

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Monitorização da Qualidade do Ar utilizando
Redes Sem Fios Oportunistas**

Mónica Sofia Rei de Azevedo

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Portugal

Julho, 2010

A Dissertação intitulada

“MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR UTILIZANDO REDES SEM-FIOS OPORTUNISTAS”

foi aprovada em provas realizadas em 23/Julho/2010

o júri



Presidente Professor Doutor Luis Miguel Pinho de Almeida
Professor Associado do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor Rui Paulo Pinto da Rocha
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de
Coimbra



Professor Doutor Paulo José Lopes Machado Portugal
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
(Orientador);

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da
sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não
explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros
extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e
demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.



Autor - Mónica Sofia Rei de Azevedo

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Este documento descreve o projecto de um sistema de monitorização da qualidade do ar de uma cidade aproveitando, de forma oportunista, a sua infra-estrutura de transportes públicos.

O conceito é utilizar Autocarros para realizar a recolha de informação existente nas Paragens ao longo dos respectivos itinerários. Para tal, são colocadas Estações de Monitorização do Ar nas Paragens onde, periodicamente, é feita a aquisição e armazenamento da leitura dos sensores de qualidade do ar.

A comunicação entre os módulos de recolha contidos nos Autocarros e os módulos de armazenamento existentes nas Paragens será suportada por Redes *ZigBee*. Trata-se de uma tecnologia sem fios particularmente desenvolvida para redes de sensores, de baixo consumo de energia, baixa taxa de transmissão de dados e baixo custo de implementação aliado a um alcance satisfatório (tipicamente, 100m).

Em suma, a utilização da infra-estrutura de transportes públicos de uma cidade permite aumentar de forma simples a área de cobertura geográfica e, por outro lado, as Redes *ZigBee* possuem grande capacidade de adaptação a alterações frequentes da sua topologia: vandalismo, mau funcionamento de um dispositivo, mudança de posição geográfica, encerramento de Paragens, desvios de tráfego entre outras considerações.

Abstract

This document presents the design of an air quality monitoring system by taking advantage of a public transportation infrastructure.

The concept utilizes Buses for the collection of existing information at Bus Stops along their routes. Air Quality Station are placed in the Bus Stops where, periodically, is acquired and stored air quality sensors readings. Communication between Bus and Bus Stop is supported by ZigBee Networks.

ZigBee is a Wireless technology especially designed for Wireless Sensor Networks, low power consumption, low data transmission rate and low cost of implementation combined with a satisfactory range (typically 100m).

In short, using city's public transportation infrastructure can simply increase area coverage and, on the other hand, ZigBee Networks have great capacity to adapt to frequent changes of its topology: vandalism, device malfunction and change of geographical position, closure of Bus Stops, traffic detours and other considerations.

Agradecimentos

Agradeço aos meus Pais a oportunidade e a motivação que me deram para prosseguir os estudos: à minha querida Mãe agradeço-lhe o facto de ser tão amiga, compreensiva e tolerante comigo, dando-me todo o tempo e o espaço necessário para me dedicar durante estes cinco anos de curso. Ao meu Pai agradeço as palavras sábias e protectoras querendo sempre o melhor para mim.

Agradeço também ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Portugal, pela confiança e motivação. O seu sentido de responsabilidade, exigência e profissionalismo são, para mim, uma referência.

Ao Andry que sempre me escutou e me apoiou nos meus melhores e piores momentos, sempre atento, carinhoso e dedicado.

À minha irmã Marlene que apesar de me interromper nas horas de maior aflição com dúvidas de Matemática ainda me deixou tempo para conseguir fazer o curso.

À minha avó Carolina, pela educação que me deu e pela paciência com que me criou.

Aos meus padrinhos Amélia e Felisberto pela força, motivação e bons momentos que me proporcionam.

Aos meus eternos amigos Fillipe Ribeiro, André Cruz e Júlio Xavier, pelo carinho, amizade, disponibilidade e prontidão nos momentos que mais precisei.

E a todos aqueles que directa ou indirectamente contribuíram para tornar possível o desfecho deste ciclo.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Motivação e Contexto	1
1.2 - Objectivos.....	2
1.3 - Organização do Documento	2
Capítulo 2	5
Redes Oportunistas	5
2.1 - Enquadramento nas Redes Wireless	5
2.2 - Redes Oportunistas: Conceitos básicos	11
2.3 - Ciclo de Vida das Redes Oportunistas	14
2.4 - Arquitectura da Comunicação	16
2.5 - Principais tecnologias Wireless aplicadas	17
2.6 - Sumário	19
Capítulo 3	21
Redes ZigBee	21
3.1 - Definição de Redes ZigBee	21
3.2 - IEEE 802.15.4	22
3.3 - ZigBee Alliance.....	26
3.4 - Topologia de Redes ZigBee.....	27
3.5 - Segurança de Redes ZigBee	29
3.6 - Encriptação e Protecção de Integridade.....	30
3.7 - Microchip Stack for ZigBee Protocol.....	31
3.8 - Sumário	32

Capítulo 4	33
Análise de Requisitos	35
4.1- Enquadramento geral	35
4.2- Análise de Requisitos	38
4.3- Sumário.....	40
Capítulo 5	41
Arquitectura da Solução.....	41
5.1- Apresentação da proposta	41
5.2- Estação de Processamento Central.....	43
5.3- Autocarros	46
5.4 - Paragens	51
5.5 - Solução da <i>Microchip</i>	56
5.6 - Sumário.....	59
Capítulo 6	61
Validação da Solução	61
6.1 - Teste de inicialização de dispositivos ZigBee	61
6.2 - Troca de Endereços de Rede	62
6.1 - Reconhecimento de Paragens e pedido de Histórico.....	63
6.2 - Avaliação do comportamento do Sistema	64
6.3 - Autonomia da alimentação	67
6.4 - Estudo de Campo	68
6.7. Sumário.....	75
Capítulo 7	77
Conclusões e Trabalhos Futuros	77
7.1 Conclusões.....	77
7.2 Melhoramentos.....	78
7.3 Trabalhos Futuros	79
Anexos.....	81
Referências	89

