

Universidade do Minho

Paulo Manuel Fernandes Ferreira

**Sistema de Sensorização e Controlo baseado em
ZigBee para Aplicação em Bicicletas Elétricas**

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes

ao Grau de Mestre em Engenharia de Comunicações

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor José Augusto Afonso

Outubro 2013

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor José Augusto Afonso, pela excelente orientação, dedicação, disponibilidade e paciência no desenvolvimento desta dissertação.

Gostaria também de agradecer a todas as outras pessoas que, de algum modo, ajudaram a superar os desafios que foram surgindo durante a elaboração desta dissertação.

A todos os meus sinceros agradecimentos.

Resumo

Esta dissertação descreve uma solução para implementar a comunicação sem fios entre sensores indicadores de esforço físico, um smartphone e um sistema de controlo de uma bicicleta elétrica. Um dos objetivos deste trabalho consiste na especificação de alguns cenários para o controlo de esforço físico dos utilizadores, tirando partido do sistema de controlo dessa bicicleta, com a finalidade de proporcioná-los com a possibilidade de melhorar a sua aptidão física.

Nesta dissertação é implementada uma infraestrutura de rede, baseada em ZigBee, para dar suporte à comunicação entre as diversas partes do sistema. Os testes efetuados visam aferir se a qualidade de serviço oferecida, mais especificamente no atraso fim a fim, é adequada para suportar os diversos cenários de controlo de esforço. O consumo de energia e o alcance também são considerados uma vez que são características fundamentais no contexto deste trabalho.

A comunicação entre as diversas partes do sistema é assegurada através do módulo SDZ-539 da Spectec que desempenha o papel de *gateway* entre o smartphone e a rede ZigBee. A escolha deste módulo baseou-se no facto de permitir a comunicação entre sensores baseados em ZigBee/IEEE 802.15.4 com um smartphone Android. Durante a fase de implementação e testes verificou-se que este módulo tem algumas limitações, nomeadamente a necessidade de fazer *polling*, ao nível aplicacional, para receber os dados provenientes da rede ZigBee, e também pelo facto de ter um consumo de energia considerável mesmo em situações de baixa utilização. Com os resultados obtidos nos testes foi possível determinar o melhor compromisso entre o intervalo de *polling*, o atraso e o consumo energético de modo a responder às necessidades do sistema. Além disso foram obtidos resultados que mostram que o alcance das comunicações sem fios é aceitável tendo em conta o propósito para o qual o sistema foi projetado.

Abstract

This dissertation describes a solution for implementing the wireless communication between sensors that measure physical effort, a smartphone and an electric bicycle control system. One of the objectives of this work was to specify some scenarios to control users' physical effort, by taking advantage of the bicycles control system, in order to provide them with the possibility of improving their fitness level.

In this dissertation a network infrastructure, based on the ZigBee protocol, was implemented to support the communication between the different parts of the system. The tests performed aim to assess whether or not the quality of service, more specifically, the end to end delay, is adequate to support the different scenarios that were initially specified. The power consumption and range are also considered since they are key features in the context of this work.

The communication between the different parts of the system is ensured by Spectec's SDZ-539 module, which acts as a gateway between the smartphone and the ZigBee network. The choice of this module was due to the fact that it enabled the communication between ZigBee/IEEE 802.15.4 based sensors and an Android smartphone. During the implementation and testing phase it was verified that the module has some limitations, namely the need for polling at the Android application level to receive data from the ZigBee network, and also the fact that power consumption was considerably high even with low utilization. With the results obtained from the tests it was possible to determine a trade-off between the polling interval, the end to end delay and the power consumption in order to meet the systems requirements. Furthermore, the obtained results show that the wireless communication range is acceptable regarding the purpose for which the system was designed.

Índice de Conteúdos

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice de Conteúdos.....	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Abreviaturas.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2. Estado da Arte	7
2.1 Dispositivos Móveis.....	7
2.2 Plataforma Android.....	8
2.2.1 Desenvolvimento na Plataforma Android	8
2.2.2 Arquitetura da Plataforma Android	9
2.3 Monitorização, Controlo e Sensorização.....	11
2.4 Comunicação Sem Fios.....	13
2.4.1 IEEE 802.15.4/ZigBee.....	14
2.4.2 Coexistência e Interferência	16
2.4.3 Alcance	18
2.5 Trabalho Relacionado.....	20

2.5.1	A Bicicleta no Sistema	20
2.5.2	<i>Gateways</i> baseados em ZigBee/IEEE 802.15.4.....	22
2.5.3	Medição do Consumo Energético em Smartphones	24
3.	Desenvolvimento do Sistema	25
3.1	Descrição do Sistema de Sensorização e Controlo	25
3.1.1	Diagrama de Blocos do Sistema.....	26
3.1.2	Cenários de Controlo de Esforço	28
3.2	Topologia de Rede para Testes.....	29
3.3	Plataformas de <i>Hardware</i> e <i>Software</i>	31
3.3.1	<i>Kit</i> de Desenvolvimento CC2530DK	31
3.3.2	Consumo de Energia no CC2530.....	32
3.4	Módulo SDZ-539.....	33
3.4.1	Funcionamento do Módulo SDZ-539	35
3.4.2	Desenvolvimento do Firmware.....	36
3.4.3	Problemática na Associação de Dispositivos.....	38
3.5	Desenvolvimento Android	39
3.5.1	Medição do Consumo Energético.....	41
3.5.2	Consumo do Ecrã LCD	42
3.5.3	Biblioteca Spectec – Módulo SDZ-539	43
3.6	Medição do RTT	44
3.7	Medição do Alcance	46
3.7.1	Protocolo Basic RF.....	46
3.7.2	Emissor e Recetor	48
4.	Resultados e Discussão.....	51

4.1	Consumo Energético do Ecrã LCD	51
4.2	Medição do RTT	53
4.3	<i>Trade-off</i> : Intervalo de <i>Polling</i> e o Consumo Energético	55
4.4	Alcance vs <i>Packet Error Rate</i>	58
5.	Conclusões e Trabalho Futuro	61
	Referências.....	65

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Arquitetura da plataforma Android [7].	10
Figura 2.2 – Camadas definidas pelo ZigBee Alliance e pelo IEEE 802.15.4 [9].	15
Figura 2.3 – Topologias de rede definidas na norma IEEE 802.15.4.	16
Figura 2.4 – Comparativo de tecnologias de comunicação sem fios [25].	19
Figura 2.5 – Sistema desenvolvido pela Cambridge Consultants [28].	22
Figura 3.1 - Arquitetura concetual do sistema (adaptado de [39]).	26
Figura 3.2 - Diagrama de blocos do sistema.	27
Figura 3.3 – Topologia dos nós na rede: modo constante.	30
Figura 3.4 – Topologia dos nós na rede: modo cardíaco.	30
Figura 3.5 – Placa SmartRF05EB (A); Módulo CC2530EM (B); <i>Sniffer</i> CC2531 (C).	32
Figura 3.6 – Módulo microSD SDZ-539 (frente e verso).	33
Figura 3.7 – Programador do módulo SDZ-539.	35
Figura 3.8 - Diagrama de blocos do módulo SDZ-539.	36
Figura 3.9 – Blocos de funcionamento da SerialApp (adaptada de [49]).	37
Figura 3.10 - Obtenção do RTT entre um nó ZigBee e a aplicação no smartphone. ..	45
Figura 3.11 - Formato da trama Basic RF.	47
Figura 3.12 – Arquitetura das aplicações de teste.	48
Figura 4.1 - Corrente média na configuração <i>Idle</i> para diferentes níveis de brilho. ..	52
Figura 4.2 - Histograma do RTT com um intervalo de <i>polling</i> mínimo.	54
Figura 4.3 - Histograma do RTT com intervalo de <i>polling</i> de 100 ms.	54
Figura 4.4 - Histograma do RTT com intervalo de <i>polling</i> de 500 ms.	54

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Dados sobre a quota de mercado dos sistemas operativos móveis e vendas de unidades no segundo trimestre de 2012 e 2013 (unidades em milhões) [4].	8
Tabela 2.2 – Diferentes configurações da camada física do 802.15.4.	15
Tabela 3.1 - Especificações do módulo SDZ-539 da Spectec [31].	34
Tabela 3.2 – Parâmetros alterados na configuração do módulo de rádio.	39
Tabela 3.3 – Alguns valores programáveis da potência de transmissão.	39
Tabela 3.4 – Especificações do smartphone HTC Sensation.	40
Tabela 3.5 – Registo do estado da bateria.	43
Tabela 3.6 – Configurações utilizadas para testar o consumo do módulo SDZ-539... ..	45
Tabela 3.7 – Configurações do teste de alcance.	49
Tabela 4.1 - Estimação da autonomia em função do consumo do LCD.	53
Tabela 4.2 – Estatísticas do RTT, em ms, para os quatro cenários de <i>polling</i>	55
Tabela 4.3 - Consumo de corrente para as diferentes configurações.	56
Tabela 4.4 - Comparação da autonomia entre a configuração Idle e os modos P1, P2 e P3.	58
Tabela 4.5 – Emissor: CC2530EM, Distância: 5 metros.	58
Tabela 4.6 – Emissor: SDZ-539, Distância: 5 metros.	58
Tabela 4.7 – Emissor: CC2530EM, Distância: 10 metros.	59
Tabela 4.8 – Emissor: SDZ-539, Distância: 10 metros.	59

Lista de Abreviaturas

ADT	Android Development Tools
API	Application Programming Interface
BAN	Body Area Network
BLE	Bluetooth Low Energy
CPU	Central Processing Unit
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ECG	Electrocardiogram
EB	Evaluation Board
EM	Evaluation Module
FFD	Full Function Device
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
GSM	Global System for Mobile Communications
GUI	Graphical User Interface
IDC	International Data Corporation
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Scientific and Medical
JNI	Java Native Interface
LCD	Liquid Crystal Display

LED	Light Emitting Diode
MAC	Medium Access Control Layer
NDK	Native Development Kit
NFC	Near Field Communication
NWK	Network Layer
OS	Operating System
OSI	Open Systems Interconnection
PC	Personal Computer
PDA	Personal Digital Assistant
PER	Packet Error Rate
PHY	Physical Layer
RAM	Random Access Memory
RF	Radiofrequência
RFD	Reduced Function Device
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTT	Round-Trip Time
SAP	Service Access Point
SD	Secure Digital
SDK	<i>Software</i> Development Kit
S-LCD	Super-Liquid Crystal Display
SMS	Short Message Service
SoC	System on Chip
TI	Texas Instruments
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
VM	Virtual Machine
WLAN	Wireless Local Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
ZC	ZigBee Coordinator
ZDO	ZigBee Device Object
ZDK	ZigBee Development Kit
ZED	ZigBee End Device
ZR	ZigBee Router

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Os avanços tecnológicos em diversos sectores como as comunicações, a computação, a sensorização, o armazenamento e a eletrónica permitiram que os smartphones evoluíssem de tal modo que hoje em dia têm a capacidade de executar tarefas ao mesmo nível de alguns computadores pessoais (PC - Personal Computer). O smartphone pertence a um segmento de mercado partilhado por outros dispositivos, nomeadamente os *Tablet* PCs e os PDAs (Personal Digital Assistant), que correm um sistema operativo móvel (Mobile OS), sendo que a quota no mercado destes dispositivos é repartida por vários fabricantes de *hardware* e *software*. Neste setor existe um claro domínio do sistema operativo Android, que assenta no conceito de plataforma aberta (*open platform*) [1].

Independentemente do fabricante ou das características do smartphone existe sempre o cuidado de possibilitar a intercomunicação entre dispositivos de marcas diferentes. O Bluetooth e o Wi-Fi são amplamente utilizados, e estão presentes em quase todos os dispositivos móveis que se encontram no mercado. Por um lado, isto é uma mais-valia pois leva à globalização destas tecnologias, mas por outro lado, impede que uma parcela significativa dos dispositivos sensoriais sem fios existentes baseados em ZigBee/IEEE 802.15.4, consiga comunicar diretamente com os smartphones sem a necessidade de recorrer a um *gateway*.

Os avanços tecnológicos e científicos dos últimos anos também permitiram que os smartphones integrassem um número cada vez mais elevado de componentes, mais especificamente os sensores. Estes podem ser de vários tipos, tais como: acelerómetro, giroscópio, magnetómetro, humidade, temperatura, proximidade, entre outros. Os sensores, quando bem aproveitados, permitem ao utilizador ter uma experiência que outrora era impossível, em áreas tão distintas como o entretenimento, o desporto e a saúde.

A sensorização móvel colaborativa (*collaborative mobile sensing*) é uma área de interesse que visa tirar partido desses sensores, presentes nos equipamentos móveis ou em sensores espalhados pelo ambiente, para melhorar a nossa perceção do mundo que nos rodeia. A recolha e análise de dados neste contexto pode servir para diversos cenários de aplicação, como a identificação de padrões no comportamento das pessoas, a identificação de fontes de ruído ou até mesmo ajudar a traçar os melhores itinerários, tendo por base a colaboração dessas pessoas.

O aumento da capacidade de processamento dos smartphones, a disponibilidade de múltiplas interfaces de comunicação sem fios e o aumento da utilização dos mesmos, leva a um conseqüente aumento do consumo da bateria. Com isto, surge a necessidade intrínseca de caracterizar esse consumo de modo a tomar decisões para não comprometer a já limitada autonomia dos dispositivos móveis.

O sistema desenvolvido nesta dissertação visa tirar partido das potencialidades das bicicletas elétricas em diversas atividades como o transporte, o desporto e lazer, e, assim, transformá-las numa ferramenta capaz de trazer benefícios acrescidos para os seus utilizadores. A bicicleta elétrica introduzida no sistema deste trabalho, a beUM, foi desenvolvida no âmbito de uma dissertação de mestrado [2] e é responsável pelo controlo do motor e a aquisição de parâmetros da bicicleta. Além da bicicleta, o sistema integra um smartphone e possibilita também a utilização de um sensor de ECG (Eletrocardiograma) e de ritmo cardíaco que foi desenvolvido no âmbito de uma tese de doutoramento [3].

A comunicação entre as diversas partes é assegurada por uma rede de comunicação sem fios ZigBee, que é baseada na norma IEEE 802.15.4. Um dos aspetos a ter em consideração na implementação do sistema é a qualidade de serviço, particularmente ao nível da rede, sendo que o atraso fim a fim é fundamental para minimizar possíveis problemas no sistema de controlo da bicicleta. Além disso, não devem ser esquecidos outros fatores como a fiabilidade, o débito, o consumo energético e o custo.

1.2 Motivação e Objetivos

A motivação deste trabalho baseia-se no facto de não existir uma solução normalizada que permita que os smartphones comuniquem com redes baseadas no ZigBee/IEEE 802.15.4. A existência de um módulo capaz de facilitar esta comunicação com os smartphones e a possibilidade de utilizar um sensor de ECG sem fios já desenvolvido foram dois dos aspetos que mais motivaram este trabalho. Dentro da pesquisa que foi efetuada, não foram encontrados trabalhos que tirassem partido das potencialidades deste módulo, e portanto, o estudo feito nesta dissertação é relevante e pode ajudar em desenvolvimentos futuros. Outro fator que motivou este trabalho foi a utilização de uma bicicleta elétrica no sistema onde surgiu a ideia de especificar alguns cenários para o controlo do esforço físico, permitindo aos utilizadores terem à sua disposição um sistema que tirasse proveito das bicicletas elétricas na prática de atividades físicas.

Como tal, os objetivos primários desta dissertação são:

- Conceção da arquitetura de um sistema baseado em sensores ZigBee, um smartphone e uma bicicleta elétrica;
- Definição de vários cenários de controlo da bicicleta para o sistema proposto;
- Integração e testes de um módulo compatível com ZigBee/IEEE 802.15.4 num dispositivo smartphone Android;
- Análise do impacto da utilização desse módulo no consumo energético do smartphone em diferentes cenários de teste;
- Avaliação de parâmetros como o RTT (Round-Trip Time) e o PER (Packet Error Rate).

1.3 Estrutura da Dissertação

No capítulo 2 é feita uma revisão sobre o estado da arte, que inclui uma visão global dos dispositivos móveis e o seu domínio no mercado, com destaque para a

plataforma Android. Também são abordados aspetos relacionados com a monitorização, o controlo e a sensorização. É feita uma breve introdução às comunicações sem fios com destaque para norma IEEE 802.15.4, a especificação ZigBee e alguns aspetos relacionados com a coexistência com as redes sem fios de área local (WLAN – Wireless Local Area Network). Também são levantados alguns pontos relacionados com o alcance nas comunicações sem fios. Por fim são apresentados alguns trabalhos relevantes para o tema abordado no que diz respeito à utilização da bicicleta no sistema, às soluções de *gateways* disponíveis para o 802.15.4/ZigBee e também alguns trabalhos relativos à medição do consumo de energia nos smartphones.

No capítulo 3 é descrito o sistema que tem por base esta dissertação, bem como os cenários para o controlo de esforço físico que foram idealizados. É feita uma breve descrição sobre o que influenciou a escolha das tecnologias para o suporte das comunicações entre os sensores e o smartphone. De seguida são descritas, na parte do desenvolvimento, as questões relacionadas com a implementação, as especificações do material utilizado e aspetos do seu funcionamento. Seguidamente, é feita uma descrição sobre a implementação do firmware da rede de sensores sem fios e sobre o desenvolvimento das aplicações de teste para o sistema operativo Android. É analisado o consumo energético do ecrã do smartphone e também é feita uma descrição de como é calculado o atraso fim a fim do sistema, bem como o impacto do mesmo sobre o consumo da bateria do smartphone. Por fim, são apresentados os procedimentos necessários para analisar o alcance entre dois pontos. Estes testes dão origem aos resultados apresentados no capítulo 4.

Seguidamente, no capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos relativamente aos diversos testes que foram efetuados. O consumo do ecrã LCD (Liquid Crystal Display) é avaliado de forma a determinar o impacto na autonomia do smartphone em ambientes exteriores sob luminosidade intensa. É determinado o consumo do smartphone relativamente à utilização do módulo SDZ-539 em diferentes configurações e também é feito a medição do *round-trip time* entre dois

pontos do sistema. A concluir este capítulo são apresentados os resultados relativos ao alcance entre esses dois pontos.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação, sendo descritos de forma resumida as dificuldades e os sucessos obtidos face aos objetivos iniciais. Também são apresentadas algumas sugestões para trabalho futuro.

