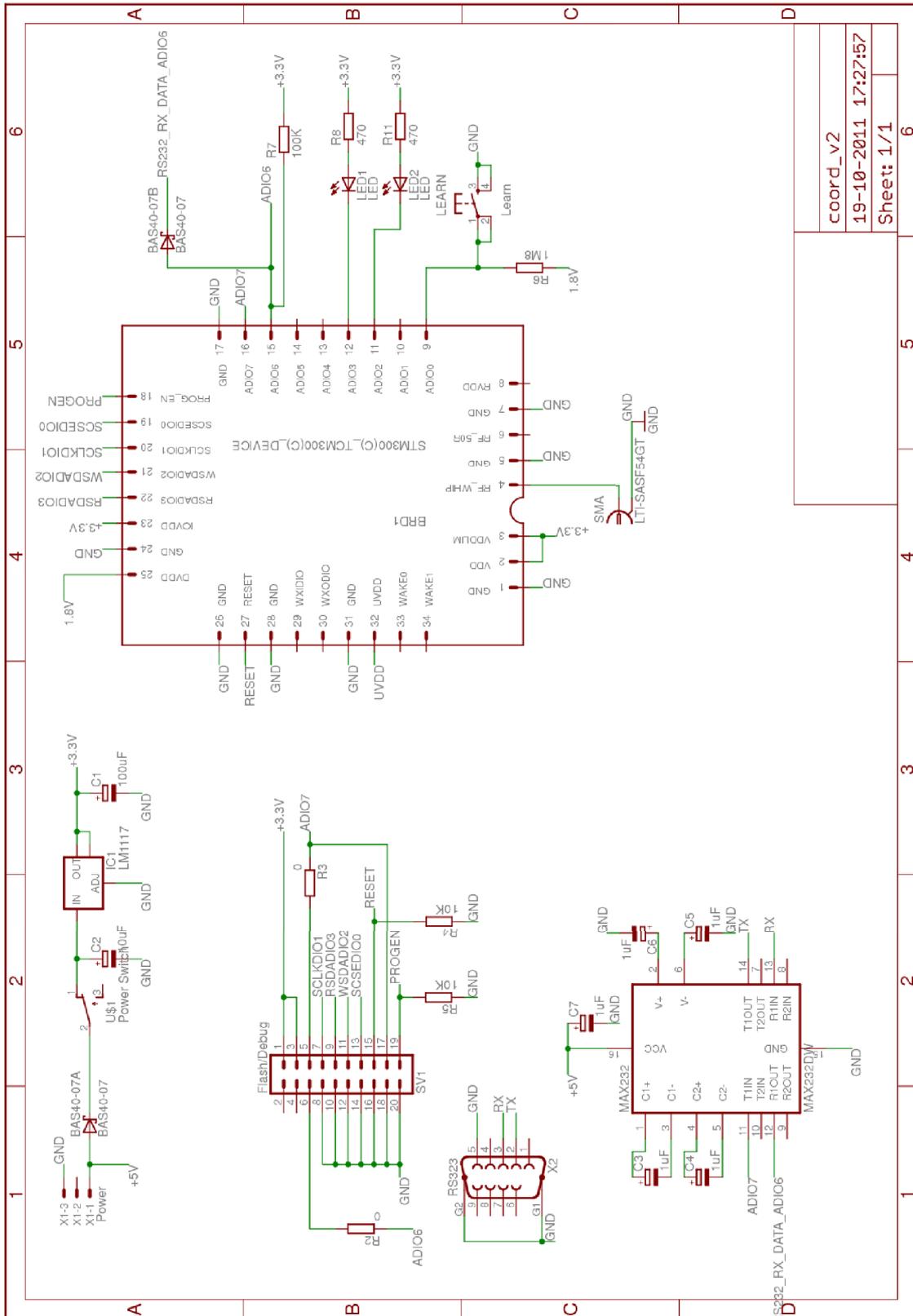


Figura B.4: Esquemático da placa que implementa o nó da rede na solução *Enocean*