Lista de figuras

Figura 2.1 - Classificação de Redes Wireless [23].	6
Figura 2.2 - Exemplo de redes Ad Hoc [24].	7
Figura 2.3 - Exemplo de uma rede Mesh [25].	8
Figura 2.4 - Exemplo de uma rede Veicular.	9
Figura 2.5 - <i>Wireless Sensor Networks</i> .	10
Figura 2.6 - Exemplo de rede tradicional estruturada.	10
Figura 2.7 - Exemplo de rede não estruturada.	10
Figura 2.8 - <i>Opportunistic Network Application</i> .	13
Figura 2.9 - Modelo de Sistema para disseminação de dados.	13
Figura 2.10 - Esquema de segurança na adição de novo <i>oppnet helper</i> .	14
Figura 2.11 - Algoritmo de evolução de Rede Oportunista [3].	15
Figura 2.12 - Situação hipotética de transmissão de mensagens.	16
Figura 3.1 - Pilha Protocolar IEEE 802.15.4/ <i>ZigBee</i> .	22
Figura 3.2 - Canais IEEE 802.15.4.	24
Figura 3.3 - Estrutura da trama da camada MAC.	25
Figura 3.4 - Alguns promotores e participantes da <i>ZigBee Alliance</i> .	27
Figura 3.5 - Topologias de redes <i>ZigBee</i> /IEEE 802.15.	29
Figura 3.6 - Microchip Stack for <i>ZigBee</i> Protocol.	32
Figura 4.1 - Itinerário de Autocarros ao longo da cidade do Porto.	36
Figura 4.2 - Infra-estrutura de transportes públicos na Baixa da cidade do Porto.	36
Figura 4.3 - Protótipo de Estação de Monitorização do Ar.	37
Figura 4.4 - Distribuição de Estações de Monitorização do Ar.	37

Figura 4.5 - Autocarro imobilizado junto a Paragem [26].	38
Figura 4.6 - Exemplo de Terminal de Autocarros.	38
Figura 5.1 - Integração da solução na infra-estrutura de transporte.	42
Figura 5.2 - Modelo Entidade Associação da solução.	43
Figura 5.3 - Estação de Processamento Central e Terminal de Autocarros.	44
Figura 5.4 - Exemplo de configuração das Estações de Monitorização da cidade.	45
Figura 5.5 - Exemplo de configuração de Lista de Sensores distribuídos pela cidade.	45
Figura 5.6 - Réplica de informação armazenada no Autocarro.	45
Figura 5.7 - Construção de trama até à Estação de Processamento Central.	46
Figura 5.8 - Arquitectura de hardware do Autocarro.	47
Figura 5.9 - Checklist de Recolha.	47
Figura 5.10 - Checklist Estado de Recolha.	48
Figura 5.11 - Esquema de actualização de flags das Paragens de Recolha.	49
Figura 5.12 - Diagrama de Sequências de interacção entre Autocarro e Paragem.	49
Figura 5.13 - Algoritmo implementado nos Autocarros.	50
Figura 5.14 - Arquitectura de Paragens.	51
Figura 5.15 - Estação de Qualidade do Ar.	52
Figura 5.16 - Diagrama de Sequências: Paragem.	52
Figura 5.17 - Estação de Qualidade do Ar.	53
Figura 5.18 - Algoritmo implementado nas Paragens.	55
Figura 5.19 - Hardware PICDEM Z.	56
Figura 5.20 - Esquema de ligação da Antena.	57
Figura 5.21 - Endpoints, cluster e attribute da aplicação.	57
Figura 5.22 - Associação de nós.	58
Figura 5.23 - Pedido de Informação.	58
Figura 5.24 - Troca de Endereços de rede.	59
Figura 5.25 - Sincronização dos nós.	59
Figura 5.26 - Reset.	59
Figura 6.1 - <i>Checklist</i> de teste de inicialização de dispositivos.	62
Figura 6.2 - <i>Checklist</i> de teste de troca de endereço de rede.	63

Figura 6.3 - Checklist de interações para a recolha de históricos de leituras.	63
Figura 6.4 - Percurso de utilizado no teste de velocidade.	66
Figura 6.5 - Disposição geográfica das Paragens.	69
Figura 6.6 - Estudo de Campo: conexão Autocarro - Paragem de Autocarro.	72
Figura 6.7 - Notificações de nó órfão.....	72
Figura 6.8 - Associação de <i>ZigBee</i> RFD à rede.	73
Figura 6.9 - Troca de endereço de rede.	73
Figura 6.10 - Pedido de Identificação de Paragem de Autocarro e resposta ao pedido.....	73
Figura 6.11 - Pedido de histórico de leituras e respectiva recolha.	73
Figura 6.12 - Envio de configurações.....	74
Figura 6.13 - Checklist de acompanhamento do estudo de campo.	74

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Comparação das Tecnologias <i>Wireless</i>	19
Tabela 5.1 – Estação de Monitorização do ar.	52
Tabela 6.1 – Comparação de diferentes meios de propagação.	65
Tabela 6.2 – Identificação de Paragens.	70
Tabela 6.3 – Identificação de Autocarros.	70
Tabela 6.4 – Configuração das Estações de Qualidade do Ar.	70

Abreviaturas e Símbolos

A/D	Analógico/Digital
ACK	<i>Acknowledgement</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
APL	Camada de Aplicação
APS	Sub-camada de Aplicação
ASP	<i>Application Service Provider</i>
CB	<i>Citizen Band</i>
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access Collision</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FCF	<i>Frame Control Field</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GTS	<i>Guaranteed-Time Slot</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineering</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medical</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union- Radiocommunication Sector</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
LQI	<i>Link Quality Indicator</i>
LR-WPAN	<i>Low Rate Wireless Local Area Network</i>

MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MANET	<i>Mobile Ad-hoc Neteork</i>
MHR	<i>MAC Header</i>
MIC	<i>Message Integrity Code</i>
MP3	<i>MPEG-1/2 Audio Layer 3</i>
MPDU	<i>MAC Protocol Data Unit</i>
MPI	<i>MultiPath Interference</i>
MRF	<i>MAC Footer</i>
NWK	<i>Network Layer</i>
O3	<i>Ozono</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
P2P	<i>Peer-to-Peer</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PAN ID	<i>Personal Area Network Identity</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistants</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PHR	<i>PHY Header</i>
PIC	<i>PICmicro</i>
PPDU	<i>PHY Protocol Data Unit</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RJ-11	<i>Registered Jack -11</i>
RS-232	<i>Recommended Standard 232</i>
RTOS	<i>Real-Time Operating System</i>
SFD	<i>Start of Frame Delimiter</i>
SHR	<i>Synchronization Header</i>
SIG	<i>Sistemas de Informação Geográfica</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UWB	<i>Ultra Wideband</i>
VANET	<i>Vehicular Ad Hoc Networks</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAN	<i>Wireless Mesh and Ad Hoc Networks</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WMN	<i>Wi-Fi Multimedia</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>
ZDO	<i>ZigBee Device Object</i>

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo apresenta-se a motivação e o contexto do problema em estudo, os objectivos propostos no âmbito da dissertação e a organização do documento.

1.1 - Motivação e Contexto

As comunicações Sem-Fios têm-se popularizado pela sua simplicidade, baixo custo de instalação, escalabilidade, autonomia energética e flexibilidade. Um dos protocolos Sem-Fios para aplicações de elevada autonomia e baixa taxa de transmissão dados é o protocolo *ZigBee*. A dispersão de um número significativo de módulos *ZigBee* num determinado ambiente permite operações de monitorização e/ou controlo através de uma Rede de Sensores Sem Fios. A estruturação destas redes pode ser de uma forma organizada (formal) ou *Ad Hoc* (informal). É neste último contexto que surgem as Redes Oportunistas.

As Redes Oportunistas são um tipo de Redes Móveis que se caracterizam por utilizarem os serviços de determinados dispositivos enquanto estes podem úteis para as funcionalidades da rede. Manifestam-se pela sua autonomia, capacidade de auto-organização, capacidade de adaptação a mudanças de ambiente, desempenho em ambientes agrestes e capacidade de auto-reparação quando confrontadas com falhas de componentes ou ataques maliciosos. Têm capacidade de reconfiguração dinâmica, isto é, a rede configura-se consoante as suas necessidades enviando convites a dispositivos para ingressar na rede ou simplesmente abandonando dispositivos que já não são úteis para a mesma. Esta propriedade revela o seu carácter oportunista.

Neste contexto, associando o baixo consumo e o baixo custo de implementação das Redes *ZigBee* à capacidade de organização, reconfiguração e adaptação a diversos ambientes das Redes Sem-Fios Oportunistas, é possível imaginar um vasto conjunto de aplicações possíveis.

Nesta dissertação será desenvolvido um sistema de monitorização da qualidade do ar de uma cidade que integra oportunamente a sua infra-estrutura de transportes públicos. A transferência de informação entre os elementos dessa infra-estrutura realiza-se através de Redes ZigBee.

1.2 - Objectivos

O objectivo desta dissertação é desenvolver parte de um sistema de monitorização da qualidade do ar de uma cidade utilizando a sua infra-estrutura de transportes. A comunicação entre os elementos desta infra-estrutura será realizada através de Redes ZigBee.

Pretende-se que à medida que o Autocarro realize o seu percurso pela cidade recolha os dados de qualidade do ar armazenados em cada Paragem para mais tarde serem depositados numa Estação de Processamento Central para futura análise. O desenvolvimento da Estação de Processamento Central está fora do âmbito desta dissertação.

Desta forma, pretende-se implementar os módulos de recolha dos Autocarros e os módulos de aquisição e armazenamento das Paragens de Autocarro. A transferência de informação entre estes módulos é suportada por uma rede ZigBee.

Em suma, pretende-se dispersar módulos de baixo custo e de consumo reduzido que permitam a leitura de elementos relativos à qualidade do ar de forma autónoma, extensível e com modo de poupança de energia - *sleep*- enquanto a rede não necessita do seu serviço.

1.3 - Organização do Documento

Esta dissertação está organizada em sete capítulos. Após o presente capítulo introdutório em que se descreve a motivação e contextualização, bem como os objectivos propostos, segue-se um segundo e terceiro capítulo, essencialmente teóricos, em que se apresentam isoladamente as Redes Oportunista e as Redes ZigBee. No segundo capítulo apresenta-se o conceito de Redes Oportunistas focando os seus principais aspectos: estado da arte, onde se realça o seu enquadramento no contexto das Redes Sem-Fios Móveis; o seu ciclo de vida, modelo do sistema e quais as arquitecturas de comunicação mais utilizadas.

No terceiro capítulo descreve-se as Redes ZigBee onde se apresentam os aspectos teóricos mais relevantes no âmbito da concepção de redes deste tipo.

No quarto capítulo apresenta-se um enquadramento geral do problema com a Análise de Requisitos do sistema que se pretende implementar.

No capítulo cinco discute-se a Arquitectura da Solução proposta em resposta aos requisitos analisados no capítulo anterior.

No sexto capítulo a Validação da Solução Proposta sustentada por diferentes testes e pela realização de um estudo de campo.

No sétimo capítulo apresentam-se as principais Conclusões e Trabalhos Futuros que possam ser desenvolvidos nesta área.