2. Estado da Arte

Neste capítulo é abordado o estado atual dos temas principais relacionados com esta dissertação. Em primeiro lugar é feita uma análise do ponto de vista da quota no mercado dos dispositivos móveis, nomeadamente os smartphones. De seguida é introduzida a plataforma Android, que é um pilar deste trabalho, incluindo uma breve revisão sobre a sua arquitetura e aspetos relacionados com o desenvolvimento nesta plataforma. Além disso, são abordados, de modo ligeiro, o tema da monitorização, do controlo, da sensorização e também as comunicações sem fios para as redes de sensores. De seguida, são apresentados alguns trabalhos relacionados com o trabalho desenvolvido no que diz respeito à utilização da bicicleta no sistema. Também são apresentadas algumas soluções existentes para endereçar a convergência entre a sensorização sem fios e os smartphones recorrendo a *gateways*. Por fim, são apresentados alguns trabalhos que visam a medição de consumo energético nos smartphones.

2.1 Dispositivos Móveis

Os dispositivos móveis, mais especificamente os smartphones, são ferramentas versáteis e bastante populares, que permitem a qualquer pessoa ter nas suas mãos o potencial de um PC. Existe uma grande diversidade de sistemas operativos para os smartphones, no entanto, neste trabalho optou-se pelo sistema operativo Android por ser um dos poucos compatíveis para a integração de módulo ZigBee e também por ser um dos mais utilizados atualmente.

Segundo a IDC (International Data Corporation), o sistema operativo Android apresentou no segundo trimestre de 2013 (2T13), uma quota de mercado de 79.3% (Tabela 2.1). De realçar também que as vendas de unidades com o sistema operativo

Android foram as que tiveram o maior crescimento, chegando a somar mais unidades vendidas do que a soma total das unidades vendidas com outros sistemas operativos.

Tabela 2.1 – Dados sobre a quota de mercado dos sistemas operativos móveis e vendas de unidades no segundo trimestre de 2012 e 2013 (unidades em milhões) [4].

Sistema Operativo	Unidades Vendidas 2T13	Quota de Mercado 2T13	Unidades Vendidas 2T12	Quota de Mercado 2T12
Android	187.4	79.3%	108	69.1%
iOS	31.2	13.2%	26	16.6%
Windows Phone	8.7	3.7%	4.9	3.1%
BlackBerry OS	6.8	2.9%	7.7	4.9%
Linux	1.8	0.8%	2.8	1.8%
Symbian	0.5	0.2%	6.5	4.2%
Outros	-	0.0%	0.3	0.2%
Total	236.4	100.0%	156.2	100.0%

2.2 Plataforma Android

A plataforma Android assenta no conceito de plataforma aberta (*open platform*), o que significa que não está limitada a um único fabricante de *hardware*. Este fator é importante pois permite que esta plataforma aumente rapidamente a sua quota no mercado, dando a possibilidade a qualquer entidade de criar e vender dispositivos baseados nesta plataforma. De modo a facilitar a sua expansão no mercado também são disponibilizadas ferramentas para auxiliar os programadores a desenvolverem as suas aplicações. Estas ferramentas são constantemente melhoradas com novas características e funcionalidades, permitindo o crescimento rápido de aplicações disponíveis.

2.2.1 Desenvolvimento na Plataforma Android

O desenvolvimento nesta plataforma é possível graças à disponibilização de um conjunto de ferramentas que facilita a criação de aplicações, o Android Software

Development Kit (Android SDK). O SDK foi desenvolvido com o intuito de disponibilizar uma API em Java para que os programadores possam desenvolver as suas aplicações. O SDK utiliza as bibliotecas do sistema e disponibiliza diversas funcionalidades aos programadores, entre as quais, a possibilidade de utilizar a mesma API em diferentes tipos de *hardware*. As aplicações desenvolvidas sobre esta API são escritas em Java e correm na máquina virtual Dalvik do Android.

Em algumas situações é necessário a escrita de funções que exigem uma maior capacidade de processamento por parte do dispositivo móvel. O facto de estar a correr sobre a máquina virtual Dalvik pode tornar-se numa desvantagem a nível do desempenho da aplicação. Para estas situações a plataforma Android disponibiliza o Native Development Kit (NDK). O Android NDK é um conjunto de ferramentas que possibilita a incorporação de bibliotecas ou código nativo escrito em C/C++ nas aplicações desenvolvidas em Java. Isto permite a reutilização de código e possibilita também o aumento do desempenho da aplicação. O código escrito em C/C++ é compilado para a plataforma Android e depois é chamado através do Java Native Interface (JNI), a partir da aplicação Java.

2.2.2 Arquitetura da Plataforma Android

A arquitetura da plataforma Android pode ser dividida em quatro camadas distintas, das quais fazem parte cinco componentes: o Kernel, as bibliotecas nativas do sistema, o Android Runtime (serviços do sistema), a Framework de Desenvolvimento e as aplicações base [5][6], tal como se encontram representadas na Figura 2.1.

Na camada inferior da arquitetura da plataforma Android encontra-se o componente Kernel do sistema Android. O Kernel do Android, é baseado em Linux e tem como finalidade endereçar os problemas de segurança, gestão de memória, gestão de processos, entre outros. De um modo geral, esta camada funciona como uma abstracção entre a camada de *hardware* e o resto do sistema.



Figura 2.1 – Arquitetura da plataforma Android [7].

Na camada superior ao Kernel encontram-se duas componentes: as bibliotecas do sistema (Libraries) e o Android Runtime. A componente de bibliotecas do sistema são um conjunto de bibliotecas escritas em C/C++ que fornecem funcionalidades às aplicações da plataforma. Um exemplo de uma biblioteca deste componente é o SurfaceManager, que é usado como um gestor de composição de janelas para desenhar, por exemplo, a interface gráfica para os utilizadores (GUI – Graphical User Interface). Além disso existe, por exemplo, o OpenGL, que serve para fazer o *rendering* dos conteúdos gráficos 2D e 3D para o ecrã. O componente Android Runtime disponibiliza à plataforma a máquina virtual Dalvik VM e as Core Libraries, que contêm um conjunto de bibliotecas e serviços do sistema. Os serviços deste componente são chamados através do Binder do sistema Android, que por sua vez é disponibilizado pelo Kernel. Na camada superior às bibliotecas do sistema e ao Android Runtime assenta a Framework de desenvolvimento (Application Framework). Este componente fornece uma API de desenvolvimento na linguagem de programação Java. Através desta API, o programador (*software developer*) tem

acesso a vários recursos do dispositivo sem que seja necessário ter conhecimento das bibliotecas do sistema ou do tipo de *hardware* que a sua aplicação está a utilizar, facilitando bastante o desenvolvimento de aplicações nesta plataforma.

Por fim, no topo da hierarquia desta arquitetura encontra-se a camada Aplicacional (Applications). Esta camada disponibiliza um conjunto de aplicações que são fornecidas juntamente com o sistema operativo Android. Estas são conhecidas como:

- Contactos;
- Mensagens SMS (Short Message Service);
- Calendário;
- Navegador de internet;
- Cliente de correio eletrónico, entre outras.

As aplicações disponibilizadas nesta camada são escritas em Java e correm sobre a máquina virtual Dalvik do sistema Android.

2.3 Monitorização, Controlo e Sensorização

A monitorização de sistemas ou de atividades é importante na medida em que permite saber quando ocorre um determinado evento e em que circunstâncias esse evento ocorreu. A nível ambiental, é possível registar alterações climatéricas como a temperatura, a velocidade e direção do vento, a pressão atmosférica, a humidade relativa do ar, etc. Também é possível avaliar a qualidade da água e da atmosfera, ou efetuar a deteção de incêndios recorrendo a sensores projetados para esse efeito. No caso dos incêndios florestais, um requisito fundamental é a existência de nós sensoriais de custo muito reduzido e com a capacidade de recolher energia do meio ambiente. Os desportistas na sua generalidade também podem, por exemplo, tirar partido da recolha de dados sobre o seu comportamento físico para melhorar ou adequar o treino de modo a ter um desempenho superior em competição. Na área da saúde também existe a possibilidade de monitorizar diversos parâmetros fisiológicos, localmente ou remotamente, emitindo alertas quando são detetados

problemas. Na indústria as máquinas podem ser monitorizadas, sendo recolhidos diversos dados relativos à temperatura, humidade, pressão, entre outros.

Além da monitorização, existe por vezes a necessidade de fazer o controlo, que consiste essencialmente na alteração do estado ou de uma propriedade do sistema de modo a ter um determinado resultado ou efeito. Isto possibilita que por vezes não seja necessário a existência de um operador humano, fazendo com que o sistema consiga responder às exigências de modo mais rápido, eficiente e eficaz.

A sensorização consiste essencialmente na utilização de um ou mais sensores distribuídos no espaço para fazer a recolha de dados relacionados com uma propriedade física de um sistema, com aplicação em diversas áreas [8][9]. Este conjunto de sensores pode formar uma rede que se designa por rede de sensores sem fios (WSN - Wireless Sensor Network). Por outro lado existem também as redes de área corporal (BAN - Body Area Networks) onde são colocados sensores dentro, sobre e à volta do corpo de um indivíduo.

O planeamento de uma WSN ou BAN depende principalmente das restrições impostas pelo sistema a projetar. Tipicamente as WSN ou BAN requerem uma boa eficiência energética, pois os seus dispositivos normalmente operam a baterias. Outras questões relacionadas com a fiabilidade e a segurança também são desejadas em certas aplicações mais sensíveis. Tipicamente este género de aplicações não requer um débito muito elevado, mas sim um tempo de resposta mais baixo como é o caso dos sistemas em tempo real.

Por outro lado, a sensorização móvel, é um tema recente que tem vindo a suscitar cada vez mais interesse [10]. Existem aplicações que tiram partido dos sensores nos smartphones e das múltiplas interfaces de comunicação para criar soluções inovadoras, o que possibilita também que as pessoas tenham uma qualidade de vida melhor. Com o advento da *Internet of Things* e das redes sociais, a colaboração das pessoas na recolha de dados é fundamental para aumentar a quantidade e a qualidade da informação recolhida. Por outro lado, a sensorização móvel colaborativa é outro tema relacionado com a recolha de dados sensoriais mas centrada nas pessoas [11], com recurso aos seus dispositivos móveis (smartphones,

tablet PCs ou PDAs). Os dados sensoriais podem ser provenientes de sensores embebidos nos seus dispositivos móveis ou podem ser recolhidos de sensores na proximidade do utilizador, utilizando uma rede de sensores sem fios [12]. A participação de pessoas neste tipo de sistema é essencial e abre um leque de novos domínios de aplicação [13][14], impulsionado pela expansão da utilização das redes sociais e das aplicações móveis.

O modo como é feita esta recolha de dados pode ser do tipo participativo ou oportunístico. No primeiro modo, a recolha de dados requer que o utilizador do dispositivo aceite ou rejeite de forma explícita as opções de sensorização, tomando a decisão sobre a informação que será partilhada. No segundo modo a recolha de dados é feita sem a interação do utilizador, onde este pode ou não saber quando é feita a recolha de informação. Além disso o utilizador não precisa de alterar o estado do seu dispositivo para satisfazer a recolha dos dados, esta será feita quando surgir a oportunidade para a recolha e transmissão desses mesmos dados. Contudo, a experiência de utilização do dispositivo deverá ser considerada para não degradar o desempenho do restante sistema.

Qualquer que seja o modo de recolha e transmissão de dados devem ser sempre considerados fatores como o consumo de energia. Atualmente os smartphones têm uma autonomia relativamente reduzida e a sua utilização constante leva a um desgaste excessivo da bateria. Como tal, devem ser tomadas medidas preventivas de modo a não por em causa a usabilidade do sistema. No caso da sensorização oportunística já foram efetuados estudos que realçam o facto do consumo de energia ser crítico neste tipo de sistema [15].

2.4 Comunicação Sem Fios

A comunicação sem fios pode ser feita de dois modos: através das ondas mecânicas (e.g., som) ou através de ondas eletromagnéticas (e.g., luz, ondas rádio). As ondas eletromagnéticas propagam-se através do princípio físico da radiação e não necessitam de um meio físico, ao contrário das ondas mecânicas. O espectro

eletromagnético é extenso e inclui a luz visível e invisível, os raios X, as micro-ondas, as ondas rádio, entre outros.

O estudo de fenómenos tais como a reflexão, a refração, a difração, a absorção e a polarização é fundamental para perceber como as ondas se propagam no espaço e na superfície da terra de modo a melhorar a transmissão de dados. Algumas bandas de frequência são mais úteis que as outras em determinadas circunstâncias, uma vez que esses fenómenos influenciam a qualidade com que os sistemas de comunicação podem transmitir e receber os sinais.

Existem diversas tecnologias que tiram partido do modo de comunicação sem fios. Os avanços nestas áreas possibilitaram o desenvolvimento de diferentes técnicas para codificar e transmitir sinais. Por vezes, é necessário a partilha da mesma banda de frequências, o que pode causar alguns problemas de interferência. A escolha da tecnologia deve ser feita em função das vantagens e desvantagens que trazem para o sistema onde vão ser integradas. Além disso existem fatores, como o consumo energético, o débito, o número de nós suportados, os mecanismos de segurança, a tolerância a falhas e a imunidade à interferência que não devem ser descurados.

2.4.1 IEEE 802.15.4/ZigBee

O grupo de trabalho IEEE 802.15, que pertence à comissão de trabalhos do IEEE 802, especifica as normas para as redes sem fios de área pessoal (WPAN – Wireless Personal Area Network). Existem sete subgrupos de tarefas, do qual se destaca o subgrupo quatro, que é orientado para as Low-Rate WPAN (LR-WPAN). A primeira versão da norma IEEE 802.15.4 foi lançada em maio de 2003 e depois surgiu uma revisão que foi lançada em 2006 [16]. Esta norma define a camada física (PHY) e a camada de controlo de acesso ao meio (MAC). A camada física utiliza espalhamento espectral por sequência direta (DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum) e especifica diferentes taxas de transmissão e bandas de operação (Tabela 2.2). A camada MAC é baseada no protocolo de acesso aleatório CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance).

Tabela 2.2 – Diferentes configurações da camada física do 802.15.4.

Banda de Frequências	Cobertura	Débito (kbps)	Canais
2.4 GHz	Mundial	250	16
915 MHz	Américas	40	10
868 MHz	Europa	20	1

O protocolo ZigBee [17], que assenta sobre a norma IEEE 802.15.4, é definido pela ZigBee Alliance e é baseada no modelo OSI (Open Systems Interconnection), em que cada camada presta um conjunto específico de serviços à camada superior através do respetivo ponto de acesso ao serviço (SAP - Service Access Point). O ZigBee define, entre outros, os serviços prestados pela camada de rede (NWK) e de aplicação (APL), tal como se encontram representadas na Figura 2.2. O ZigBee Device Object (ZDO, Figura 2.2) é a aplicação que corre no *endpoint* 0 de cada um dos dispositivos ZigBee. Esta aplicação é responsável por fazer a gestão do dispositivo na rede, oferecendo a todas as outras aplicações, que correm no dispositivo, um interface para que possam aceder a um conjunto de funcionalidades. Esta aplicação, ZDO, mantém um registo do estado do ZigBee na rede, e fornece uma interface para o ZigBee Device Profile (ZDP), que é um aplicação especializada em descobrir, configurar, e gerir dispositivos ZigBee e serviços na rede.

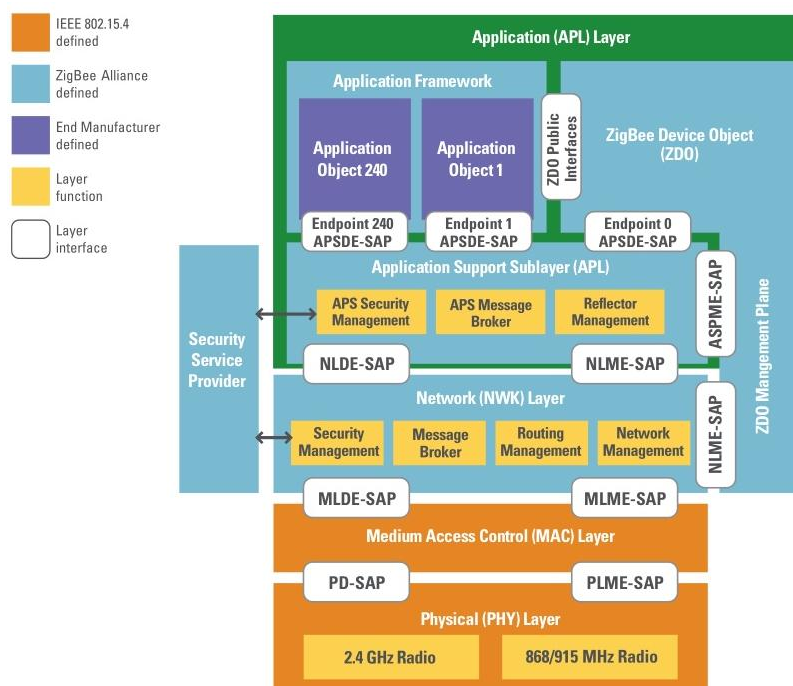


Figura 2.2 – Camadas definidas pelo ZigBee Alliance e pelo IEEE 802.15.4 [9].

O ZigBee pode operar em topologia estrela (*star*), malha (*mesh*) ou árvore (*tree*). Em qualquer topologia é obrigatória a presença de um coordenador ZigBee (ZC - ZigBee *Coordinator*), que tem a responsabilidade de formar a rede. Existem mais dois tipos de dispositivos lógicos para além do coordenador: o *router* (ZR - ZigBee Router) e o *end device* (ZED - ZigBee End Device). O ZC e o ZR são considerados dispositivos físicos da classe FFD (Full Function Device) e o ZED é considerado um RFD (Reduced Function Device). Tanto o ZR como o ZED podem executar tarefas de sensorização e atuação. O ZR também pode encaminhar tráfego entre os nós, possibilitando o aumento do alcance, mas tem que estar sempre acordado. O ZED só pode comunicar com o seu pai, que tem que ser um ZR ou ZC, não podendo assim encaminhar dados, mas pode dormir durante períodos de inatividade para reduzir o consumo de energia.