Bibliografia

- [1] (2011) Soma - Sociedade de Montagem de Automóveis, S.A. [Online]. Available: <http://www.soma.pt/>
- [2] (2011) ALMOVERDE - Ecologia, Lda. [Online]. Available: <http://www.almoverde.pt>
- [3] M. T. Ltd. (2011) SmartBin. [Online]. Available: <http://www.smartbin.com>
- [4] (2011) Swisslogix. [Online]. Available: <http://www.swisslogix.com>
- [5] (2011) ONE PLUS Corp. [Online]. Available: <http://www.onepluscorp.com>
- [6] B. Technologies. (2011) Syren. [Online]. Available: <http://www.bh-environnement.com>
- [7] G. D. Technologies. (2011) EMERALD. [Online]. Available: <http://www.green-diamond-technologies.com/>
- [8] (2011) Tecmic. [Online]. Available: <http://www.tecmic.pt>
- [9] U. de Trás-os-Montes e Alto Douro. (2011) Smart Containers. [Online]. Available: <http://smartcontainers.utad.pt/>
- [10] M. Corporation. (2011) Imagine Cupe. [Online]. Available: <http://www.imaginecup.com/>
- [11] (2011) BRAVAL - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A. [Online]. Available: <http://www.braval.pt>
- [12] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 40, no. 8, pp. 102 – 114, aug 2002.

- [13] W. Dargie and C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, 1st ed. Wiley, 2010.
- [14] (2011) Libelium. [Online]. Available: <http://www.libelium.com/libeliumworld/articles/101031032811>
- [15] Texas Instruments. (2011) CC1111, Sub-1GHz System-on-Chip. [Online]. Available: <http://www.ti.com/>
- [16] (2011) *Microchip Technology*. [Online]. Available: <http://www.microchip.com>
- [17] Atmel Corporation. (2011) AVR Raven. [Online]. Available: http://www.atmel.com/dyn/products/tools_card.asp?tool_id=4395
- [18] *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE Std., Rev. IEEE Std 802.15.4-2006, 2006. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>
- [19] (2011) *Advantech*. [Online]. Available: http://www.advantech.eu/it/edm/2011_WSN/index_flash.htm
- [20] J. A. Gutiérrez, J. Edgar H. Callaway, and R. L., *Low-rate wireless personal area networks : enabling wireless sensors with IEEE 802.15.4*, 1st ed. IEEE, 2004.
- [21] (2011) TinyOS. [Online]. Available: <http://www.tinyos.net/>
- [22] R. Gao, H. Zhou, and G. Su, "Structure of wireless sensors network based on tinyos," in *Control, Automation and Systems Engineering (CASE), 2011 International Conference on*, july 2011, pp. 1 –4.
- [23] (2011) Pixie: An Operating System for Resource-Aware Programming of Sensor Networks. [Online]. Available: <http://fiji.eecs.harvard.edu/Pixie>
- [24] Y. Li and P. Wilson, "Partos-11: an efficient real-time operating system for low-cost microcontrollers," in *Electronic Design, Test and Applications, 2002. Proceedings. The First IEEE International Workshop on*, 2002, pp. 235 –239.
- [25] (2011) nesC: A Programming Language for Deeply Networked Systems. [Online]. Available: <http://nesc.sourceforge.net/>

- [26] W. Dong, C. Chen, X. Liu, Y. Liu, J. Bu, and K. Zheng, “Senspire os: A predictable, flexible, and efficient operating system for wireless sensor networks,” *Computers, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 12, pp. 1788 –1801, dec. 2011.
- [27] (2011) DSPnano RTOS. [Online]. Available: http://www.rowebots.com/products/unison_rtos
- [28] (2011) Acorn micro kernel. [Online]. Available: <http://acorn-kernel.appspot.com/>
- [29] (2011) FreeRTOS. [Online]. Available: <http://www.freertos.org/>
- [30] L. G. M. Gouveia, “Sistema de monitorização do nível de enchimento de ecopontos,” Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2009.
- [31] N. E. M. Association, “ANSI/IEC 60529-2004, Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code),” 2004.
- [32] (2011) *Texas Instruments*. [Online]. Available: <http://www.ti.com>
- [33] *CC2530- A True System-on-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee Applications*, <http://www.ti.com/lit/ds/swrs081b/swrs081b.pdf>.
- [34] (2011) *CC2530 Development Kit*. [Online]. Available: <http://www.ti.com/tool/cc2530dk>
- [35] (2011) *CC2530 Evaluation Module Kit*. [Online]. Available: <http://www.ti.com/tool/cc2530emk>
- [36] (2011) *CC2530 ZigBee Development Kit*. [Online]. Available: <http://www.ti.com/tool/cc2530zdk>
- [37] (2011) *CC2533 Basic RF4CE Development Kit*. [Online]. Available: <http://www.ti.com/tool/cc2533dk-rf4ce-ba>
- [38] (2011) *Enocean*. [Online]. Available: <http://www.enocean.com/>
- [39] *TCM300 - Transceiver module for programmable system components*, http://www.enocean.com/en/enocean_modules/tcm-300/.