Capítulo 2

Redes Oportunistas

Este capítulo descreve o estado da arte das Redes Oportunistas começando por enquadrar a sua definição no âmbito das Redes *Wireless* e das Redes *Wireless* Móveis. Segue-se a definição dos principais termos no âmbito das Redes Oportunistas permitindo um melhor entendimento do seu funcionamento.

2.1 - Enquadramento nas Redes Wireless

As Redes *Wireless* consistem em dispositivos que comunicam entre si sem o uso de cabos ou fios e classificam-se de acordo com as diferentes exigências em termos de alcance máximo, taxa de transmissão de dados e ambiente de aplicação, figura [2.1](#). As classificações são as seguintes:

- Redes *Wireless* Pessoais ou de curta distância (WPAN): são redes muito utilizadas em comunicações ponto a ponto mas também podem ser aplicadas em comunicações de um ponto para vários pontos. A distância entre dispositivos pode variar entre 1 a 10 metros com uma taxa de transmissão reduzida (100-200 Kbps). Os próximos anos perspectivam-se vintouros quanto à sua utilização em ambientes industriais;
- Redes *Wireless* Locais (WLAN): são redes destinadas a aplicações muito concretas. A distância entre dispositivos pode variar de algumas dezenas em ambiente interior e de algumas centenas em ambiente exterior com uma taxa de transmissão elevada (1-20 Mbps). Esta tecnologia é utilizada particularmente em aplicações LAN e *Public Internet Hot-Spot* que englobam ambientes não industriais. Actualmente estão a ser desenvolvidas para ambientes industriais que se perspectivam muito robustas e reconfiguráveis;

- Redes *Wireless* geograficamente distribuídas ou de longa distância (WWAN): são redes muito utilizadas em comunicações ponto a ponto de longa distância e elevada taxa de transmissão (10Mbps).
- Redes *Wireless* Metropolitanas (WMAN): são redes que interligam vários LAN geograficamente próximos com débitos importantes. Assim, uma MAN permite que dois dispositivos distantes possam comunicar como se fizessem parte de uma mesma rede local. Uma MAN é formada por computadores ou *Switchs* interligados por relações de elevado débito.

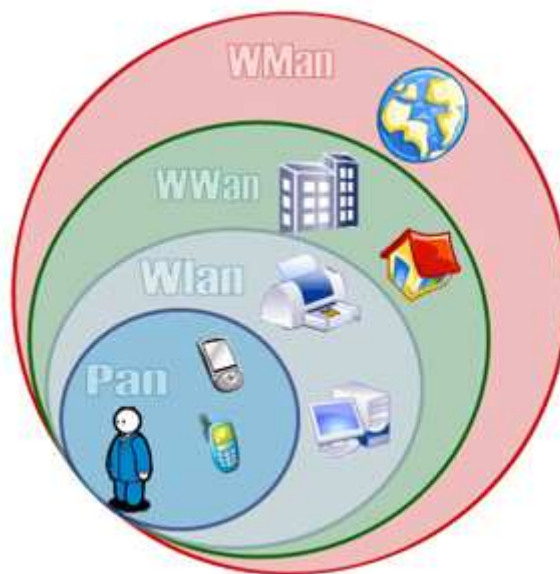


Figura 2.1 - Classificação de Redes Wireless [23].

Os dispositivos utilizados em Redes *Wireless* de acordo com cada uma destas classificações podem permanecer fixos em determinados pontos geográficos ou, em alternativa, possuírem um ou vários dispositivos móveis. Neste último caso enquadram-se as Redes *Wireless* Móveis.

2.1.1- Redes *Wireless* Móveis

Consideram-se Redes *Wireless* Móveis todas as redes que possuem um ou vários dispositivos móveis capazes de serem transportados entre pontos geográficos distintos e, por essa razão, a rede apresenta alterações frequentes de distância entre os seus dispositivos. A distância entre os dispositivos que pretendem comunicar sem o uso de fios é um factor importante pois para além de determinado alcance as comunicações ficam limitadas.

As redes Oportunistas enquadram-se num tipo de Redes *Wireless* Móveis nos quais também se incluem as Redes Mesh, Redes Ad Hoc, Redes Veiculares e Redes de Sensores [1].

2.1.2- Redes Móveis Ad Hoc

As *Mobile Ad Hoc Networks*, ou MANETS, consistem em módulos móveis livres para descrever trajectórias arbitrárias. A designação *Ad Hoc* surge no contexto de redes informais especificadas para uma aplicação muito concreta, como aliás o próprio termo sugere: “para isto” ou “para esta finalidade”. A figura 2.2 apresenta vários exemplos *Ad Hoc*.

Cada módulo possui um transmissor omnidireccional definido pelo protocolo IEEE 802.11 capaz de transmitir sinal para a área geográfica envolvente, definindo uma *transmission range* ou alcance de transmissão. O alcance de transmissão consiste na área geográfica que é afectada pelo sinal transmitido por um determinado transmissor omnidireccional.

Todos os módulos contidos no mesmo alcance de transmissão são considerados módulos vizinhos e são capazes de enviar e receber mensagens entre si. Um dos módulos envia uma mensagem que é escutada por todos os módulos contidos no mesmo alcance de transmissão. A topologia desta rede pode variar e em alguns casos ser dividida mediante a mobilidade atribuída aos módulos.

O uso destas redes complica-se quando se pretende comunicar entre módulos fora da zona de vizinhança pois requer uma difusão *multi-hop* das mensagens. Numa difusão *multi-hop*, as mensagens são encaminhadas de um módulo de origem para um módulo de destino através de módulos intermédios, o que implica uma enorme ocupação de banda e mesmo de consumo energético dos módulos. Acrescentam-se ainda limitações ao nível da mobilidade dos módulos e capacidade de armazenamento [1].