A norma IEEE 802.15.4 também define a infraestrutura de rede baseada nas topologias de estrela e *peer-to-peer* (Figura 2.3), o que pode ser vantajoso em alguns casos onde não é necessário uma rede muito complexa. Como tal, caso a camada de rede do ZigBee não seja necessária, a aplicação no coordenador (PAN Coordinator) fica responsável pelo encaminhamento das mensagens entre os nós.

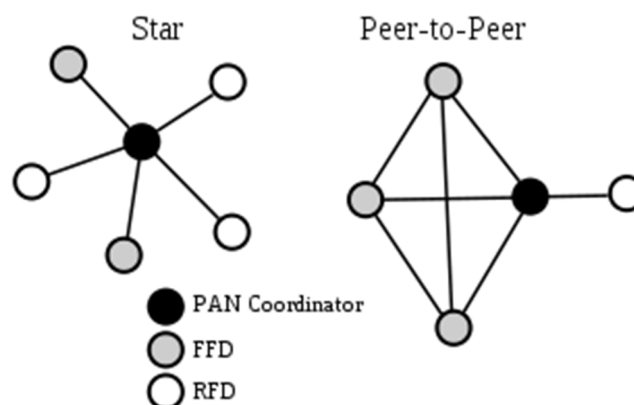


Figura 2.3 – Topologias de rede definidas na norma IEEE 802.15.4.

2.4.2 Coexistência e Interferência

A norma IEEE 802.15.4 é a base para a maioria das soluções que são comercializadas hoje em dia para as redes sem fios pessoais de baixo débito. Deste

mesmo modo, a norma 802.11 é a base para as aplicações WLAN. Ambas as normas operam na banda industrial, científica e médica (ISM - Industrial, Scientific and Medical) dos 2.4 GHz. Esta banda de frequências não requer licenciamento de uso na maior parte das regiões do mundo e oferece boas características para a propagação de sinais, o que possibilita a criação de soluções com um elevado potencial de crescimento. Contudo, como o espectro é partilhado, levantam-se questões de coexistência com os restantes utilizadores desta banda.

O grupo de trabalho IEEE 802.15.2 endereça as questões relacionadas com a coexistência das WPANs com outros dispositivos a operar nesta banda de frequências. Um guia de práticas recomendadas foi desenvolvido em 2003 mas o grupo de trabalho está neste momento inativo. Todavia, as políticas do IEEE requerem que cada comité de normas publique uma declaração de coexistência juntamente com o texto da norma em questão. Apesar das potenciais mais-valias que a norma possa ter, esta não será aprovada até que a declaração de coexistência seja aceite e dada como satisfatória [18].

A entidade que é responsável por regular o espectro radielétrico em Portugal é a ANACOM (Autoridade Reguladora Nacional das Comunicações Eletrónicas). A ANACOM assegura o planeamento, controlo e gestão desse espectro no que diz respeito à sua utilização efetiva e eficiente. Anualmente é publicado o QNAF (Quadro Nacional de Atribuição de Frequências), que é um instrumento para a gestão de espectro e que contém a tabela de atribuição de frequências (serviços de radiocomunicações atribuídos a cada faixa).

Hoje em dia a massificação das redes sem fios, smartphones, *tablets* e computadores pessoais levou a crescente utilização dos protocolos 802.11b/g. Por outro lado a procura de soluções baseadas no 802.15.4 também tem aumentado especialmente com o advento da *Internet of Things* e o aumento no interesse nas áreas da monitorização, sensorização e controlo. A existência de medidas para mitigar o problema da sua coexistência é fundamental para evitar a degradação do desempenho das comunicações.

Vários estudos realizados [19][20][21], apontam para o facto de existir um problema de coexistência entre as redes baseadas nas normas IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4. Esta questão foi reconhecida e alguns fabricantes publicaram guias para mitigar o problema [22][23]. Podem ser tomadas medidas para limitar os efeitos através de técnicas de diversidade (*diversity schemes*), das quais se destacam as técnicas relativamente à frequência, potência e ao espaço [24]. O primeiro diz respeito à seleção do canal onde os dispositivos sem fios operam, evitando que diferentes dispositivos utilizem a mesma banda. O esquema de diversidade relativo à potência refere a utilização da potência mínima necessária de modo a não afetar os restantes dispositivos que operam nessa banda do espectro. Relativamente ao esquema de diversidade espacial existem dois níveis: um ao nível do dispositivo, em que é necessário garantir que as diferentes tecnologias possam funcionar no mesmo dispositivo, e outro ao nível do local onde o dispositivo é usado. A utilização de diversas tecnologias de comunicações sem fios num mesmo dispositivo deve seguir um plano de coexistência, pois estas funcionam num espaço físico muito próximo. Este problema pode surgir quando se pretende adicionar novas funcionalidades ao dispositivo, recorrendo por exemplo a um *gateway*. O módulo utilizado nesta dissertação é um bom exemplo disso, uma vez que permite dotar o smartphone com a capacidade de comunicar com outra rede para o qual não foi projetado, nomeadamente as redes baseadas no 802.15.4/ZigBee. O outro caso diz respeito à utilização de dispositivos em espaços físicos onde já existem redes sem fios estabelecidas. Um exemplo comum neste caso diz respeito às zonas urbanas onde as redes Wi-Fi se sobrepõem devido a zonas densamente povoadas.

2.4.3 Alcance

O alcance nas comunicações sem fios é uma característica importante que pode restringir a usabilidade e pôr em causa o bom funcionamento de qualquer sistema. Hoje em dia destacam-se algumas tecnologias de comunicação sem fios tal como o NFC (Near Field Communication), o Bluetooth, o Wi-Fi e o ZigBee. Enquanto o NFC tem um raio de ação de poucos centímetros, no caso do Bluetooth, Wi-Fi e ZigBee,

este pode alcançar as dezenas ou até centenas de metros (Figura 2.4). Existem alguns aspetos que podem limitar o alcance destas tecnologias, como o tipo de antena utilizada, a potência de transmissão ou a sensibilidade do recetor. A potência de transmissão é importante na medida em que se consegue obter uma alcance maior, todavia a sensibilidade do recetor também é fundamental para detetar corretamente o sinal recebido mesmo quando sujeito a fontes de interferência externas. Uma vez que a potência de transmissão máxima encontra-se regulada, devem ser tomadas medidas para melhorar a receção do sinal. A utilização de uma potência de transmissão superior significa também que haverá um consumo maior por parte do sistema, o que nem sempre é desejável nem benéfico em sistemas de autonomia reduzida.

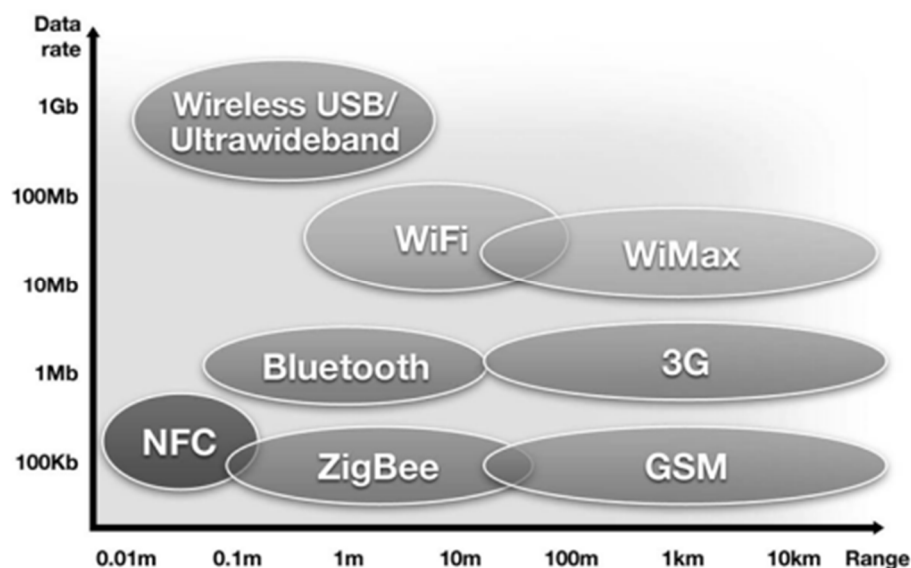


Figura 2.4 – Comparativo de tecnologias de comunicação sem fios [25].

O alcance máximo entre um emissor e um recetor pode variar consoante a obstrução do caminho ou devido às condições climatéricas e características ambientais. A execução de testes pode ajudar a determinar o alcance máximo, todavia, os resultados obtidos em ambientes de teste não representam todos os casos que ocorrem em ambientes reais. À medida que a distância entre o emissor e o recetor aumenta a intensidade do sinal diminui, o que pode contribuir para o aumento de erros e conseqüente degradação do serviço prestado.

2.5 Trabalho Relacionado

Nesta secção são apresentados os trabalhos relacionados com o sistema proposto relativamente à utilização da bicicleta no sistema, dos *gateways* ZigBee/IEEE 802.15.4 disponíveis e aspetos relacionados com a medição do consumo em smartphones.

2.5.1 A Bicicleta no Sistema

A bicicleta é um veículo que tem vindo a fazer cada vez mais parte do nosso quotidiano e é muito apreciado. A possibilidade de utilizar a bicicleta na prática de exercício físico permite, por exemplo, aos utilizadores terem uma melhor qualidade de vida. Além disso, com o surgimento da bicicleta elétrica existe agora a possibilidade de ser haver um controlo mais refinado da sua utilização.

Os avanços na área de eletrónica possibilitaram que as bicicletas convencionais pudessem ser forma transformadas em elétricas. Existem as que são vulgarmente são designadas por Pedelec (Pedal Electric Cycle), onde é obrigatório a utilização dos pedais para iniciar a marcha. Estas podem ser adquiridas através de um *kit* ou compradas já equipadas com esse *kit*, sendo que normalmente são muito mais dispendiosas. A utilização das bicicletas Pedelec apresenta inúmeras vantagens, de entre as quais, está isenta do uso de uma matrícula, não necessita de seguro e para a sua utilização não é obrigatório possuir licença de condução para circular na via pública. Segundo o artigo 112º do código da estrada, a bicicleta elétrica tem de cumprir certos requisitos para ser considerada velocípede e não estar sujeito às leis dos restantes veículos motorizados. Os motores das Pedelec são considerados auxiliares, pelo que devem ser utilizados apenas para assistir o utilizador. A potência máxima permitida para o motor é de 250 W, mas pode ser superior quando utilizado em pequenos intervalos para auxiliar em casos pontuais, como em subidas acentuadas, tal como indica a norma europeia EN15194. A alimentação deve ser reduzida progressivamente com o aumento da velocidade e interrompida ao atingir os 25 km/h ou se o ciclista deixar de pedalar.

A utilização da bicicleta em conjunto com a recolha de dados sensoriais tem um grande potencial para melhorar a perceção do mundo que nos rodeia. Ao mesmo tempo é possível recolher os sinais fisiológicos permitindo que seja avaliada a condição física das pessoas e classifica-las de acordo com a sua faixa etária e género. Neste sentido são analisados alguns trabalhos e soluções existentes, de modo a perceber como foram desenvolvidos e quais os aspetos mais e menos positivos.

Em [26], os autores descrevem o projeto BikeNet, que efetua o mapeamento da experiência dos utilizadores com base em diversos sensores integrados nas bicicletas dos ciclistas. Este trabalho utiliza uma bicicleta convencional na qual são adaptados os diferentes sensores. O sistema é formado por uma rede de sensores sem fios (que os autores denominaram de “*bicycle area network*”) baseada em IEEE 802.15.4. Este sistema integra um dispositivo *gateway* IEEE 802.15.4/Bluetooth que proporciona uma interface entre a rede de sensores e o smartphone. Esta solução aumenta a complexidade do sistema ao requerer a utilização de duas tecnologias de rede de área pessoal sem fios em conjunto. A recolha de dados incide sobre parâmetros como os níveis de ruído e dióxido de carbono, a velocidade, a localização geográfica e o nível de estresse do utilizador. A transmissão de dados do smartphone para a Internet é feita via rede GSM ou recorrendo a pontos de acesso Wi-Fi.

O projeto Copenhagen Wheel [27] visa o desenvolvimento de uma roda que pode ser adaptada numa bicicleta convencional de modo a transformá-la numa bicicleta eléctrica com recursos de sensorização móvel. A parte central da roda (*hub*) integra o motor eléctrico, a bateria e engrenagens internas, assim como sensores ambientais de CO, NOx, temperatura, ruído (dB) e humidade. O dispositivo móvel utilizado é um smartphone iPhone e a comunicação sem fios com o *hub* é baseada em Bluetooth. O smartphone permite obter a localização geográfica, bloquear e desbloquear a bicicleta, controlar a mudanças de engrenagens e definir o nível de ajuda do motor. Este sistema não prevê a recolha de sinais fisiológicos do utilizador.

Uma empresa do Reino Unido, a Cambridge Consultants, desenvolveu um sistema de controlo para o ajuste automático das mudanças numa bicicleta convencional (Figura 2.5). O sistema é controlado através de um iPad via uma ligação

Bluetooth Low Energy, com a qual obtém dados sobre a velocidade e a cadência, entre outros. A bicicleta não é elétrica, mas permite fazer um controlo de esforço mediante o ajuste da engrenagem da bicicleta.



Figura 2.5 – Sistema desenvolvido pela Cambridge Consultants [28].

Em [30], os autores descrevem um sistema para monitorização de sinais recolhidos de um ciclista e de uma bicicleta convencional, sendo que a ênfase é dada aos nós sensoriais desenvolvidos. O sistema está equipado com vários nós sensoriais sem fios baseados em ZigBee, denominados BioTe. Cada nó sensorial contém um transceiver RF CC2420, da Texas Instruments, e um microcontrolador MSP430. O equipamento desenvolvido é utilizado para recolher a temperatura e o ritmo cardíaco do ciclista, a temperatura do ambiente e as rotações por minuto da roda da bicicleta. O sistema não faz uso de um dispositivo móvel, mas sim de um computador portátil, instalado no guiador da bicicleta, que recebe do coordenador ZigBee, os dados recolhidos de todos os nós sensoriais através de uma ligação Bluetooth.

2.5.2 Gateways baseados em ZigBee/IEEE 802.15.4

A convergência das redes baseadas no ZigBee/IEEE 802.15.4 com os smartphones tem suscitado algum interesse e como tal surgiram os *gateways* para responder a uma necessidade do mercado. Um *gateway* é um dispositivo que

possibilita que qualquer sistema, com uma determinada interface de comunicação, consiga comunicar com outro sistema com outra interface de comunicação diferente. A finalidade deste tipo de dispositivo é criar uma ponte entre duas ou mais tecnologias diferentes. Habitualmente os *gateways* são soluções criadas para adaptar às soluções existentes de modo a trazer novas capacidades de comunicação ao sistema final. No caso específico dos *gateways* baseados no ZigBee/IEEE 802.15.4, estes têm interesse na medida em que existem diversos módulos já desenvolvidos que estão limitadas pelo facto de não conseguirem comunicar diretamente com equipamentos recentes, nomeadamente os smartphones.

A empresa Spectec fabrica diversos *gateways* baseados na norma IEEE 802.15.4, com suporte para o protocolo ZigBee ou outros protocolos proprietários. As soluções desenvolvidas pela Spectec são integradas em cartões microSD [31], cartões SIM [32] e em *dongles* USB [33]. O primeiro módulo, que é utilizado nesta dissertação, permite utilizar a interface SD para dotar os smartphones com essa capacidade de comunicação. Como é um módulo pioneiro nesta área, não existe muita informação acerca do seu funcionamento nem de problemas relacionados com o desenvolvimento. Em relação ao cartão SIM, este é um produto ainda na fase de desenvolvimento e a sua fabricação está dependente do eventual interesse de clientes. O *dongle* USB também é outra solução, mas tem a desvantagem de não ser muito prático de utilizar nos smartphones. A sua utilização nestes equipamentos depende da existência de uma interface microUSB que possibilite a utilização do USB OTG (On-The-Go). Esta funcionalidade não está disponível em todos os equipamentos e depende da versão do sistema operativo Android.

Em [34], foi utilizada a solução baseada no USB OTG para testar a comunicação entre um smartphone e uma WSN. Noutros trabalhos, [35] e [36], os autores desenvolveram uma módulo miniSD que tem integrado um *transceiver* para as comunicações sem fios baseadas em ZigBee. Este *gateway* SD/ZigBee desenvolvido é denominado de uSD e tem algumas semelhanças com o módulo utilizado nesta dissertação, na medida em que recorre a um ficheiro onde são feitas leituras e escritas para a transmissão e receção de dados.

2.5.3 Medição do Consumo Energético em Smartphones

A medição do consumo energético é um tema importante, mas mais ainda nos dispositivos móveis, onde a autonomia é um aspeto crucial. Existem componentes que consomem muita bateria, como o ecrã, o processador e as interfaces de comunicação (Wi-fi, GPS, Bluetooth e redes móveis), contudo, não existe no domínio público informação acerca do consumo dos componentes individuais dos smartphones, uma vez que esta informação é confidencial. Com o cruzamento de informação entre o tipo de componente e o respetivo consumo seria possível estimar o consumo em função da sua utilização.

A utilização de aparelhos de medição é uma das alternativas possíveis, sendo que, normalmente, os equipamentos mais sofisticados são dispendiosos (podendo ascender os quinhentos euros). Além das medições recorrendo a equipamento externo, é possível, em alguns casos, fazer a medição do consumo via *software*. Alguns equipamentos recentes trazem um circuito interno que regista e disponibiliza ao programador o valor da corrente consumida, que é o caso do smartphone utilizado nesta dissertação.

Existem avanços em muitos sectores, mas atualmente o sector da energia, mais especificamente no que diz respeito às baterias, não tem registado melhorias muito significativas. Há uma tendência em desenvolver módulos de baixo consumo, o que de algum modo permite compensar a lacuna das baixas capacidades oferecidas. O aumento do tamanho dos dispositivos permite de algum modo um aumento da autonomia dos smartphones graças ao facto de se poder utilizar baterias maiores.