- [40] *STM300 - Transceiver module for programmable system components*, <http://www.enocean.com/en/stm300/>.
- [41] *DIRECTIVE 2004/108/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*, THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION Std., 2004. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:390:0024:0037:en:PDF>
- [42] *DIRECTIVE 2006/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*, THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION Std., 2006. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:374:0010:0019:en:PDF>
- [43] *DIRECTIVE 1999/5/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*, THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION Std., 1999. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:091:0010:0028:fr:PDF>
- [44] (2011) *EDK300 - Developer kit for Dolphin modules*. [Online]. Available: http://www.enocean.com/en/enocean_modules/edk-300/
- [45] (2011) Battery Knowledge. [Online]. Available: <http://www.batteryspace.com/batteryknowledge.aspx>
- [46] (2011) *SANYO*. [Online]. Available: <http://us.sanyo.com/Industrial-Batteries/Lithium-Ion-Li-ion->
- [47] (2011) *SHARP Group of Industries*. [Online]. Available: <http://www.sharpbattery.in/>
- [48] (2011) *Varta*. [Online]. Available: <http://www.varta.com/eng/>
- [49] (2011) Saft Batteries. [Online]. Available: <http://www.saftbatteries.com/>
- [50] *Lithium-thionyl chloride (Li-SOCl₂) - LS cell range*, http://www.saftbatteries.com/Produit_LS_cell_range_303_6/Language/en-US/Default.aspx.
- [51] *High Temperature Series Nickel-Cadmium VT D 70*, http://www.houseofbatteries.com/documents/VT_D_70.pdf.

- [52] *LV- MaxSonar - WR1TM*, http://www.maxbotix.com/documents/MB7001_Datasheet.pdf.
- [53] (2011) MaxBotix Inc. [Online]. Available: <http://www.maxbotix.com>
- [54] (2011) Schneider Electric. [Online]. Available: <http://www.schneider-electric.com>
- [55] (2011) IFM Electronic. [Online]. Available: <http://www.ifm.com>
- [56] (2011) Senix. [Online]. Available: <http://www.senix.com/>
- [57] (2011) Hagisonic. [Online]. Available: <http://www.hagisonic.com/>
- [58] (2011) YeRobot. [Online]. Available: www.YeRobot.com
- [59] (2011) *Seed Studio Works*. [Online]. Available: www.seedstudio.com
- [60] (2011) Parallax. [Online]. Available: www.parallax.com
- [61] (2011) Devantech. [Online]. Available: <http://www.devantech.eu/>
- [62] (2011) *Eldon Enclosure Systems*. [Online]. Available: <http://www.eldon.com/>
- [63] *Watertight - Styled Lid - Polycarbonate Enclosure 1555B*, <http://www.hammondmfg.com/pdf/1555B.pdf>.
- [64] (2011) *Hamming Manufacturing*. [Online]. Available: <http://www.hammondmfg.com/>
- [65] *Primary lithium battery SAFT LS 17500*, http://www.saftbatteries.com/doc/Documents/primary/Cube655/LS17500_0710.207ec74a-0a3e-4f1a-8f8e-bf5a6150cf66.pdf.
- [66] *Model 2100/120 6 $\frac{1}{2}$ - Digit USB Digital Multimeter*, <http://www.keithley.com/data?asset=50760>.
- [67] (2011) *Keithley Instruments*. [Online]. Available: <http://www.keithley.com>
- [68] *LMG95 - Single Phase Precision Power Analyzer*, http://www.zes.com/download/products/zes_lmg95_datasheet_e.pdf.

[69] (2011) *ZES ZIMMER, Precision Power Measurement*. [Online]. Available:
<http://www.zes.com>