Figura 2.2 - Exemplo de redes Ad Hoc [24].

2.1.3- Redes Mesh

As redes Mesh, ou WMN, são constituídas por *Mesh Routers* e *Mesh Clientes* e conhecidas como redes IEEE 802.11s fiáveis e de baixo custo. Tipicamente os *Mesh Routers* estão estáticos (ou com mobilidade muito reduzida) formando uma “Espinha Dorsal” e permite que os *Mesh Clientes* acedam à rede. A figura 2.3 demonstra uma topologia deste tipo.

Tal como nas MANETs as WMN permitem grande cobertura geográfica, resiliência, e reduzidos custos de acesso. A mobilidade da rede está dependente das características dos

dispositivos associados aos módulos. Por esta razão, é uma topologia bastante utilizada nas Wireless LAN (WLAN).

A facilidade de configuração e expansibilidade são as principais vantagens da utilização de redes WMN, sendo a escalabilidade a sua principal limitação. O protocolo IEEE 802.11 utiliza o método CSMA/CA no acesso à camada MAC e tal faz com que a rede WMN sofra as mesmas interferências que as redes MANETs. As soluções *multi-radio* e *multi-channel* minimizam o problema enquanto a rede encaminha informação ou enquanto os *Mesh Clientes* pretendem aceder a determinadas funcionalidades. Ambas as soluções permitem separar dois tipos de tráfego no domínio *Wireless*: enquanto a rede se configura e encaminha informação num canal, o acesso dos *Mesh Clientes* aos serviços da rede decorrem num canal diferente. Nas redes MANETs esta separação não se aplica, visto as diferentes funcionalidades da rede decorrerem no mesmo canal e, por esta razão, têm uma performance inferior às WMN [1].

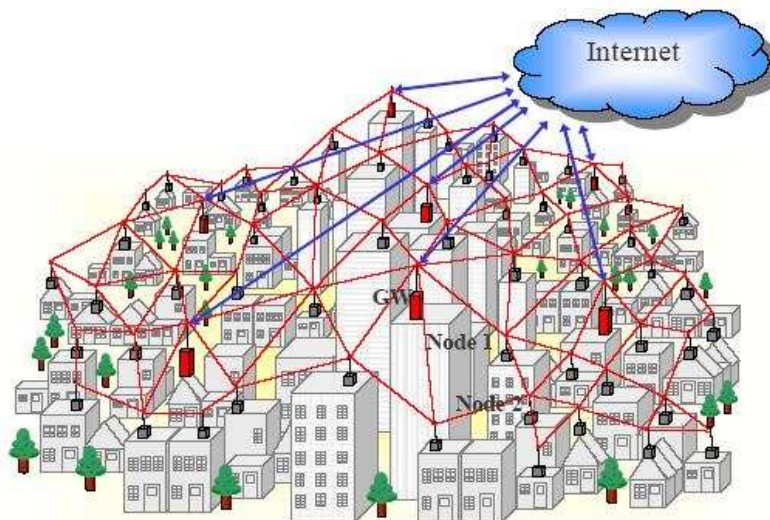


Figura 2.3 - Exemplo de uma rede Mesh [25].

2.1.4- Redes Veiculares *Ad Hoc*

Redes Veiculares *Ad Hoc*, ou VANETs, são um conjunto de redes MANETs em que os módulos se encontram afixados em veículos móveis. A principal particularidade deste tipo de redes é a velocidade dos módulos que é muito superior ao que é esperado nas MANETs simples. Por outro lado, são redes previsíveis, desde que os veículos cumpram as rotas predefinidas.

A velocidade dos módulos implica uma mudança frequente da topologia da rede e por outro lado como os módulos se movimentam em veículos autónomos (com a sua própria alimentação), os recursos de uma rede VANET podem ser abundantes [1]. Atente-se à figura 2.4 que demonstra uma representação possível de VANETs no que respeita à diversidade de equipamentos e comunicações. Estas redes permitem comunicação entre módulos fixos, entre módulos móveis, e entre um módulo móvel e um módulo fixo, consoante a necessidade.

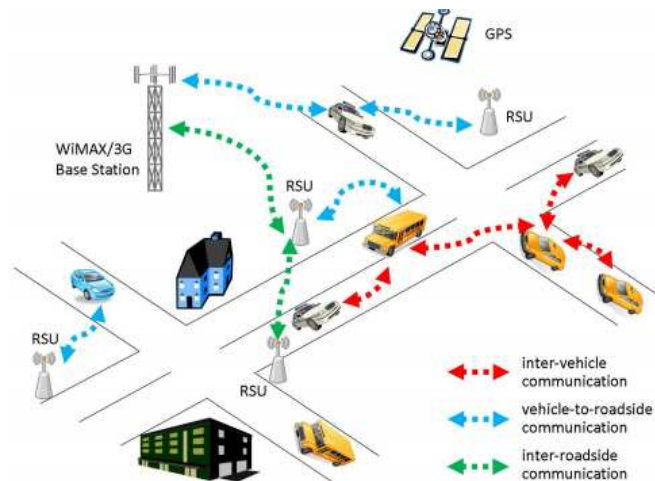


Figura 2.4 - Exemplo de uma rede Veicular.

2.1.5- Wireless Sensor Networks

As *Wireless Sensor Networks*, ou WSN, consistem em redes cujos dispositivos se encontram distribuídos numa área geográfica considerável com vista a monitorizar e/ou controlar um ambiente específico [15]. Os módulos dos sensores são tipicamente de baixo consumo, possuem grande capacidade de armazenamento e comunicam entre si através de protocolos de comunicação específicos. Em particular, esta topologia não é vocacionada para movimentações frequentes pelo que podem ser predefinidas, figura 2.5. A troca de informação é tipicamente *multi-hop* em que o atraso deve ser tomado em consideração [1].