O consumo de energia também depende da qualidade do *software* desenvolvido, uma vez que um código pouco eficiente pode aumentar o desperdício de recursos ou mesmo até causar a degradação do desempenho do sistema [37]. O processo de medir o consumo tem associado o facto de também contribuir para o desperdício de energia e como tal também deveria ser contabilizado.

3. Desenvolvimento do Sistema

Este capítulo inclui a parte principal deste trabalho, onde é descrito o sistema de sensorização e controlo no que diz respeito aos cenários de controlo de esforço físico propostos. As metodologias que foram utilizadas também são apresentadas, das quais se destacam: a descrição das especificações do equipamentos nomeadamente o *kit* de desenvolvimento CC2530DK, o respetivo *software* de desenvolvimento e as ferramentas de auxílio ao desenvolvimento. Este capítulo engloba também o trabalho relacionado com a utilização do módulo SDZ-539 no sistema, com foco para a medição do atraso fim a fim recorrendo ao RTT (Round-Trip Time), o consumo de energia num smartphone e a medição do alcance entre dois módulos de comunicação sem fios.

3.1 Descrição do Sistema de Sensorização e Controlo

A Figura 3.1 ilustra a arquitetura conceptual do sistema, que integra um sistema local e um sistema remoto. O sistema remoto é constituído por um *frontend* e um *backend*. O *frontend* é essencialmente uma página web onde os utilizadores podem consultar diversas informações recolhidas pelo sistema, como por exemplo o histórico de monitorização do seu estado físico. O *backend* é onde estão registados todos os dados e onde é feita a gestão do conteúdo enviado ao *frontend*.

Relativamente ao sistema local, este é constituído pelos seguintes sistemas:

- Sistema de Sensorização;
- Sistema Central;
- Sistema de Controlo;

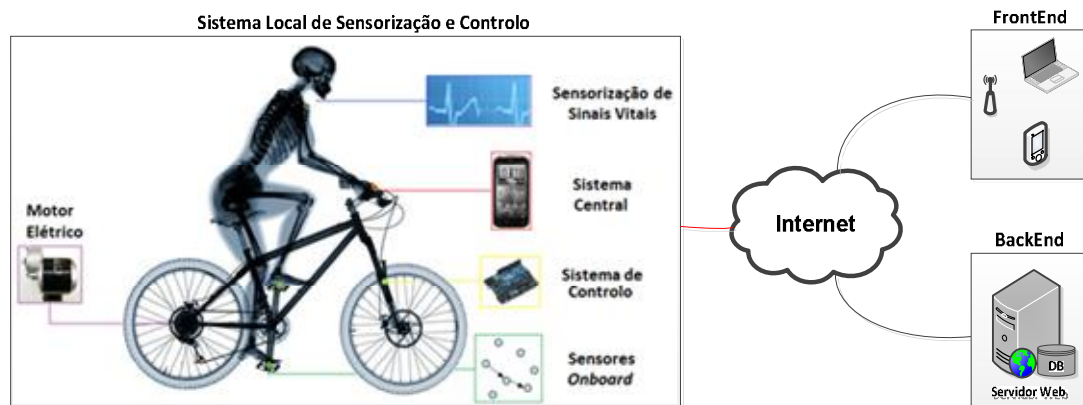


Figura 3.1 - Arquitetura conceitual do sistema (adaptado de [39]).

O Sistema de Sensorização é composto por sensores de sinais vitais colocados no utilizador e por sensores instalados na bicicleta (*onboard*). Este sistema é responsável pela aquisição e transmissão sem fios de diferentes tipos de dados sensoriais. Estes dados sensoriais podem incluir ainda os dados recolhidos dos sensores do próprio dispositivo móvel. O Sistema Central, instalado no dispositivo móvel, é o *software* responsável pela análise dos dados e pela comunicação sem fios com o Sistema de Controlo e com o Sistema de Sensorização. Dependendo da conectividade e do tipo de dados sensoriais, estes podem ser armazenados localmente no Sistema Central ou enviados para um local remoto. O Sistema de Controlo, instalado na bicicleta, serve para fazer atuar o motor elétrico consoante as instruções dadas pelo Sistema Central. Os diferentes níveis de controlo do motor permitem definir vários modos de utilização para o controlo de esforço.

3.1.1 Diagrama de Blocos do Sistema

Relativamente à escolha da tecnologia para suportar a rede de sensores sem fios, esta baseou-se no facto de existir já um dispositivo desenvolvido para fazer a medição do ritmo cardíaco que suporta o protocolo ZigBee/IEEE 802.15.4. A utilização do Bluetooth também foi cogitada, no entanto esta apresenta um consumo superior comparado com o do IEEE 802.15.4/ZigBee [40]. A utilização do Bluetooth Low Energy (BLE) foi cogitada, uma vez que tem como característica o

baixo consumo, no entanto à data do início da dissertação não havia suporte por parte do sistema operativo Android.

Relativamente à topologia da rede, dado a proximidade entre todos os nós optou-se por utilizar a topologia estrela, visto que esta apresenta um desempenho superior às topologias *multihop* (árvore e malha), nomeadamente em termos de atraso e eficiência na utilização da largura de banda. A escolha desta topologia implica que os todos os dados de sensorização passem obrigatoriamente pelo smartphone, que assume o papel de coordenador da rede ZigBee.

A Figura 3.2 ilustra os principais blocos do sistema concebido e a respetiva interligação entre os mesmos. O bloco central de sistema é o Smartphone HTC Sensation, que tem por base o sistema operativo Android. Este bloco abriga o Sistema Central e uma base de dados local, possuindo também diversas interfaces de comunicação (Bluetooth, ZigBee, WiFi, 3G) e sensores incorporados. A bicicleta contém um motor, uma fonte de alimentação (bateria), um sistema de controlo local e diversos sensores e atuadores. A Figura 3.2 ilustra os principais blocos do sistema concebido e a respetiva interligação entre os mesmos. O bloco central de sistema é o Smartphone HTC Sensation, que tem por base o sistema operativo Android. Este bloco abriga o Sistema Central e uma base de dados local, possuindo também diversas interfaces de comunicação (Bluetooth, ZigBee, WiFi, 3G) e sensores incorporados. A bicicleta contém um motor, uma fonte de alimentação (bateria), um sistema de controlo local e diversos sensores e atuadores.

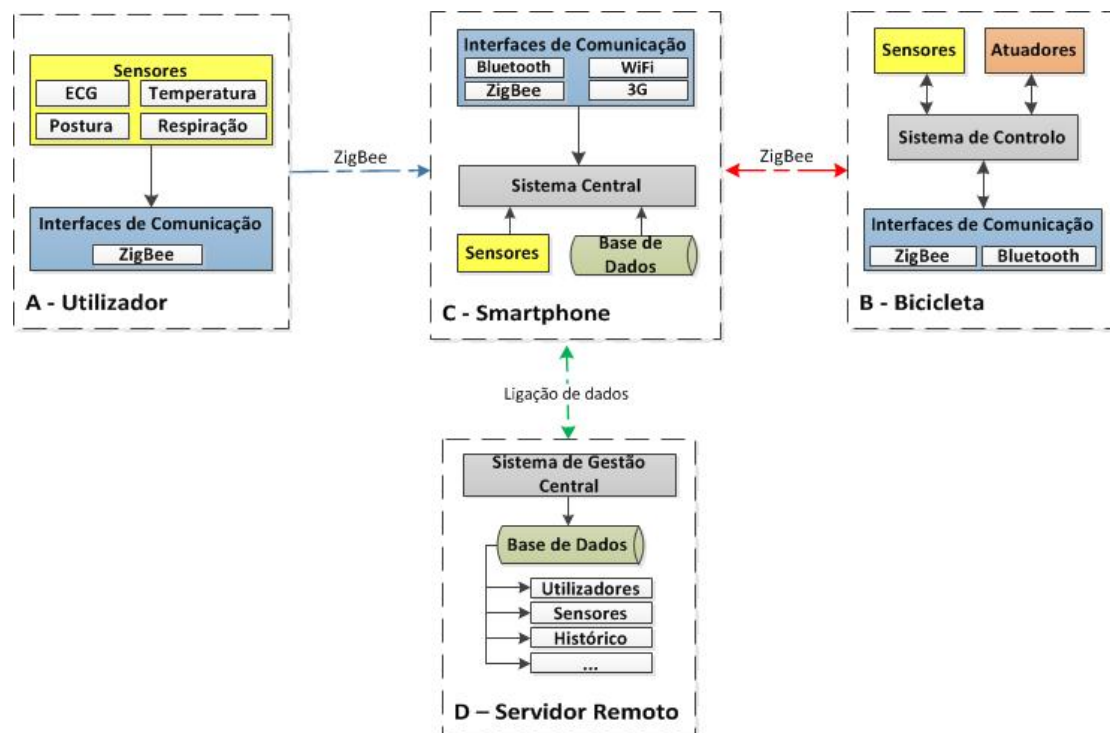


Figura 3.2 - Diagrama de blocos do sistema.

A rede de área corporal do sistema tem como objetivo suportar diversos sensores colocados sobre o corpo do utilizador com a possibilidade de medir, por exemplo, o ECG, o ritmo cardíaco e a postura. O smartphone possibilita a comunicação com a rede de área corporal, com o sistema de controlo na bicicleta e com um servidor remoto.

3.1.2 Cenários de Controlo de Esforço

O cenário de aplicação do sistema de controlo pode ser focado tanto para atividades exteriores como interiores, sendo o objetivo final a modelação de um sistema para melhorar e gerir o esforço físico dos utilizadores deste sistema.

O controlo de esforço está relacionado com a capacidade de ajuste da intensidade de esforço físico para os níveis desejados a cada momento da atividade física, de modo a obter um desempenho similar ao proporcionado pelas bicicletas estáticas presentes em ginásios. No caso de um percurso exterior efetuado com recurso a uma bicicleta elétrica, que pode abranger subidas e descidas, essa característica pode ser adicionada através da regulação automática do nível de auxílio (ou resistência) proporcionada pelo motor elétrico consoante a topografia do terreno. Este conceito de regulação de esforço tem como possibilidade adicional a capacidade de proporcionar atividade física com programas pré-definidos de esforço variável, à semelhança das bicicletas estáticas. Quando as condições climatéricas não são as mais favoráveis, o mesmo sistema pode ser utilizado em espaços interiores, com recurso a um suporte para suspender as rodas, permitindo manter os demais benefícios do sistema e evitando a necessidade de aquisição de outro equipamento para utilização dentro de casa. Todos os algoritmos de esforço podem ser implementados no smartphone, tirando proveito da sua capacidade de processamento e comunicação.

Existem vários modos de funcionamento do sistema, que podem ser comparados com recursos análogos oferecidos por sistemas utilizados em ginásios. Destacam-se os seguintes modos:

- Modo Constante;
- Modo Programado;
- Modo Cardíaco.

No Modo Constante, a bicicleta é usada para proporcionar um regime de treino de esforço constante. Neste modo, o sistema atua no motor de forma automática, de forma a garantir que o esforço aplicado pelo ciclista seja aproximadamente constante, independentemente do grau de inclinação do terreno. Um dos desafios associados a este modo é o aumento do consumo energético em subidas acentuadas, pois as subidas exigem o fornecimento de maior potência mecânica por parte do motor. Por outro lado existe uma vantagem quando o percurso é descecente pois seria possível recuperar a carga da bateria com a funcionalidade regenerativa do motor.

O Modo Programado permite utilizar um plano de treino pré-programado. Neste modo é possível definir o nível de esforço a cada instante de tempo. A variabilidade da inclinação do piso e a capacidade de atuação do motor são dois fatores importantes pois influenciam a qualidade do resultado obtido neste modo.

No Modo Cardíaco, o esforço é controlado através do ritmo cardíaco do ciclista. Este modo é o mais indicado para quem necessita de ter cuidado com o seu estado cardíaco, ou para quem pretende fazer um exercício com o ritmo cardíaco controlado. O Modo Cardíaco pode ser combinado com o Modo Constante ou com o Modo Programado, de modo a permitir a programação de exercícios com ritmo cardíaco constante ou variável no tempo, respetivamente.

3.2 Topologia de Rede para Testes

A definição da topologia da rede para o suporte dos cenários de controlo de esforço é essencial na medida em que permite minimizar o atraso na rede para diferentes modos de controlo. A necessidade de ter um tempo de resposta baixo (atraso fim a fim) para o controlo da bicicleta é fundamental para que os algoritmos de controlo de esforço funcionem de forma adequada. Como tal foram elaborados

dois esquemas, que se encontram na Figura 3.3 e na Figura 3.4 e que dizem respeito, respetivamente, ao modo constante e ao modo cardíaco.

Existe um nó central na rede, configurado como ZC (ZigBee Coordinator), que é responsável por formar a rede e tem de permanecer ativo. O ZC está integrado no smartphone. Por outro lado, nos nós terminais (sistema de controlo na bicicleta e sensores da BAN) são utilizados ZRs (ZigBee Routers). A decisão de utilizar um ZRs em vez de ZEDs (ZigBee End Devices) nos módulos terminais está relacionado com o facto de o ZED apenas acordar em períodos específicos, para ter um consumo de energia menor, o que leva a um aumento do tempo de resposta total que não é desejável no sistema proposto.

No modo constante (Figura 3.3), o ZR envia periodicamente o valor da potência mecânica exercida pelo ciclista para o ZC no smartphone (1). Este envia, de seguida, um sinal de controlo no sentido contrário (2) para fazer atuar o motor da bicicleta em conformidade. O tempo total de envio de uma mensagem até a receção da resposta para o controlo (atraso fim a fim) corresponde neste caso ao RTT.

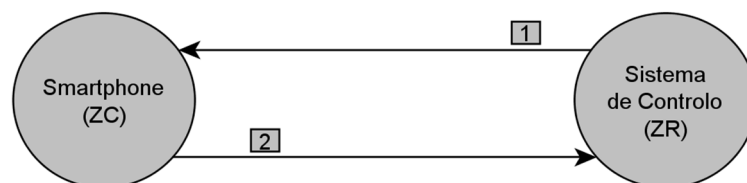


Figura 3.3 – Topologia dos nós na rede: modo constante.

No modo cardíaco (Figura 3.4), o sensor de ritmo cardíaco transmite os dados para o smartphone (1) e este, por sua vez, envia os dados para o sistema de controlo para fazer atuar o motor (2).



Figura 3.4 – Topologia dos nós na rede: modo cardíaco.

Uma vez que o atraso fim a fim é o mesmo nos dois casos, isso permite que os respetivos testes sejam realizados utilizando apenas a topologia do primeiro modo (Figura 3.3).

3.3 Plataformas de *Hardware e Software*

Esta secção apresenta as plataformas de *hardware* e *software* que foram utilizadas para obter os resultados apresentados neste trabalho. Relativamente à descrição do *hardware*, este inclui o kit de desenvolvimento para o CC2530 e as respetivas ferramentas de apoio ao desenvolvimento (*sniffer* e *debugger*). Relativamente ao *software*, este inclui uma breve descrição da Z-Stack, que é uma implementação do protocolo ZigBee da Texas Instruments.

3.3.1 *Kit de Desenvolvimento CC2530DK*

O circuito integrado CC2530 [41] é um SoC (System-on-Chip) para aplicações IEEE 802.15.4 e ZigBee, entre outras, que permite a construção de nós de rede robustos com um custo muito reduzido. O SoC CC2530 contém um *transceiver* RF, um microcontrolador baseado no 8051 e dispõe de 8 kB de memória RAM. Existem quatro versões com tamanhos de memória *flash* diferentes: CC2530F32/64/128/256, com 32/64/128/256 kB de memória, respetivamente. O CC2530 opera na banda de frequências de 2.4 GHz e oferece um débito de 250 kbps, o máximo definido pela norma IEEE 802.15.4.

O kit de desenvolvimento adquirido inclui duas placas SmartRF05EB (Evaluation Board), dois módulos CC2530EM (Evaluation Module) e um *sniffer* CC2531. O equipamento encontra-se representado na Figura 3.5. A SmartRF05EB (Figura 3.5 (A)) dispõe de vários periféricos tais como um LCD, LEDs, UART, SPI, USB, *joystick* e botões. O CC2530EM (Figura 3.5 (B)), por sua vez, contém o SoC CC2530. O *sniffer* IEEE 802.15.4/Zigbee (Figura 3.5 (C)) tem como finalidade a captura de todos os pacotes que são trocados num determinado canal. Esta ferramenta é valiosa para auxiliar na depuração de determinados problemas nas aplicações desenvolvidas.

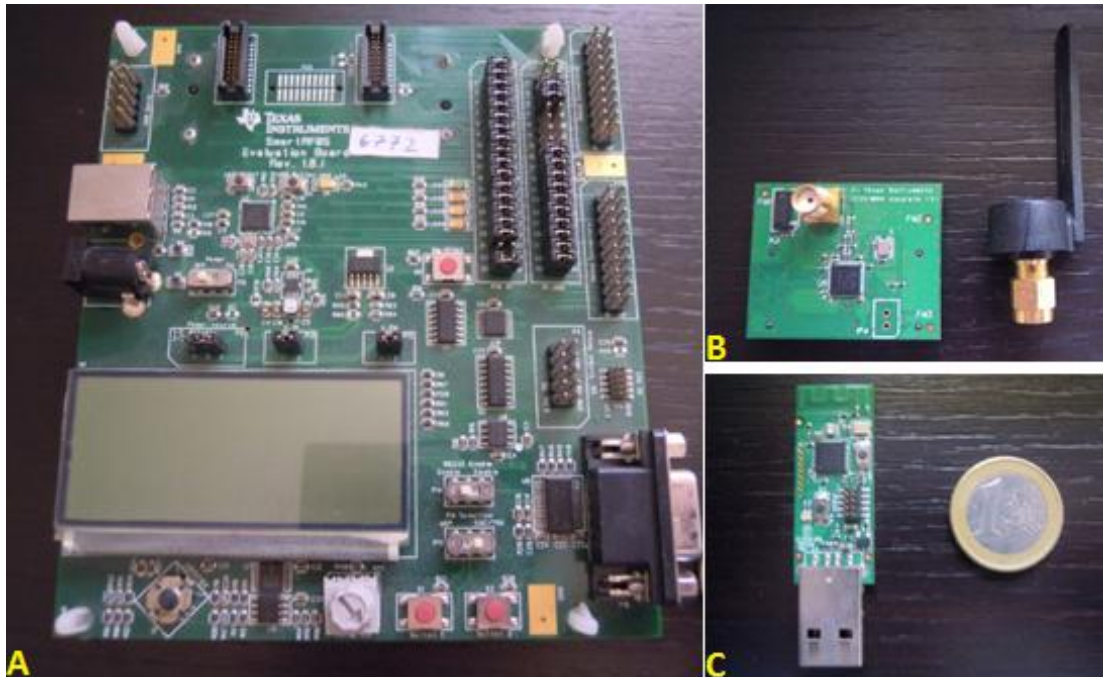


Figura 3.5 – Placa SmartRF05EB (A); Módulo CC2530EM (B); *Sniffer* CC2531 (C).