Nas redes tradicionais os módulos comunicam através de estações de rádio base que constituem uma infra-estrutura de comunicação, conforme ilustrado na figura 2.6. Nas redes MANETs os módulos trocam informação directamente entre si como ilustrado na figura 2.7, portanto, do ponto de vista da organização, as redes WSN e MANETs são semelhantes pois permitirem a comunicação directa entre os módulos sem o uso de fios. No entanto, as MANETs têm como função básica prover um suporte de comunicação entre os diferentes elementos computacionais que individualmente podem estar a executar tarefas distintas. As WSN, por sua vez, tendem em executar uma função colaborativa onde os elementos (sensores) provêm dados que são processados por nós especiais, chamados *sink nodes* [4], os quais podem funcionar como:

- *Data Source*: permite acções de aquisição, processamento, memorização, comunicação sem-fios, e actuação no próprio ambiente;
- *Data Router*: transmite a informação de um nó vizinho para outro através da estação de controlo. A estação de controlo processa e analisa a informação recolhida pelos diferentes nós/sensores da rede.

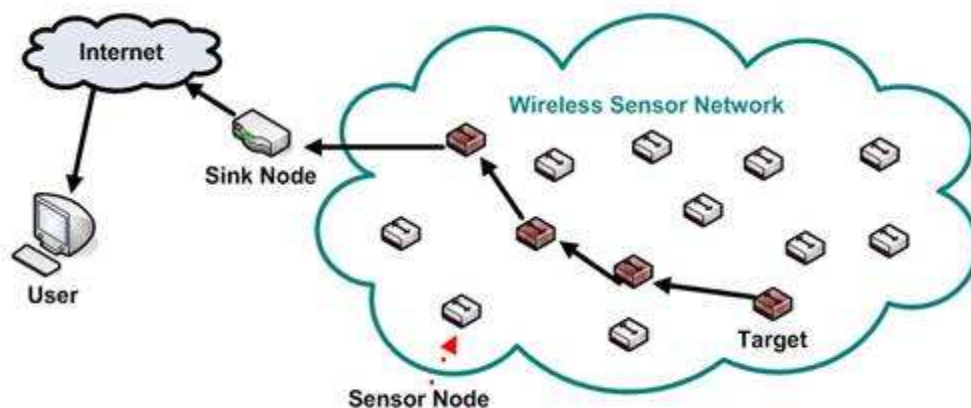


Figura 2.5 - Wireless Sensor Networks.

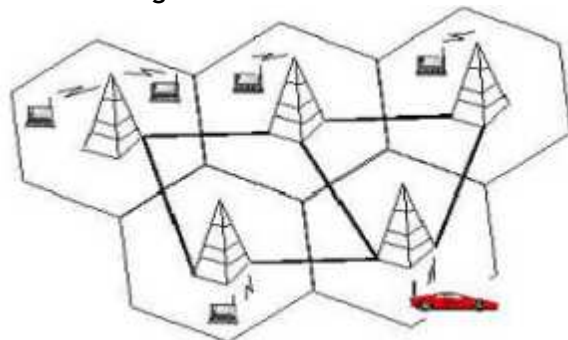


Figura 2.6 - Exemplo de rede tradicional estruturada.

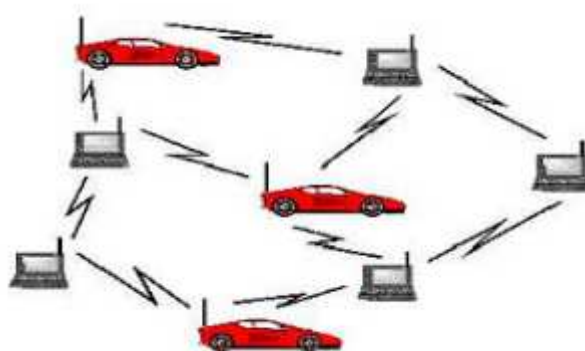


Figura 2.7 - Exemplo de rede não estruturada.

2.1.6- Redes Oportunistas

As Redes Oportunistas, ou *oppnets*, também conhecidas como *Delay Tolerant Networks* correspondem à intercepção de redes *Ad Hoc*, sistemas *Peer-to-Peer* e *Wireless Sensor Networks* (WSN) que melhoram as aplicações sem fios já existentes e despoletam o desenvolvimento de novas aplicações. Consistem em redes *Ad Hoc* que interligam vários módulos sem-fios a partir de módulos originários (sementes) sendo as conexões, no geral, temporárias: um ou vários módulos originais convidam ou simplesmente abandonam outros módulos consoante a sua utilidade para os serviços prestados pela rede num determinado momento.

A topologia das *oppnets* varia de acordo com a mobilidade dos módulos, respectiva activação e desactivação. No mínimo, uma *oppnet* possui duas funcionalidades: *Node Discovery* e *One-Hop Exchange*. A funcionalidade *Node Discovery* permite que os módulos da rede pesquisem outros módulos que se encontrem no mesmo alcance de transmissão para com eles estabelecer conexões; por sua vez, a funcionalidade *One-Hop Exchange* permite a troca de informação entre os módulos conectados.

As redes oportunistas diferem das redes tradicionais, como as MANETs ou as WMNs, no que respeita à mobilidade dos módulos e capacidade de alterações frequentes de topologia da rede sempre que se justifique no âmbito da aplicação. A comunicação entre os módulos da rede apenas é possível se estes se encontrarem no mesmo alcance de transmissão [1]. Têm a capacidade de se auto-configurar e permitem detectar dispositivos vizinhos usando meios de comunicação como o *ZigBee*, *Bluetooth*, *Wi-Fi*, etc [3]. Segundo [2], as *oppnets* têm potencial em situações de emergência, por exemplo catástrofes naturais.

“In the past few years we have seen great disasters, such as 9/11 terrorist attack, tsunami in the Southeast Asia and Hurricane Katrina. The casualties and damages are too often compounded by problems faced by the first responders and relief agency workers. There is a common thread to all these problems: lack of adequate communication facilities in the disaster areas and beyond.”

Portanto, fornecer meios de comunicação seguros em situações de emergência perspectiva-se um desafio fundamental para as tecnologias de comunicação e informação.

2.2 - Redes Oportunistas: Conceitos básicos

Nesta secção define-se os principais conceitos relativos às Redes Oportunistas e resume-se aspectos a ter em consideração quanto à modelação de uma Rede Oportunista bem como à integridade e segurança das mesmas.

2.2.1 -Nó e Nó Móvel

O Nó, ou módulo, de uma Rede Oportunista é um dispositivo dotado de capacidade de comunicação sem fios que utiliza protocolos para partilha e disseminação de informação. Se um Nó possuir mobilidade na *oppnet* designa-se “Nó Móvel”.

2.2.2 -Oppnet helpers

Os *oppnets helpers* são Nós que não têm qualquer capacidade de detecção mas podem contribuir positivamente para a *oppnet* no que respeita à capacidade de comunicação, processamento e sensorização. Segundo [2], quando a *oppnet* trabalha em modo “*desaster*”, isto é, num modo de operação particular, não requer funcionalidades adicionais àquelas que efectivamente necessita no modo actual e, portanto, prescinde dos *oppnets helpers* que não são necessários.

2.2.3 -Modelação das Redes Oportunistas

A modelação de Redes Oportunistas para uma determinada aplicação deve atentar determinados aspectos nos quais se destacam:

- *Presence Awareness Service*: fornece à aplicação a informação dos nós e dos utilizadores que estão activos no mesmo alcance de transmissão;
- *Message Exchange Service*: permite que as mensagens sejam trocadas entre nós contidos no mesmo alcance de transmissão. É precisamente este serviço que implementa as comunicações *one-hop*. Este serviço, contudo, não verifica o sucesso ou insucesso com que as mensagens foram recebidas no destino. Essa tarefa fica destinada ao serviço de *Acknowledgment* pertencente à camada de aplicação;
- *Information Filtering Service*: permite que quando a *oppnet* esteja em perigo de SPAM a informação irrelevante seja filtrada para que se torne transparente para o utilizador. A autenticidade de informação fica assim assegurada através de uma assinatura digital;
- *Information Distribution Service*: permite que se a aplicação não contemplar a participação do utilizador, esta possa decidir se a pretende partilhar ou restringir o uso dos recursos do dispositivo;
- *Security Service*: no sentido de manter a integridade e autenticidade das comunicações, os serviços de segurança oferecem uma assinatura e encriptação de informação;
- *Identity Management Service*: especifica como o utilizador está para o sistema. O utilizador pode interagir de forma anónima, com um pseudónimo ou com uma assinatura própria. No caso de manter o anonimato os serviços devem proteger a informação de todas as camadas de comunicação, caso contrário podem ser atacadas e eventualmente destruídas.
- *User Notification Service*: notifica o utilizador no caso de ser produzida informação inadequada. A implementação deste serviço depende das capacidades do dispositivo e da urgência das notificações.

O design da aplicação de uma Rede Oportunista deve atender nos na seguinte estrutura:

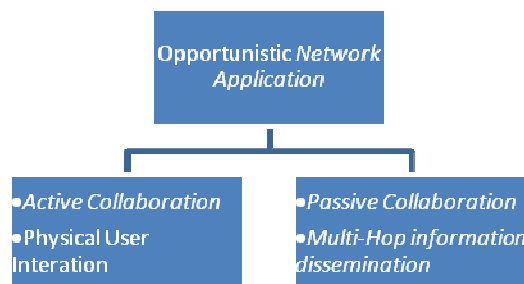


Figura 2.8 - *Opportunistic Network Application*.

A *Active Collaboration* trata da proximidade física do utilizador e tem a vantagem de permitir um conhecimento completo das responsabilidades do utilizador nos dispositivos da rede [12]. A *Passive Collaboration* é uma forma de recolher e transmitir qualquer informação entre utilizadores no mesmo alcance de transmissão e desenvolve-se sem a intervenção do utilizador [13].

A disseminação de informação é o processo pelo qual a informação é distribuída pela Rede Oportunista. As regras estão especificadas em protocolos de partilha de informação e revelam-se em dois passos: *Node discovery* e *One-Hop Exchange* apresentados na secção anterior. São os nós da *oppnet* que definem o modelo do sistema da rede oportunista. A figura 2.9 representa um modelo possível. São representados vários nós móveis com o seu alcance de transmissão tipicamente esférico. De notar que na prática não é exactamente uma esfera visto o sinal irradiado sofrer interferências de diferentes direcções.

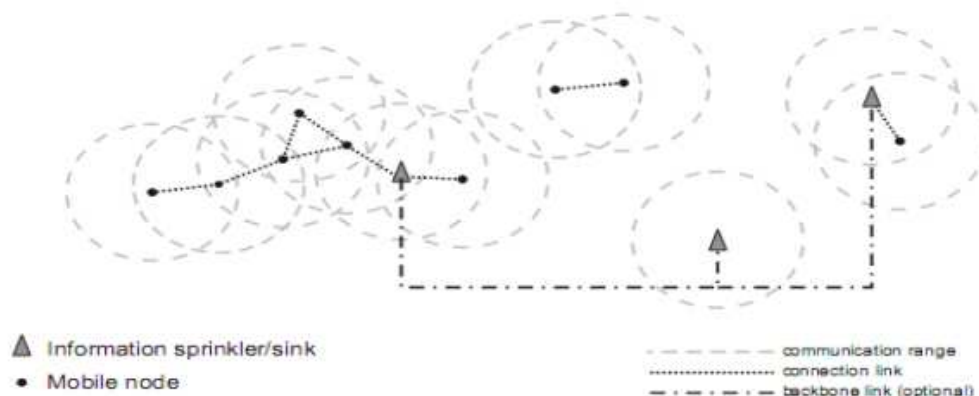


Figura 2.9 - Modelo de Sistema para disseminação de dados.