As soluções de *software* disponíveis para o desenvolvimento nesta plataforma incluem o SimpliciTI, TIMAC, RemoTI e a Z-Stack [42]. No desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a Z-Stack, que é uma implementação da versão 2007 do protocolo ZigBee pela Texas Instruments. A Z-Stack é retrocompatível com a versão ZigBee-2006 e suporta os *feature sets* ZigBee e ZigBee Pro. As principais camadas da Z-Stack são: ZDO (ZigBee Device Objects), AF (Application Framework), APS (Application Support Sublayer), NWK (Network) e a ZMAC [43].

3.3.2 Consumo de Energia no CC2530

O consumo de energia é um aspeto importante em qualquer sistema, e mais ainda naqueles onde a autonomia é um aspeto crítico. No desenvolvimento deste trabalho, não foram feitas medições diretamente ao CC2530. Todavia, existem na documentação disponibilizada pela TI algumas notas sobre o modo de obter este consumo [44].

Estes módulos são projetados para o baixo consumo, no entanto, é na utilização de *duty cycles* reduzidos onde é feita a maior poupança energética. Na maior parte

do tempo o sistema encontra-se em *standby* e, ativa-se para enviar ou receber dados em determinados intervalos pré-definidos. É natural que, com o aumento da potência de transmissão, o consumo de energia aumente, sendo por isso necessário regular a potência de acordo com as necessidades do sistema final. Uma técnica para diminuir o consumo, em aplicações de longo alcance, é a utilização de nós intermédios configurados com uma potência de transmissão mais baixa.

3.4 Módulo SDZ-539

O módulo microSD SDZ-539 da Spectec (Figura 3.6), adquirido no âmbito desta dissertação, tem como característica principal a possibilidade de ser integrado num smartphone baseado no sistema operativo Android ou Windows Mobile. Uma das suas características mais atrativas é o facto de se utilizar uma interface já existente em muitos smartphones.

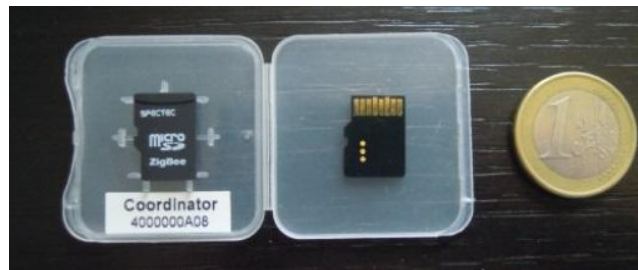


Figura 3.6 – Módulo microSD SDZ-539 (frente e verso).

O uso deste módulo possibilita a implementação de um sistema assente na camada física do IEEE 802.15.4 na banda de 2.4 GHz. Como o chip interno é o CC2530, é possível utilizar a Z-Stack, a TIMAC, que é uma implementação da camada MAC do IEEE 802.15.4, ou mesmo protocolos proprietários, como por exemplo o eLPRT (Enhanced Low Power Real Time) [29].

Na Tabela 3.1 encontram-se as especificações deste módulo, retiradas da página web do fabricante. De realçar que as especificações não revelam qual o consumo total por parte do módulo em si, mas apenas a indicação do consumo relativo ao chip CC2530.

Tabela 3.1 - Especificações do módulo SDZ-539 da Spectec [31].

MCU	CC2530 SoC
Banda de Operação	2405 – 2480 MHz
Norma Suportada	IEEE 802.15.4
Taxa de Transmissão	250 kbps
Número de canais	16
Potência de Transmissão Programável	Até 4.5 dBm
Sensibilidade do Recetor	-97 dBm
Memória Interna (Flash)	256 kB
Memória Interna (RAM)	8 kB
Baud Rate (UART)	2400 até 230400 bps
Consumo de Corrente (Rx)	24 mA
Consumo de Corrente (Tx)	29 mA (@ 1 dBm)
Tensão de Alimentação	0.8 até 3.6 V
Versão do Protocolo ZigBee	ZigBee 2007
Memória de Armazenamento	2 GB

A utilização deste módulo tem alguns pontos negativos. O facto de ser algo inovador pode ser um problema, uma vez que não é muito conhecido, o que de algum modo limita a investigação. Levantam-se algumas questões relativamente à longevidade do cartão, uma vez que utiliza a memória *flash* para o envio e receção de dados. Em situações onde a utilização do cartão é mais intensiva, pode haver uma redução significativa da vida útil do cartão, ou mesmo até deixar de funcionar. Tal como qualquer outra memória não volátil, os dispositivos de memória *flash* têm um limitado número de operações de escrita antes de falhar. Essa característica é conhecida como a *endurance*, e é a medida do número de ciclos de *erase/write* que o *flash array* pode atingir enquanto consegue manter a integridade dos dados. De acordo com o documento Definitions and Characterization of Floating Gate Semiconductor Arrays [45], a *endurance* é definida como “A medida da capacidade de um dispositivo de memória não volátil em cumprir as suas especificações apresentadas no datasheet em função das alterações acumuladas dos dados não voláteis”. Avanços recentes nesta área já demonstraram um aumento radical da *endurance* neste tipo de memória, o que é bastante promissor [46].

O equipamento ilustrado na Figura 3.7 foi desenhado especificamente para facilitar as operações de depuração e atualização do firmware do módulo microSD

SDZ-539. Este equipamento contém um CC Debugger [47] que se conecta ao PC via USB.

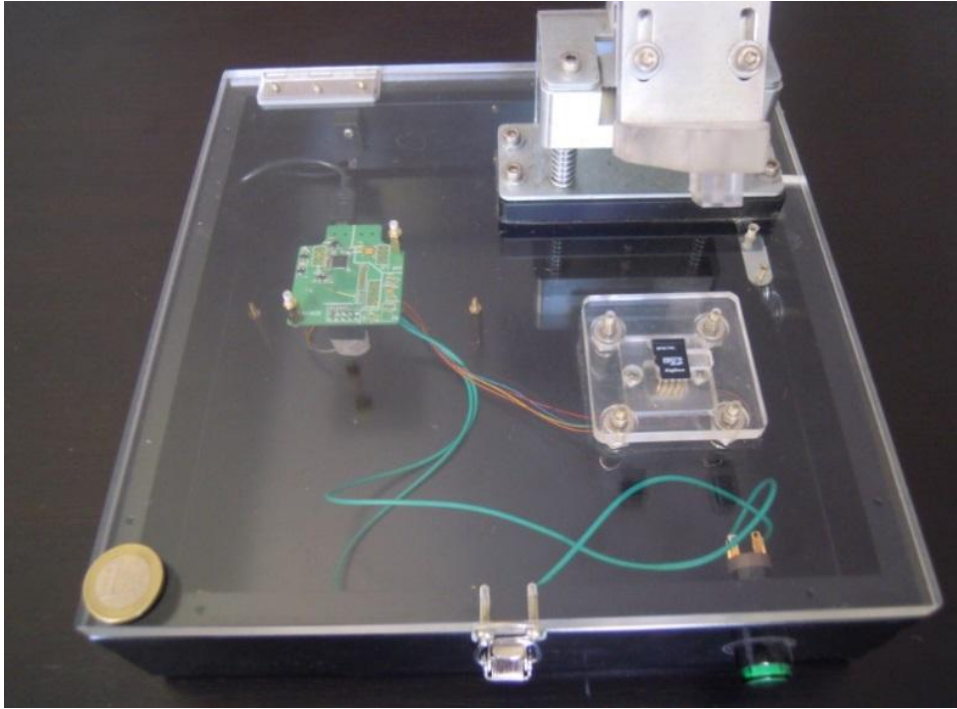


Figura 3.7 – Programador do módulo SDZ-539.

3.4.1 Funcionamento do Módulo SDZ-539

Na Figura 3.8 encontra-se ilustrado o diagrama de blocos do módulo SDZ-539 e os respetivos blocos de interação com o sistema operativo Android. O CC2530 comunica com um chip controlador da porta SD (Secure Digital) através da porta interna UART do CC2530. As mensagens são transferidas internamente, via SPI, entre a porta UART e a interface SD do cartão microSD. A aplicação Android acede aos dados, provenientes da rede ZigBee, através da interface de memória SD. O ficheiro onde são armazenadas os dados denomina-se de SMART_IO.CRD. O acesso aos dados é possível recorrendo à biblioteca disponibilizada pela Spectec, em que esta inclui os diversos comandos de configuração, leitura e escrita. Os comandos principais são explicados na secção do desenvolvimento Android.

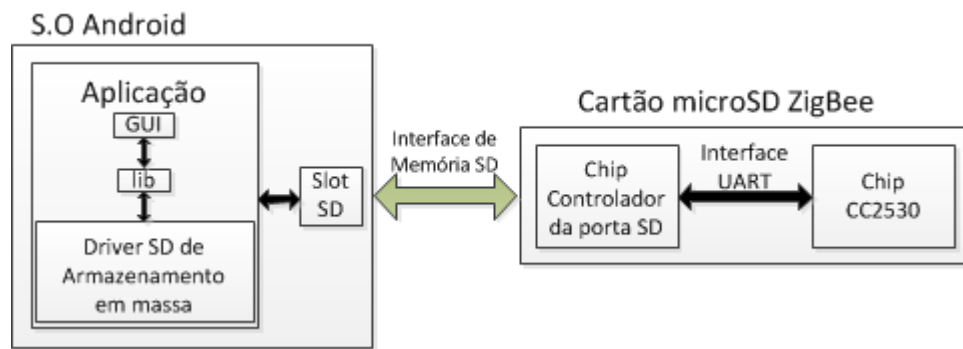


Figura 3.8 - Diagrama de blocos do módulo SDZ-539.

Inicialmente foi utilizada uma versão anterior do cartão, o módulo SDZ-537, que entretanto foi substituída pelo módulo SDZ-539 uma vez que o cartão deixou de funcionar, muito provavelmente devido à sua utilização intensiva nos testes. O novo módulo trouxe algumas vantagens nomeadamente:

- O acesso *root* deixou de ser necessário uma vez que a nova versão veio resolver o problema relacionado com o *file caching*, onde os dados não eram escritos diretamente no cartão, mas sim numa memória *cache*;
- Uma capacidade de armazenamento superior (2 GB, em comparação com 512 MB da versão anterior);
- API para o sistema operativo Android renovada e simplificada.

A necessidade de utilizar o mecanismo de *polling*, para obter dados periódicos, é uma das limitações deste módulo, pois não há ainda um mecanismo de informar à aplicação Android que chegaram dados da rede ZigBee. Além disso, também existe o fator consumo associado à utilização de um cartão microSD. Após consultar a especificação SD, foi constatado que esta define um consumo máximo de 100 mA quando a tensão de alimentação é mínima, e 200 mA quando a tensão de alimentação é máxima [48]. Isto aplica-se tanto para a leitura como para a escrita.

3.4.2 Desenvolvimento do Firmware

O desenvolvimento do código para o CC2530 utilizado em todos os testes, com exceção dos testes de alcance, tem por base a aplicação Serial App, que é fornecida

juntamente com a Z-Stack. Esta aplicação serve para ligar dois dispositivos via ZigBee, por exemplo, dois PCs, utilizando a porta série. Na Figura 3.9 encontra-se representado a comunicação sem fios entre um PC e um Smartphone equipado com o módulo SDZ-539. O PC está ligado a uma SmartRF05EB+CC2530EM através da porta série e o Smartphone utiliza a interface SD para comunicar com uma porta UART do CC2530 presente no módulo SDZ-539.

Os dispositivos executam previamente o processo de *match*, que permite às aplicações descobrirem os endereços de rede do dispositivo de destino, e o processo de *binding*, onde é feita a ligação entre ambas as aplicações. No final da execução destes dois procedimentos, que integram o conjunto de funcionalidades disponibilizadas pelo ZDO às aplicações, os dois dispositivos estão prontos para transmitir mensagens entre eles.

Na receção de uma mensagem o evento `AF_INCOMING_MSG_CMD` é gerado na aplicação. A partir deste momento a mensagem recebida, pela interface rádio, pode ser processada.

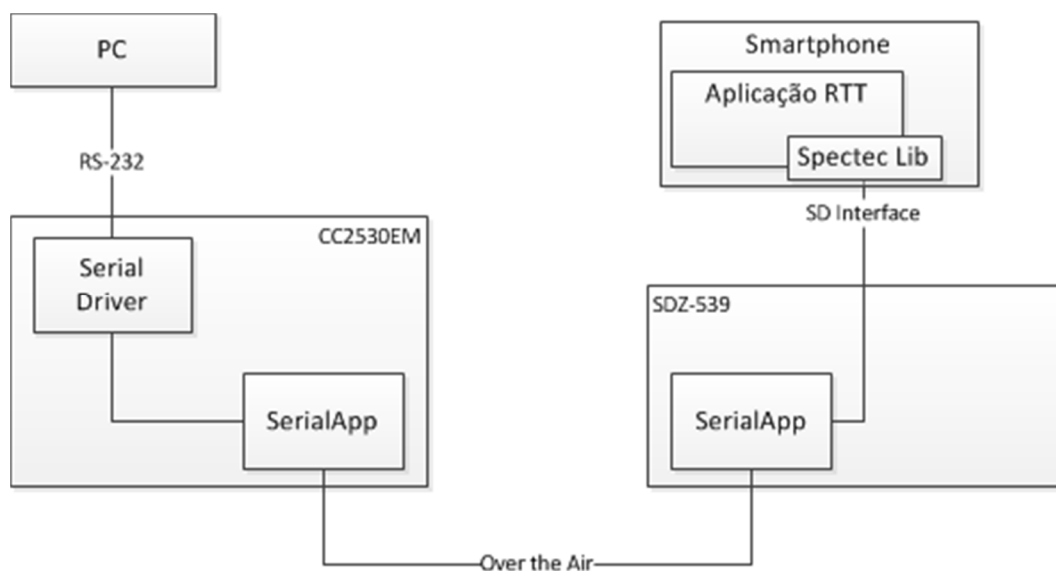


Figura 3.9 – Blocos de funcionamento da SerialApp (adaptada de [49]).

3.4.3 Problemática na Associação de Dispositivos

Inicialmente foi detetado um problema na associação de dispositivos na rede ZigBee, onde a distância de associação necessária para iniciar a comunicação, era reduzida. O problema surge ao tentar fazer a associação entre dois dispositivos ZigBee (ZED ou ZR com um ZC) num raio de ação sensivelmente superior a um metro e meio. Sendo que após a associação estes já podiam comunicar com uma distância considerável. Os testes foram efetuados entre um ZC e um ZR, em que o módulo SDZ-539 estava configurado como ZC e o CC2530EM estava configurado como ZR. Também foi testado a configuração contrária em que o módulo SDZ-539 estava configurado como ZR e o CC2530EM como ZC.

Foram tomadas várias medidas para tentar contornar este problema, nomeadamente:

- Trocar o canal de comunicação;
- Utilizar uma versão mais recente da Z-Stack;
- Alterar a potência de transmissão e configurar a sensibilidade de receção.

Inicialmente foi contactada a empresa responsável pelo módulo foi mas esta não foi capaz de responder adequadamente ao problema. A causa do problema poderia estar relacionada com o facto da ranhura do cartão microSD do smartphone alterar as propriedades da antena do módulo. Deste modo foram testados outros smartphones e o problema manteve-se. Também foram testados vários canais diferentes uma vez que existiam outras redes ZigBee e Wi-Fi a operar nas proximidades e que podiam causar interferência. Isto também não resultou, e portanto foi testada uma a versão atualizada da Z-Stack. A versão fornecida aquando da aquisição do cartão foi a 2.2.0, e como tal foi atualizada para a versão 2.5.0. A atualização da Z-Stack não trouxe melhorias, mas logo depois foram encontrados alguns parâmetros configuráveis (Tabela 3.2). As alterações surtiram efeito, e permitiu um aumento considerável da distância na associação. A Tabela 3.2 apresenta as alterações que foram definidos nos ficheiros “mac_radio_def.h” e “mac_spec.h” da Z-Stack 2.5.0.

Tabela 3.2 – Parâmetros alterados na configuração do módulo de rádio.

<i>Parâmetro</i>	<i>Antes (dBm)</i>	<i>Depois (dBm)</i>
MAC_RADIO_RECEIVER_SENSITIVITY_DBM	-91	-98
MAC_RADIO_RECEIVER_SATURATION_DBM	10	-4
MAC_SPEC_ED_MIN_DBM_ABOVE_RECEIVER_SENSITIVITY	10	-10

A potência de transmissão também foi alterada para o valor máximo de 4.5 dBm, de modo a obter o melhor alcance possível. Alguns valores da potência de transmissão encontram-se na Tabela 3.3. O valor da potência que vem configurado por omissão é de 1 dBm. Este valor foi alterado tanto para o ZC como para o ZR, recorrendo ao comando `MAC_MlmeSetReq (MAC_PHY_TRANSMIT_POWER, 0xF5)`. De modo a ser possível configurar a potência foi necessário definir o símbolo do pré-processador `HAL_MAC_USE_REGISTER_POWER_VALUES` em “`mac_radio_def.h`” [50].

Tabela 3.3 – Alguns valores programáveis da potência de transmissão.

Valor do Registo	Potência de Transmissão (dBm)
0xF5	4.5
0xE5	2.5
0xD5	1
0xC5	-0.5
0xB5	-1.5
0xA5	-3
0x95	-4
0x85	-6
0x75	-8

3.5 Desenvolvimento Android

O desenvolvimento para o sistema operativo Android tem por base a utilização da ferramenta Eclipse, que é um ambiente de desenvolvimento (IDE – Integrated Development Environment). Esta ferramenta inclui o *plugin* ADT (Android Development Tools) que fornece um conjunto de funcionalidades extra ao IDE para auxiliar o desenvolvimento da aplicação, nomeadamente um interface para o desenho do GUI, entre outros.

O smartphone utilizado no desenvolvimento das aplicações de suporte e dos testes foi o HTC Sensation. A versão do sistema operativo utilizado foi o Android 4.0.3. As especificações técnicas mais relevantes encontram-se na Tabela 3.4. Este equipamento integra um SoC Snapdragon S3 MSM8260 com uma CPU dual-core a 1.2 GHz, diversas interfaces de comunicação sem fios, uma interface microSD e um ecrã S-LCD capacitivo. Dispõe de apenas 1 GB de espaço de armazenamento e possui apenas a versão 3.0 do Bluetooth.

Tabela 3.4 – Especificações do smartphone HTC Sensation.

Redes móveis	GSM e UMTS
Tipo de ecrã	S-LCD capacitivo
Memória externa	Slot microSD
Memória RAM	768 MB
Armazenamento	4 GB (1 GB acessível ao utilizador)
USB	MicroUSB v2.0
Bateria	Li-ion 1520 mAh
WLAN	Wi-Fi 802.11 b/g/n
WPAN	Bluetooth 3.0
SoC	Qualcomm Snapdragon S3 MSM8260
CPU	1.2 GHz dual-core Qualcomm Scorpion
GPU	Qualcomm Adreno 220
Sensores	Giroscópio, acelerómetro, luz e proximidade
Outros	GPS, Camara

Após uma análise mais detalhada ao smartphone, foram detetados os módulos TPS65200 da Texas Instruments [51], e dois chips da Qualcomm, o PM8058 e o PM8901. Estes módulos são responsáveis pela medição da corrente, gestão de energia e controlo dos LEDs. Não foi possível obter informação detalhada acerca dos dois chips da Qualcomm. A informação foi conseguida através da análise do log do sistema recorrendo a diversos comandos Linux, do qual se destaca o comando `dmesg`, que apresenta o *buffer* das mensagens do *kernel*.

3.5.1 Medição do Consumo Energético

O interesse em determinar o consumo de energia dos smartphones é pertinente, dada a autonomia reduzida dos mesmos. O consumo depende não só do tipo de componente, mas também do seu modo de utilização. Normalmente, após alguns períodos de inatividade, o smartphone é colocado em *standby* para economizar energia, o que minimiza o desperdício de energia. Em algumas aplicações, não é possível desativar estes componentes, como, por exemplo, quando o ecrã é utilizado para apresentar dados, ou quando as interfaces de comunicações sem fios são necessárias para a transmissão ou receção de dados. A solução adotada neste trabalho passa por colocar o smartphone em modo avião, onde todas as interfaces rádio são desativadas e portanto o consumo dos mesmos é nulo. Relativamente à CPU, é escolhida a frequência de relógio mínima e constante, de modo a ter um impacto menor na medição do consumo de energia por parte do módulo SDZ-539.

A plataforma Android disponibiliza ao programador uma API onde é possível aceder a informação acerca do estado da bateria. Esta API é do tipo *event-driven*, o que significa que, quando um evento é gerado pelo sistema, a informação é difundida para as aplicações que estão à escuta. O `BroadcastReceiver`, que está associado ao `Android Service`, corre em *background* à escuta de um *broadcast* do tipo `ACTION_BATTERY_CHANGED`. Após a receção desta notificação é possível aceder a diversas informações da bateria relacionada com o nível de tensão, a temperatura, a percentagem atual, entre outras. Este evento é gerado a cada 60 segundos, que corresponde à periodicidade com que os valores são atualizados nas camadas mais baixas do sistema.

A informação relacionada com o estado da bateria, disponibilizada pelo sistema operativo, não permite determinar de forma adequada o consumo energético. O modo como é calculada a percentagem da bateria não é conhecido e como tal não foi utilizada essa informação. Após uma investigação do *hardware* do smartphone, foi determinado a existência de um sensor de corrente, contudo, uma pesquisa em diversos equipamentos mostra que nem todos smartphones estão equipados com

este tipo de sensor, e que alguns, apesar de terem o circuito para a medição da corrente, não têm o respetivo *driver*. O registo que fornece a corrente média consumida varia de acordo com o fabricante. No equipamento utilizado, o HTC Sensation, este encontra-se na seguinte localização:

- `/sys/class/power_supply/battery/batt_current`.

O valor da corrente média consumida, é atualizado a cada 60 segundos, e permite saber qual foi a corrente média consumida em mA. Não é mecanismo muito bom para detetar picos ou variações de corrente, mas em ambientes mais controlados permite estimar o consumo de energia de certos componentes.

Em smartphones mais recentes, por exemplo o Samsung Galaxy Express 4G, o valor da corrente é atualizado a cada segundo, permitindo determinar com maior exatidão os consumos verificados pelos diversos componentes. O registo que fornece a corrente média neste equipamento encontra-se na seguinte localização:

- `/sys/class/power_supply/battery/current_now`

3.5.2 Consumo do Ecrã LCD

O ecrã é um dos componentes principais numa aplicação especialmente quando a aplicação serve de interface para a visualização de dados. Atualmente existem dois tipos principais: os LCD e os OLED. Os ecrãs LCD têm o mesmo consumo independentemente das cores apresentadas, o que já não acontece com os ecrãs OLED, onde uma cor escura consome muito menos energia do que uma cor clara. A intensidade do brilho também é um fator que influencia o consumo.

O objetivo em medir o consumo do ecrã tem como finalidade quantificar o consumo, tendo em conta o facto de o sistema estar focado para ser utilizado em ambientes exteriores. Normalmente em ambientes exteriores, onde a luminosidade é mais intensa, a visibilidade torna-se mais reduzida. Este tipo de ecrãs apresenta uma visibilidade reduzida neste tipo de ambiente, pelo que a intensidade do brilho utilizada deve ser elevada. Também foi decidido que as interfaces de comunicações

deveriam estar desativadas para não influenciar as medições e, portanto, o smartphone foi colocado no modo avião.

Na Tabela 3.5 encontra-se as variáveis registadas: data, hora, corrente média consumida, nível da bateria, voltagem, temperatura e o nível de brilho do LCD. Em cada teste a bateria é carregada até aos 100% e o teste tem a duração de 30 minutos, sendo que são recolhidas 30 amostras para cada nível de brilho testado. Estes valores são armazenados em memória e depois são transferidos para o suporte externo para minimizar o consumo causado pela utilização da memória externa.

Tabela 3.5 – Registo do estado da bateria.

<i>Data</i>	<i>Hora</i>	<i>Corrente</i>	<i>Bateria</i>	<i>Voltagem</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Brilho</i>
dd-mm-aaaa	hh:mm:ss	mA	%	mV	°C	%

Como alternativa à medição do consumo de energia via *software*, poderia ter sido utilizado um equipamento de teste externo. Os testes feitos neste dispositivo são exclusivos a este equipamento. No entanto podem servir como modelo de referência para testes futuros.

3.5.3 Biblioteca Spectec – Módulo SDZ-539

A biblioteca da Spectec utilizada no desenvolvimento da aplicação Android é designada por libSMART_IO.so. Esta biblioteca contém um conjunto de funções de modo a facilitar a interação com o módulo SDZ-539. A versão utilizada neste trabalho foi a 6.2.07, mas já existe uma versão mais recente. As funções e os respetivos parâmetros encontram-se descritos na documentação fornecida juntamente com o módulo adquirido e não estão disponibilizadas no domínio público. No entanto as funções principais utilizadas são:

- VerifyAuthorizationCode() – função para verificar se o módulo é autêntico, através de um código de autorização. Em caso negativo as restantes funções não são permitidas;
- ExIOCommand() – função para aceder às funcionalidades de IO (*Input/Output*), através do método *send command/get response*. Com

esta função, a escrita é feita diretamente na porta UART do CC2530 do módulo SDZ-539. Além disso também é possível configurar a porta UART (definir a paridade, o controlo de fluxo, entre outros) diretamente da aplicação Java;

- CheckCMDStatus() – função para receber a mensagem de resposta após a execução das funções VerifyAuthorizationCode() e ExIOCommand().

3.6 Medição do RTT

Um dos objetivos deste trabalho é determinar o round-trip time (RTT) entre dois pontos de modo a calcular o atraso fim a fim do sistema. O RTT é conhecido como o tempo decorrido entre o envio de uma mensagem e a receção da respetiva confirmação, tal como mostra a equação (3.1).

$$\text{RTT} = \text{endTime} - \text{startTime} \quad (3.1)$$

Na Figura 3.10 encontra-se um diagrama de sequência que mostra a troca de mensagens entre o emissor (SmartRF05EB+CC2530EM) e o recetor (smartphone com o módulo SDZ-539). O emissor assume o papel de ZR e o recetor assume o papel de ZC. As funções principais encontram-se também representadas de um modo simplificado nessa figura. O ZR envia um pacote de dados para o ZC (AF_DataRequest) e regista o respetivo instante de tempo em milissegundos (osal_GetSystemClock) na variável startTime. O ZC recebe os dados via interface rádio ZigBee e envia os dados pela porta UART (UARTWrite) interna do cartão microSD. A aplicação Android desenvolvida lê os respetivos dados e cria a mensagem de resposta, que é depois enviada de volta ao emissor. O instante de tempo endTime corresponde ao instante de tempo em que é recebida a resposta. No caso da perda de uma mensagem, esta é retransmitida e o valor do startTime é recalculado.

As amostras são recebidas no PC através de uma porta série e são registadas num ficheiro de texto para depois serem processadas pelo *software* Microsoft Excel. O teste consiste no envio de 1000 mensagens com um *payload* fixo, com o objetivo

de determinar o valor mínimo, a média, o máximo e o desvio padrão. Também é gerado um histograma para observar a distribuição das amostras de cada teste.

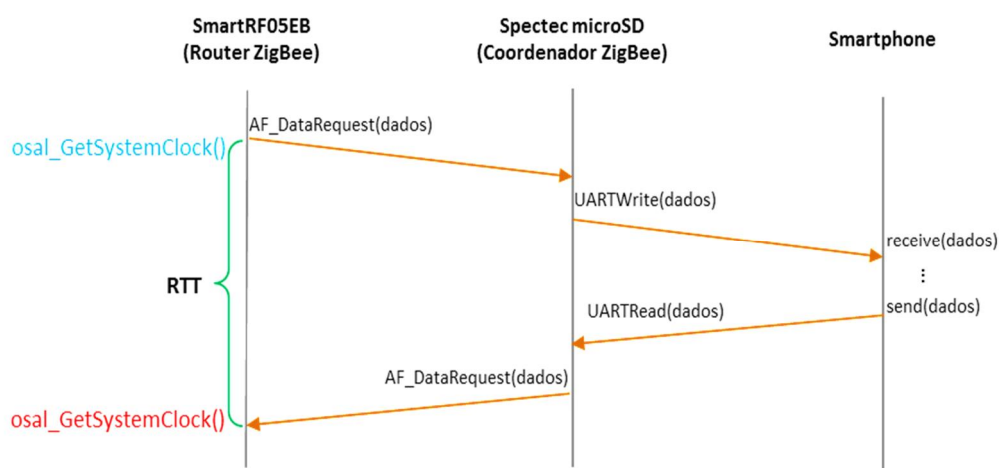


Figura 3.10 - Obtenção do RTT entre um nó ZigBee e a aplicação no smartphone.

De modo a determinar a relação entre o consumo de energia e o RTT, foi necessário fazer alguns testes em diferentes configurações com o objetivo de avaliar o impacto do intervalo de *polling* do módulo microSD SDZ-539 no consumo de energia do smartphone. Na Tabela 3.6 encontram-se as diversas configurações definidas.

Tabela 3.6 – Configurações utilizadas para testar o consumo do módulo SDZ-539.

Configuração	Aplicação ligada	Intervalo <i>Polling</i>	Rede ZigBee Formada
Idle (sem cartão)	não	n.d.	n.d.
C1	não	n.d	sim
C2	sim	n.d	sim
P1	sim	mínimo	sim
P2	sim	100 ms	sim
P3	sim	500 ms	sim
P4	sim	2 minutos	sim

Todos os testes foram efetuados com o ecrã ligado, com o brilho no máximo e no modo avião. Foi necessário desativar os LEDs do smartphone uma vez que o sensor de luminosidade ativa os mesmos quando a intensidade de luz ambiente é alterada.

3.7 Medição do Alcance

O alcance é uma característica importante em qualquer sistema de comunicação sem fios pois está diretamente relacionado com os limites físicos de funcionamento. Uma vez que o módulo utilizado nesta dissertação não é muito conhecido, decidiu-se testar alcance de modo a verificar se a sua utilização no sistema é viável. Como foi referido anteriormente, foram encontradas alguns problemas relacionados com a distância de associação, onde a Z-Stack limita a distância a que os dispositivos se podem associar. Esta característica da Z-Stack serve de algum modo para garantir que, com uma boa ligação na associação, a comunicação de dados será feita num canal com as melhores condições possíveis. Deste modo, nos testes realizados, não foi utilizada a Z-Stack, mas sim um protocolo desenvolvido especificamente pela Texas Instruments, o Basic RF.

De modo a testar as capacidades de comunicação do módulo SDZ-539, foram feitos testes tanto no modo de emissão como de receção, sendo possível configurar a potência de transmissão, o canal e o número de pacotes a transmitir. Uma potência maior, apesar do consumo superior, traduz-se numa distância maior para a comunicação. Além do aumento da distância também é normal que haja um aumento da temperatura do módulo, mas os efeitos sobre a comunicação não são conhecidos. Ao encontrar uma relação de potência que se enquadre no contexto do problema, pode ser escolhida a potência mais baixa de modo a tornar o sistema mais eficiente energeticamente.

3.7.1 Protocolo Basic RF

A medição do alcance tem por base a protocolo Basic RF [52], que foi desenvolvida pela TI com o intuito de se poder efetuar alguns testes ao *hardware*. Este protocolo contém somente as funcionalidades básicas necessárias no que diz respeito à camada MAC. Existem alguns exemplos de aplicações que são disponibilizadas pela TI que utilizam este protocolo, nomeadamente o PER Tester, Light/Switch e Spectrum Analyzer. A aplicação PER Tester serve para medir o PER

(Packet Error Rate) entre dois nós, o que de certo modo permite saber o alcance entre os mesmos. Esta aplicação diferencia-se da Z-Stack por não ter as otimizações ao nível das definições de rádio, onde só é escolhido um canal onde a deteção de energia encontra-se dentro de um certo limite [53].

A aplicação para medir o PER começa por definir uma ligação RF unidirecional entre dois nós, onde um assume o papel de emissor e o outro de recetor. Podem ser configuradas vários parâmetros tais como:

- O canal (11 - 26);
- O modo de operação (emissor ou recetor);
- A potência de transmissão (variável e.g. -3 dBm, 1 dBm, 4.5 dBm);
- O número de pacotes transmitidos (variável e.g. 100, 1000, 10000);
- O tamanho do payload (0 a 102 Bytes);
- A cadência de transmissão dos pacotes (100, 50, 20 ou 10 pacotes por segundo).

A camada Basic RF implementa algumas funcionalidades existentes na norma 802.15.4, todavia:

- A associação, o *scanning* e os *beacons* não se encontram implementados;
- Não existe um papel definido para cada nó, e todos têm a mesma equidade;
- Não há retransmissão de pacotes, isto terá de ser feita na camada superior se for necessário.

O formato da trama Basic RF encontra-se na Figura 3.11 e a arquitetura das aplicações de *software* encontra-se representada na Figura 3.12.

Octets: 1	2	1	2	2	2	5	Variable	2
Length Byte	Frame Control	Sequence number	Dest. PAN ID	Dest. Address	Source Address	Aux.Sec. Header	Frame payload	FCS

Figura 3.11 - Formato da trama Basic RF.

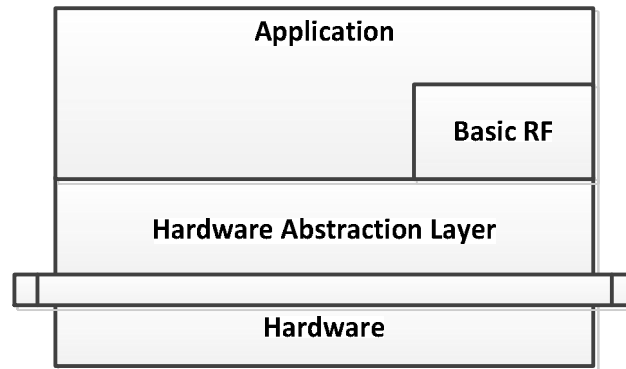


Figura 3.12 – Arquitetura das aplicações de teste.

A arquitetura é composta pelas seguintes camadas:

- Camada de aplicação (Application): contém as funcionalidades implementadas de cada aplicação;
- Camada Basic RF: oferece um protocolo simples para a transmissão e recepção de mensagens usando uma ligação RF bidirecional;
- Hardware Abstraction Layer: contém as funcionalidades para o acesso ao rádio e aos periféricos do módulo tais como o LCD, a UART, o *joystick*, botões e temporizadores, caso existam.

3.7.2 Emissor e Recetor

No emissor é possível de configurar a potência de transmissão, o tamanho do *payload* dos pacotes, o período entre pacotes enviados, o número de pacotes enviados e o canal. No *payload* é enviado o número de sequência, para o recetor saber quais os pacotes que foram perdidos, de modo a calcular o PER, que é dado pela equação (3.2).

$$\text{PER} = \frac{\textit{perdidos}}{\textit{perdidos} + \textit{recebidos}} \quad (3.2)$$

A utilização de um intervalo entre a transmissão de pacotes é importante, pois é necessário dar tempo ao recetor para processar o pacote antes de enviar o próximo. O recetor ao entrar no modo de recepção processa as mensagens e extrai o número de sequência. De seguida compara-o com o número de sequência esperado e calcula

o número de pacotes perdidos. O tempo total para a transmissão de todos os pacotes é dado pelo produto do número de pacotes enviados com o intervalo entre pacotes. Caso o recetor perca os últimos pacotes este tem maneira de saber que a transmissão já terminou.

Na Tabela 3.7 encontra-se as configurações do teste para a medição do alcance entre uma SmartRF05EB + CC2530EM e o módulo SDZ-539. O canal escolhido foi o 26. Apesar de existir a possibilidade de interferência do canal 13 do IEEE 802.11, foi verificada a ausência de redes a ocupar esse canal ao longo do teste.

Tabela 3.7 – Configurações do teste de alcance.

Canal	26
Modo	Emissor / Recetor
Payload	90 bytes
Intervalo	100 ms
Número de pacotes	1000
Distância	5 e 10 metros
Altura do solo	0.5 metros
Potência de Transmissão	-3 dBm, 1 dBm, 4.5 dBm

O payload utilizado foi de 90 bytes, o que é relativamente elevado. No sistema de controlo não é necessário utilizar um tamanho tão elevado, mas assim foi possível testar um caso extremo, perto do máximo permitido pela camada MAC, que é de 102 bytes. A distância entre os módulos foi fixada em 5 e 10 metros. A escolha de dez metros serviu para testar um caso limite, uma vez que o sistema proposto não necessita de um alcance tão elevado. No entanto, é sempre desejável que esta distância seja a maior possível. Além disso foi definido um intervalo entre a geração dos pacotes de 100 ms para dar tempo ao recetor de processá-los, sendo enviados ao todo 1000 pacotes. A potência de transmissão foi configurada para três valores diferentes, incluindo o valor de 1 dBm, que é definido por omissão na Z-Stack. Tipicamente os smartphones são equipados com um módulo Bluetooth de Classe 2, que tem alcance nominal próximo de 10 metros e como tal foi decido testar esta distância.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos, tendo também em conta as decisões tomadas e algumas limitações encontradas. Numa primeira parte é apresentado o consumo do ecrã LCD do smartphone em função da intensidade de brilho. Depois são apresentados os resultados relativos ao teste do RTT de modo a determinar o atraso fim a fim em diversas configurações definidas no capítulo anterior. Seguidamente é discutido o *tradeoff* entre o intervalo de *polling* e o consumo energético tendo em conta a utilização do módulo SDZ-539. Por fim, são apresentados os valores do PER e do RSSI médio para as várias configurações pré-definidas.

4.1 Consumo Energético do Ecrã LCD

Com este teste foi determinado o consumo energético do ecrã LCD do HTC Sensation. No sistema concetualizado o smartphone é utilizado em ambientes exteriores onde a visibilidade tende a diminuir, pelo que um aumento do nível do brilho é desejável. Como tal, foram feitos alguns testes no sentido de determinar o consumo deste componente. A aplicação desenvolvida regista os valores médios da corrente consumida, em mA, com um período de amostragem de 60 segundos. O valor deste período é de 60 segundos e não foi encontrado nenhuma maneira de diminuir este valor. No entanto, como foi explicado anteriormente já existem smartphones recentes que atualizam este valor a cada segundo, o que sugere que este valor varia entre fabricantes.

O nível de brilho foi incrementado desde o valor mínimo de 10% até ao valor máximo de 100%. O sistema operativo Android não distingue alterações de brilho abaixo de 10% e como tal não foram feitos testes nesse sentido. Em cada teste

foram utilizadas 30 amostras para cada um dos dez níveis testados. O gráfico resultante pode ser visualizado na Figura 4.1. Após uma análise dos dados obtidos, foi possível chegar à equação (4.1), por meio de regressão exponencial. Esta equação permite estimar o valor aproximado da corrente para qualquer valor de intensidade de brilho.

$$y(x) = 49,529e^{0,01532x} \quad (4.1)$$

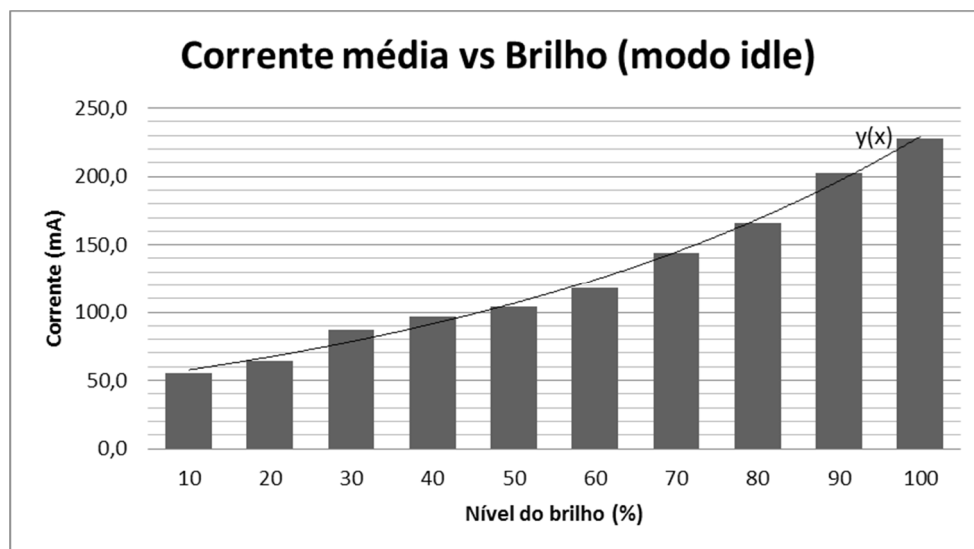


Figura 4.1 - Corrente média na configuração *Idle* para diferentes níveis de brilho.

O ecrã LCD é um dos elementos constituintes do smartphone que consome bastante carga de bateria. Na Tabela 4.1 encontra-se a autonomia esperada em horas para os diferentes níveis de brilho, para uma bateria com capacidade de 1520 mAh. A autonomia é calculada através da equação (4.2).

$$\text{Autonomia (h)} = \frac{\text{capacidade da bateria (mAh)}}{\text{consumo de corrente (mA)}} \quad (4.2)$$

De realçar que com o brilho máximo a autonomia do smartphone é inferior a 7 horas. Este valor diz respeito apenas ao consumo do LCD. Na prática a autonomia será inferior, pois há outros componentes ativados no sistema.

Tabela 4.1 - Estimação da autonomia em função do consumo do LCD.

Brilho (%)	Consumo médio (mA)	Autonomia (h)
10	55,6	27,3
20	64,2	23,7
30	86,7	17,5
40	97,2	15,6
50	103,9	14,6
60	117,7	12,9
70	144,3	10,5
80	165,6	9,2
90	202,6	7,5
100	227,8	6,7

A solução mais indicada para um utilização em ambientes exteriores seria a utilização de um sensor de luz para determinar automaticamente o brilho ótimo consoante a intensidade de luz natural. Por vezes essa gestão automática é insuficiente pois, mesmo com o brilho máximo, a visibilidade verificada chega a ser reduzida. É de realçar, porém, que o sistema de controlo de esforço não está dependente da utilização do ecrã, só em casos onde é necessária a interação do utilizador com o programa ou no caso de apresentar dados, como um mapa, o estado da bateria ou outros parâmetros como a distância percorrida ou a velocidade.

4.2 Medição do RTT

Para os testes foram escolhidos quatro tipos de intervalos de *polling*, indicados na Tabela 3.6 (P1 a P4). No cenário com intervalo mínimo (P1), a aplicação está continuamente a tentar ler dados do cartão e, assim que obtém os dados que lhe são destinados, envia de imediato a resposta. Os outros intervalos de *polling* testados foram 100 ms, 500 ms e 2 minutos (P2, P3 e P4 respetivamente). Na Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4 encontram-se os histogramas para o intervalo mínimo, de 100 ms e de 500 ms, respetivamente.

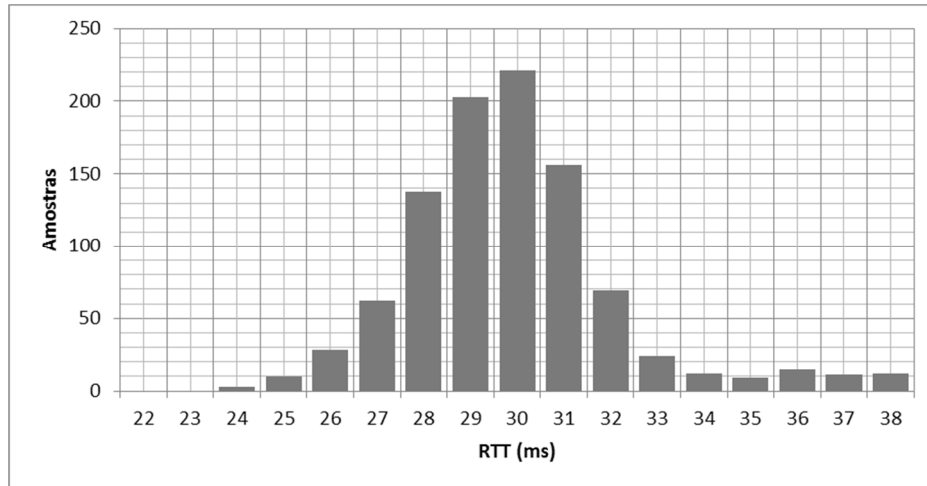


Figura 4.2 - Histograma do RTT com um intervalo de *polling* mínimo.

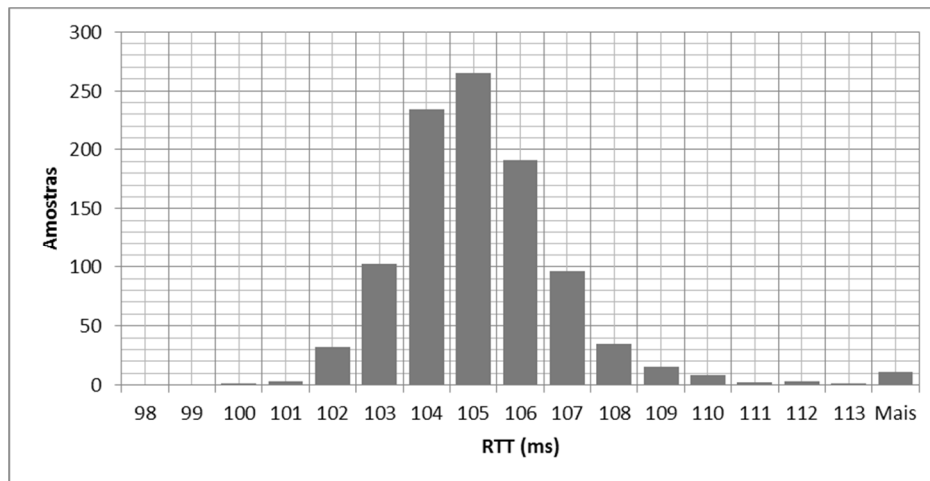


Figura 4.3 - Histograma do RTT com intervalo de *polling* de 100 ms.

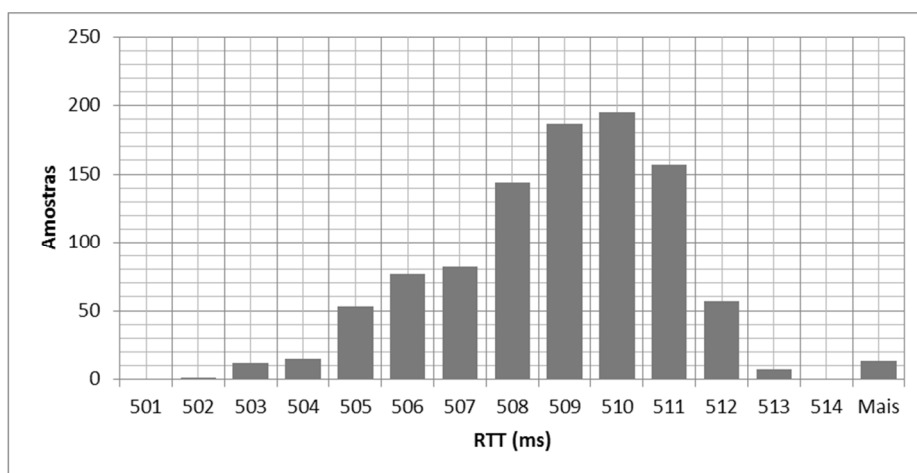


Figura 4.4 - Histograma do RTT com intervalo de *polling* de 500 ms.

No primeiro caso (Figura 4.2), onde o intervalo de *polling* é mínimo, verifica-se que o tempo de ida e volta ronda os 30 ms. No conjunto de 1000 amostras recolhidas mais de metade tiveram um RTT na região de 29, 30 e 31 ms. Realça-se que neste caso existe um conjunto de amostras fora dos valores centrais talvez devido à utilização intensiva da aplicação o que causou um aumento do tempo de resposta nesses casos. No segundo e terceiro caso (Figura 4.3 e Figura 4.4), o tempo de resposta ronda os 105 ms e 510 ms respetivamente.

No caso do intervalo de *polling* de 2 minutos, não é apresentado o histograma devido ao número reduzido de amostras recolhidas, mas na Tabela 4.2 são apresentados as estatísticas relativamente às 1000 amostras recolhidas para este cenário e para os outros três.

Tabela 4.2 – Estatísticas do RTT, em ms, para os quatro cenários de *polling*.

Cenário	Mínimo	Média	Máximo	Desvio padrão
P1	24	30,2	62	3,3
P2	100	105,2	130	2,3
P3	502	508,9	516	2,2
P4	120008	120012,7	1200016	2.0

Em todos os cenários o RTT não varia muito, tal como indica o desvio padrão. No entanto poderiam ser efetuados testes sob carga variável (outros processos intensivos a correr em simultâneo) para determinar possíveis flutuações nos valores do RTT.

4.3 Trade-off: Intervalo de *Polling* e o Consumo Energético

Um das características do módulo SDZ-539 é a necessidade da aplicação do smartphone necessitar de fazer *polling* para receber os dados provenientes da rede. Como tal foram definidas várias configurações de modo a determinar qual o impacto que a escolha de um intervalo de *polling* tem sobre o consumo energético do smartphone. As estatísticas dos dados recolhidos encontram-se na Tabela 4.3 e dizem respeito às configurações da Tabela 3.6. Estes dados apresentados dizem respeito à media de 30 amostras recolhidas a cada 60 segundos.

O consumo no modo Idle é feito para o nível de brilho a 100% de modo a testar o pior caso possível. Nesta tabela são apresentados os consumos totais, com o brilho no máximo, e os valores parciais do consumo sem a contribuição do ecrã (consumo adicional). O consumo com o nível do brilho a 100% corresponde ao valor médio de 227,8 mA.

A configuração C2 apresenta um consumo total ligeiramente maior que a configuração C1, diferenciando-se apenas na execução da aplicação Android mas sem a comunicação de dados ativada. As configurações P1, P2, P3 e P4 apresentam um consumo superior às configurações Idle, C1 e C2 pois a comunicação de dados encontra-se ativa. Há uma diminuição do consumo dentro das configurações P1, P2, P3 e P4 porém entre a configuração P1 e P2 houve um ligeiro aumento no consumo. Isto poderá ser devido à existência de uma margem de erro na medição dos consumos e pelo facto de existirem outros componentes do sistema sobre a qual não se tem um controlo adequado.

Tabela 4.3 - Consumo de corrente para as diferentes configurações.

Configuração	Consumo médio (mA)	Consumo médio adicional (mA)
Idle (sem cartão)	227,8	-
C1	260,6	32,8
C2	266,6	38,8
P1	355,3	127,5
P2	355,9	128,1
P3	338	110,2
P4	319,4	91,6

Existe um *tradeoff* entre a escolha do intervalo de *polling* adequado, para se ter um tempo de resposta baixo, e o respetivo consumo de energia do smartphone. Como pode ser verificado, a escolha de um intervalo de *polling* baixo (configurações P1, P2 e P3) aumenta o consumo. Além disso, esta utilização intensiva do cartão pode diminuir a sua vida útil. Como tal, deve ser escolhido o intervalo mais alto possível que ainda permita um tempo de resposta adequado no contexto da aplicação de controlo de esforço. Deste modo, dentre as configurações testadas, a configuração P3 é aquela que apresenta o melhor compromisso entre o consumo e o

RTT, apresentando um RTT máximo de 516 ms (Tabela 4.2) e um consumo de 110,2 mA. Já a configuração P4, apesar de permitir um consumo mais baixo, apresenta um RTT da ordem de 2 minutos, que não é aceitável.

A causa do consumo do modo P4 ser ainda relativamente elevado, apesar de utilizar um intervalo de *polling* muito superior aos das outras configurações, não foi determinada, mas pode estar ligada ao facto do sistema operativo estar a utilizar o cartão, ou ao facto de a aplicação estar a utilizar o ficheiro do qual necessita para a comunicação. Os consumos verificados encontram-se dentro dos limites esperados no que diz respeito à de um cartão microSD.

Na Tabela 4.4 encontra-se a comparação da autonomia entre o modo Idle e os modos P1, P2 e P3 para diferentes níveis de brilho. Ao escolher um brilho mínimo é possível obter uma autonomia duas vezes superior comparativamente ao brilho máximo. Entre os diferentes modos P1, P2 e P3 não existe uma diferença significativa no consumo, mas como o controlo de esforço é tolerante a atrasos, e pelo facto do cartão ter um desgaste maior mais com um intervalo de *polling* menor, o modo P3 seria o mais aconselhável. Enquanto a diferença da autonomia entre os modos P1 e P2 não é significativa, no modo P3 esta diferença já é significativa, podendo-se verificar no caso do brilho mínimo uma autonomia extra de quase uma hora. Com o aumento do brilho esta diferença não é tão significativa.

Tabela 4.4 - Comparação da autonomia entre a configuração Idle e os modos P1, P2 e P3.

Brilho (%)	Idle (h)	P1 (h)	P2 (h)	P3 (h)
10	27,3	8,3	8,3	9,2
20	23,7	7,9	7,9	8,7
30	17,5	7,1	7,1	7,7
40	15,6	6,8	6,7	7,3
50	14,6	6,6	6,6	7,1
60	12,9	6,2	6,2	6,7
70	10,5	5,6	5,6	6
80	9,2	5,2	5,2	5,5
90	7,5	4,6	4,6	4,9
100	6,7	4,3	4,3	4,5

4.4 Alcance vs Packet Error Rate

Os testes efetuados nesta seção têm como objetivo determinar o PER e o RSSI médio entre o módulo SDZ-539 e o CC2530EM para diferentes distâncias. A finalidade deste teste é determinar se existe uma perda significativa de pacotes com o aumento da distância e se a potência de transmissão influencia essas perdas. Foram feitos testes ao módulo SDZ-539, tanto como emissor e receptor, de modo a testar as capacidades em ambos os sentidos. Na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6 encontram-se os valores obtidos para as 1000 amostras enviadas para a distância de 5 metros. Para a distância de 10 metros os resultados encontram-se na Tabela 4.7 e na Tabela 4.8.

Tabela 4.5 – Emissor: CC2530EM, Distância: 5 metros.

Tx Power (dBm)	-3	1	4,5
PER (%)	0	0	0
RSSI médio (dBm)	-77,2	-70,9	-66,3

Tabela 4.6 – Emissor: SDZ-539, Distância: 5 metros.

Tx Power (dBm)	-3	1	4,5
PER (%)	0,1	0	0
RSSI médio (dBm)	-78,7	-71,5	-67,5

Tabela 4.7 – Emissor: CC2530EM, Distância: 10 metros.

Tx Power (dBm)	-3	1	4,5
PER (%)	0,2	0	0
RSSI médio (dBm)	-83,4	-76,7	-69,8

Tabela 4.8 – Emissor: SDZ-539, Distância: 10 metros.

Tx Power (dBm)	-3	1	4,5
PER (%)	0,2	0	0
RSSI médio (dBm)	-84,7	-78,6	-71,9

Os testes apresentam um PER que varia entre 0 e 0,2%. Salienta-se que o PER apresentado é antes da correção de erros (retransmissão de pacotes). No caso de utilizar o ZigBee essa correção seria feita pela camada MAC, e nesse caso, o PER esperado seria de 0% com a consequência de haver um aumento do atraso quando fosse necessário proceder à retransmissão de pacotes em erro.

Relativamente ao valor médio do RSSI, existe uma melhoria quando o CC2530EM assume o papel de emissor, embora a diferença não seja muito significativa. Tanto o módulo SDZ-539 como o CC2530EM têm, segundo as especificações técnicas, uma sensibilidade de receção de -97 dBm. Isto permite concluir que de algum modo as distâncias poderão ser aumentadas ainda mais, caso fosse necessário. Neste caso em concreto o sistema poderia utilizar uma potência de transmissão inferior, o que permitiria reduzir o consumo energético global.

5. Conclusões e Trabalho Futuro

No decorrer deste trabalho surgiram alguns desafios de ordem técnica que limitaram o tempo disponível para cada tarefa, mais precisamente, a integração do módulo SDZ-539 no sistema. Inicialmente foi utilizado o módulo SDZ-537 que tinha como requisito principal a utilização de um smartphone em modo *root*, sendo certo que a utilização desse modo invalida a garantia do smartphone e nem sempre é possível de ser feito. Essas limitações foram ultrapassadas com a aquisição de uma versão melhorada que não precisava do modo *root*, eliminando assim, os problemas relacionados com *file caching* existentes na versão anterior.

Um dos problemas verificados na utilização do módulo SDZ-539 foi no processo de associação de um ZED (ZigBee End Device) ou ZR (ZigBee Router) com um ZC (ZigBee Coordinator). Inicialmente, com a configuração base da Z-Stack, a distância de associação era inferior à distância de comunicação efetiva, onde apenas era possível fazer a associação num raio inferior, a sensivelmente, dois metros. Logo depois do processo de associação ambos os módulos podiam comunicar a distâncias superiores. Isto foi resolvido mediante a pesquisa extensiva das características da Z-Stack e do módulo CC2530 da Texas Instruments, que por sua vez também se encontra integrado no módulo SDZ-539. As alterações efetuadas na Z-Stack resultaram em melhorias significativas, passando a ser possível que os módulos se associassem a uma distância superior, permitindo a utilização do módulo sem qualquer problema. De modo a testar as capacidades do módulo, sem estar dependente da Z-Stack foram feitos testes usando o protocolo Basic RF, da Texas Instruments, que implementa apenas as funcionalidades básicas para a comunicação entre dois módulos. Os resultados dos testes mostraram que, num ambiente controlado, o módulo utilizado tem uma boa capacidade de comunicação, com perdas de pacotes na ordem dos 0%, sem a correção de erros ativada.

Em relação a alguns aspetos do módulo SDZ-539, este oferece apenas 2 GB de espaço de armazenamento, o que pode é relativamente pouco tendo em conta as capacidades máximas oferecidas atualmente por outros cartões microSD. O custo deste módulo ronda atualmente os noventa e cinco euros, o que é relativamente elevado tendo em consideração o custo atual dos smartphones de média e baixa gama. A necessidade de existir uma ranhura microSD, que por sua vez não existe em todos os smartphones, limita desde logo as opções dos equipamentos. Além disso, como é sabido, a memória *flash*, tem um tempo de vida finito. O tempo de vida útil depende principalmente da utilização que é dada ao cartão. Num ambiente onde o tráfego gerado pela rede é intensivo a vida útil será sempre inferior a um ambiente com tráfego menos intensivo. Deste mesmo modo, a utilização de *polling* intensivo pode provocar o desgaste do módulo, no sentido que o desgaste dos componentes eletrónicos é afetado pelo aumento de temperatura. Como trabalho futuro seria benéfico quantificar o tempo de vida útil do módulo e determinar se o aquecimento contribui significativamente para a diminuição da sua vida útil.

Sendo a energia um recurso valioso nos smartphones, foram efetuadas medições em diversas configurações para determinar o consumo de energia por parte do módulo SDZ-539. Estas configurações foram escolhidas de modo a determinar se existe uma diferença significativa no consumo para diferentes intervalos de *polling*. A escolha deste intervalo de *polling* está diretamente relacionado com o atraso fim a fim do sistema e o consumo de energia. Deste modo, e tendo em conta a finalidade do sistema, foi escolhido um intervalo de *polling* adequado e com o menor consumo possível. A medição deste consumo foi feita via software, recorrendo a um sensor de corrente que se encontra no smartphone.

Das medições efetuadas foi possível constatar que o consumo energético por parte do módulo SDZ-539 é relativamente elevado, tendo em conta que, a autonomia neste tipo sistema é muito importante. De realçar também que os testes foram feitos num ambiente controlado, sem a utilização de outras interfaces de comunicação, nomeadamente Bluetooth, Wi-Fi e as redes 2G e 3G. Contudo, em sistemas onde exista uma fonte de energia considerável, como é no caso da bicicleta

elétrica utilizada neste sistema, esta poderia ser utilizada para carregar o smartphone, fazendo com que o seu consumo deixasse de ser um fator tão importante. Esta abordagem teria como principal desvantagem o facto de estar a reduzir a autonomia da bateria da bicicleta. Caso a bicicleta dispusesse de um mecanismo de obter energia de outro modo, através, por exemplo, da travagem regenerativa, este problema poderia ser mitigado. Como trabalho futuro, seria interessante comparar os valores do consumo obtidos usando outra solução, via *hardware* ou mesmo com outros smartphones de modelos diferentes.

Um dos aspetos também considerados foi o impacto da interferência com as redes que operam na mesma banda de frequências, o que pode acontecer com as redes Wi-Fi, Bluetooth, entre outros. De modo a diminuir a probabilidade de reduzir possíveis interferências foi utilizado um canal que não interferisse muito com as redes Wi-Fi existentes na vizinhança. Apesar destes esforços no sentido de minimizar a interferência, seria necessário fazer um estudo mais aprofundado sobre o impacto da utilização de outros dispositivos de comunicação sem fios com o módulo utilizado, neste ambiente em concreto.

Relativamente à utilização da bicicleta elétrica no sistema, esta está sujeita a uma série de condicionantes que podem impedir o seu uso em pleno no sistema de controlo. O facto de o sistema estar limitado à velocidade máxima de 25 km/h impede que o motor seja utilizado acima dessa velocidade, limitando assim os diversos cenários de esforço que foram propostos. Caso a bicicleta abdicasse das regalias de ser considerado um velocípede perante o Código da Estrada este poderia ser utilizado sem qualquer restrição no que diz respeito ao auxílio por parte do motor.

A integração do sensor de ECG sem fios no sistema não foi possível devido a uma incompatibilidade entre as versões ZigBee. Este sensor utiliza a versão ZigBee 2004 e neste trabalho foi utilizada a versão ZigBee 2007. A especificação ZigBee [17] indica que a retrocompatibilidade com a versão 2004 é opcional. Porém, haveria a hipótese de integrar este sensor no sistema caso fosse utilizada apenas uma implementação do IEEE 802.15.4 nas duas partes, por exemplo a *stack* TIMAC.

A implementação de uma infraestrutura de rede baseada em Bluetooth seria uma alternativa para ser estudada em trabalhos futuros. Dado a existência de sensores e smartphones com BLE, a tendência será para a massificação da sua utilização. De acordo com um comunicado de imprensa [54] a nova versão do sistema operativo Android (Jelly Bean 4.3) tira partido da tecnologia BLE. Apesar do *hardware* já estar integrado em diversos smartphones, como é o caso do HTC Sensation, ainda existem poucos modelos comercializados com esta versão atualizada do sistema operativo. O BLE promete expandir o panorama atual da sensorização móvel, visto que o mercado do smartphones está em crescimento.

A integração do BLE nos smartphones vem dificultar o processo de integração do ZigBee/IEEE 802.15.4 ao oferecer uma alternativa de rede sem fios de baixo consumo, no entanto isto pode ser visto como mais um passo para a convergência das redes de sensores com os smartphones. Refira-se ainda que existe trabalho no sentido de integrar várias interfaces de comunicação num único chip. O SoC RS9113 da Redpine Signals, por exemplo, permite ter Wi-Fi, ZigBee e Bluetooth 4.0 no mesmo chip [55], o que pode contribuir para a proliferação da sensorização móvel.

Com este trabalho foi possível desenvolver competências em áreas distintas do conhecimento, através do desenvolvimento de uma infraestrutura de rede baseada em ZigBee e o desenvolvimento de aplicações para a plataforma Android. Foi também demonstrado que seria possível desenvolver uma solução baseada exclusivamente em ZigBee/IEEE 802.15.4. Porém, em trabalhos futuros, devem ser estudadas soluções mais eficientes do ponto de vista energético ou mesmo até estudar uma solução baseada num *gateway* Bluetooth/ZigBee com o objetivo de comparar os resultados obtidos neste trabalho.

Referências

- [1] OpenHandsetAlliance, “Android Overview”, Página web disponível em: http://www.openhandsetalliance.com/android_overview.html, consultada em 1-1-2013.
- [2] R. Araújo, “Desenvolvimento de uma Bicicleta Elétrica”, Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, 2012.
- [3] H. López, “Remote Vital Signs Monitoring Based on Wireless Sensor Networks”, Tese de doutoramento, 2011.
- [4] “Smartphone Operating System”, Página web disponível em: <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS24257413>, consultada em 8-8-2013.
- [5] P. Brady, “Android anatomy and physiology”, Google I/O Sessions, 2008.
- [6] “Android Application Architecture”, Página web disponível em: <http://www.tkhts.com/android/android-architecture.jsp>, consultada em 1-12-2012.
- [7] J. Chen, “An introduction to android”, Google I/O Sessions, 2008.
- [8] N. Meratnia et al., "Sensor Networks in the Low Lands," Sensors, vol. 10, pg. 8504-8525, 2010.
- [9] ZigBee Alliance, “Zigbee Wireless Sensor Applications for Health, Wellness and Fitness”, 2009.
- [10] N. D. Lane et al., "A survey of mobile phone sensing," Communications Magazine, vol. 48, pg. 140-150, 2010.
- [11] A. T. Campbell et al., “The Rise of People-Centric Sensing”, IEEE Internet Computing, Vol. 12, Issue 4, pg. 12-21, 2008.
- [12] C. Buratti et al., “An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and

-
- Evolution”, *Sensors*, Vol. 9, pg. 6869-6896, 2009.
- [13] M. Mun et al., "PEIR, the personal environmental impact report, as a platform for participatory sensing systems research," *MobiSys*, pg. 55-68, 2009.
- [14] S. Reddy et al., "MobiSense - mobile network services for coordinated participatory sensing", *International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*, pg. 1-6, 2009.
- [15] X. Sheng et al., "Energy-Efficient Collaborative Sensing with Mobile Phones", *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2012.
- [16] IEEE Std 802.15.4-2006 - Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006.
- [17] ZigBee Alliance, "ZigBee Alliance Document 053474r17" ZigBee Specification v. 1.0 r17, 2007.
- [18] ZigBee Alliance, "ZigBee and Wireless Radio Frequency Coexistence", 2007.
- [19] S. Pollin et al, "Harmful Coexistence Between 802.15.4 and 802.11: A Measurement-based Study", *3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrownCom 2008*.
- [20] Y. Mao et al., "Understanding the Interference between IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b/g via Measurements", *School of Computer Science and Technology, Universidade de Tianjin*, 2010.
- [21] A. Sikora, V.F. Groza, "Coexistence of IEEE 802.15.4 with other systems in the 2.4 GHz-ISM-Band", *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2005.
- [22] Jennic Ltd, "Co-existence of IEEE 802.15.4 at 2.4 Ghz", *Application note*, 2008.
- [23] G. Thonet et al, "ZigBee – Wifi coexistence", *White paper and test report, Schneider Electric*, 2008.
- [24] Cisco Systems, "Integrating an Industrial Wireless Sensor Network with Your

-
- Plant's Switched Ethernet and IP Network", white paper, pg. 3-6, 2009.
- [25] "NFC Application Development on Android with Case Studies", Página web disponível em: <http://software.intel.com/en-us/articles/nfc-application-development-on-android>, consultada em 1-9-2013.
- [26] S. B. Eisenman et al., "The BikeNet mobile sensing system for cyclist experience mapping," *5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Sydney, Austrália, 2007.
- [27] C. Outram et al., "The Copenhagen Wheel: An innovative electric bicycle system that harnesses the power of real-time information and crowd sourcing", *EVER'2010*, Monaco, Março de 2010.
- [28] Comunicado de imprensa, Página web disponível em: <http://www.cambridgeconsultants.com/news/pr/release/114/en>, consultada em 28-8-2013.
- [29] J. A. Afonso et al., "An Enhanced Reservation-Based MAC Protocol for IEEE 802.15.4 Networks", *Sensors*, Vol. 11, Issue 4, Abril de 2011, pp. 3852-3873.
- [30] W. Walker et al., "Mobile Health Monitoring Systems" *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Minneapolis, Minnesota, 2009
- [31] Spectec, "MicroSD Zigbee Card - sdz-539", Página web disponível em: <http://www.spectec.com.tw/sdz-539.html>, Dezembro de 2012.
- [32] Spectec, "SIM card SDS-321", Página web disponível em: <http://www.spectec.com.tw/simcard.html>, Dezembro de 2012.
- [33] Spectec, "USB dongle SDZ-536", Página web disponível em: <http://www.spectec.com.tw/sdz-536.html>, Dezembro de 2012.
- [34] Z. Sebastian et al, "Integrating Wireless Sensor Nodes and Smartphones for Energy-Efficient Data Exchange in Smart Environments", *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, Março de 2013.
- [35] J. Zhang et al, "A Sensing Platform to Support Smartphones Accessing into Wireless Sensor Networks", *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, 2011

-
- IEEE 8th International, pp.173,175, 17-22, Outubro de 2011
- [36] J. Zhang et al, "uSink: Smartphone-based mobile sink for wireless sensor networks", Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011, pp.90,95, 9-12, Janeiro de 2011
- [37] Jeffrey Sharkey, "Coding for Battery Life", Google Developer Conference, Maio de 2009.
- [38] A. Raza, "A battery and Network Usage Model for Smartphones", Dissertação de mestrado, Universidade de Adger, Noruega, Junho de 2012.
- [39] Nick Veasey, "Amazing X-ray photographs by Nick Veasey", <http://www.telegraph.co.uk/culture/culturepicturegalleries/5978621/Amazing-X-ray-photographs-by-Nick-Veasey.html?image=9>, consultado em 19-1-2012.
- [40] N. Baker, "ZigBee and Bluetooth strengths and weaknesses for industrial applications", Computing & Control Engineering Journal, Vol.16, Issue 2, 2005.
- [41] Texas Instruments, "A True System-on-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee Applications", Datasheet, 2013.
- [42] Texas Instruments, "CC2530 Development Kit User's Guide", Documento swru208b, 2009.
- [43] Texas Instruments, "Z-Stack Application Programming Interface", Documento SWRA195, 2011.
- [44] C. Kim, "Measuring Power Consumption of CC2530 With Z-Stack", Application Note AN079, 2013.
- [45] IEEE Std 1005–1991, "Definitions and Characterization of Floating Gate Semiconductor Arrays", IEEE Standard, 1991.
- [46] H. Lue et al, "Radically Extending the Cycling Endurance of Flash Memory (to > 100M Cycles) by Using Built-in Thermal Annealing to Self-heal the Stress-induced Damage", IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), Dezembro de 2012.

- [47] Texas Instruments, "CC Debugger User's Guide (Rev. F)", 2013.
- [48] SD Card Association, "SD Specifications Part 1 Physical Layer Simplified Specification Version 4.1.0", pg. 118, 2013.
- [49] Texas Instruments, "Z-Stack Sample Applications", Documento SWRA201, 2012.
- [50] T. Lootsma, "Choosing Optimal ZigBee Stack TX Power", Design Note DN202, Documento SWRA218B, 2009.
- [51] Texas Instruments TPS65200 Datasheet, "Li+ Battery Charger with WLED Driver and Current Shunt Monitor", 2010.
- [52] Texas Instruments, "CC2530 Software Examples User's Guide", Documento SWRU214A, 2013.
- [53] Texas Instruments, "Z-Stack User's Guide For SmartRF05EB and CC2530", Documento SWRU189, 2011.
- [54] Bluetooth Smart Ready, Página web disponível em: <http://www.bluetooth.com/Pages/Press-Releases-Detail.aspx?ItemID=167>, consultada em 24-7-2013.
- [55] Redpine Signals, "M2MCombo™ 802.11n 1x1, Dual-mode BT 4.0, ZigBee", 2013.