2.2.4 -Privacidade e Segurança

Um dos problemas da privacidade e segurança de redes Oportunistas é o facto da autenticidade, em geral, não poder ser configurada quando os dispositivos se juntam à rede. Portanto, não é possível garantir que dispositivos maliciosos não se juntem. Distribuir chaves de segurança apenas aos dispositivos considerados “não maliciosos” é muito complicado em ambientes *Ad Hoc*. Por outro lado, permitir mecanismos de autenticação baseada em criptografia não ajuda em todas as situações. A figura 2.10 mostra o esquema de segurança de uma *oppnet* quando um novo *oppnet* helper se junta à rede. Na ausência de mecanismos de autenticação inicial, todos os passos da figura são obrigatórios [2].

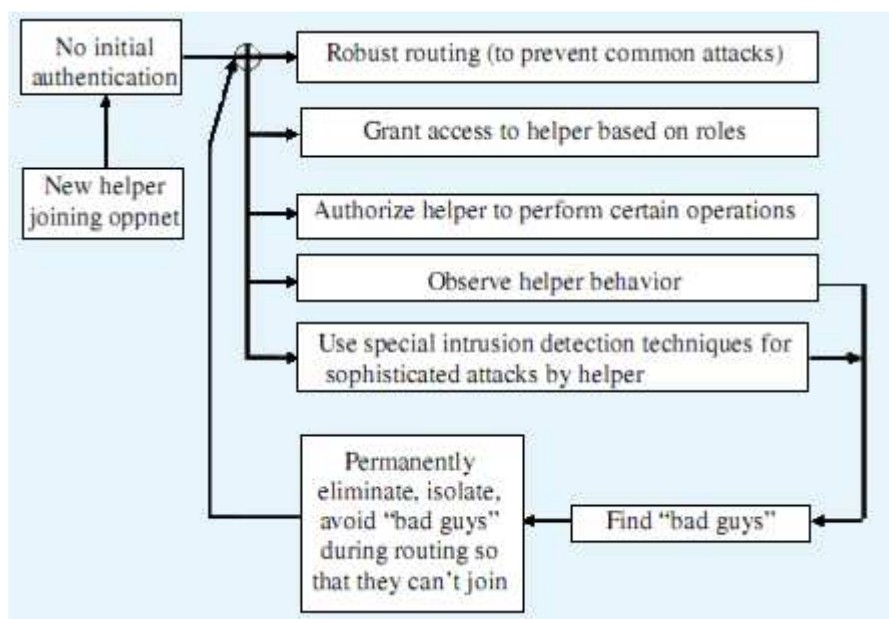


Figura 2.10 - Esquema de segurança na adição de novo *oppnet* helper.

A encriptação é uma forma de proteger a informação da *oppnet*. Um Controlador transmite a sua chave a todos os dispositivos e todos eles encriptam a sua informação com base na chave pública fornecida. O Controlador posteriormente há-de desencriptar a chave privada resultante de cada dispositivo quando tal acção se justificar.

Para manter a integridade de informação são utilizadas assinaturas digitais que se revelam computacionalmente caras para dispositivos limitados quer em processamento quer em consumo de energia. Por outro lado, o tamanho dos pacotes também varia ao longo da rede para facilitar a transmissão, portanto, os processos de fragmentação e agregação devem ser minuciosos em termos de segurança. Caso contrário a segurança da rede é comprometida [2].

Em suma, a *oppnet* pode ser fiável se a privacidade dos seus *oppnet* helpers for garantida através de um controlo de acesso (autenticação e autorização) e de prevenção de intrusões (primitivas de intrusão). O controlo de acessos no contexto das Redes Oportunistas é mais difícil de garantir comparativamente com a Internet ou redes *Ad Hoc* sobretudo devido à sua heterogeneidade.

2.3 - Ciclo de Vida das Redes Oportunistas

Uma Rede Oportunista baseia-se num princípio fundamental: cresce a partir da sua semente. A semente de uma *oppnet* consiste no conjunto inicial de módulos predefinidos no momento da sua implementação [2]. O crescimento da rede ocorre através da detecção de módulos vizinhos e convites aos potenciais candidatos a ingressar na *oppnet*. A figura 2.11 esquematiza o algoritmo de evolução da rede.

Os módulos detectados são identificados e avaliados no sentido de se averiguar a sua confiabilidade e utilidade para a *oppnet*. De seguida, os potenciais candidatos são convidados

a aderir à *oppnet* os quais podem aceitar ou rejeitar. Uma vez aceite o convite, o novo módulo (e seus recursos) passam a fazer parte da rede. Um participante da rede pode ser autorizado a realizar convites a outros módulos para aderirem à rede.

Quando um participante da *oppnet* deixa de ser necessário, isto é, quando a sua missão na rede é cumprida, deve ser libertado e restaurado para o estado em que se encontrava antes de ter aderido à mesma. Esta particularidade minimiza a intromissão de dispositivos que já não são necessários nas tarefas que a rede se encontra a executar. Esta particularidade revela, ainda, o carácter oportunista da rede: apenas utiliza os serviços de um dispositivo enquanto este pode ser útil; caso contrário libera-o.

Os dispositivos das redes *Wireless Oportunistas* fornecem o acesso a comunicações distintas, estações remotas de aquisição, poder computacional e de armazenamento da informação recolhida bem como outros recursos que sem eles a rede não teria tal capacidade. Em particular, as *oppnets* podem estabelecer pontes entre meios de comunicação distintas e uma forma de interligar diferentes recursos e serviços [3].

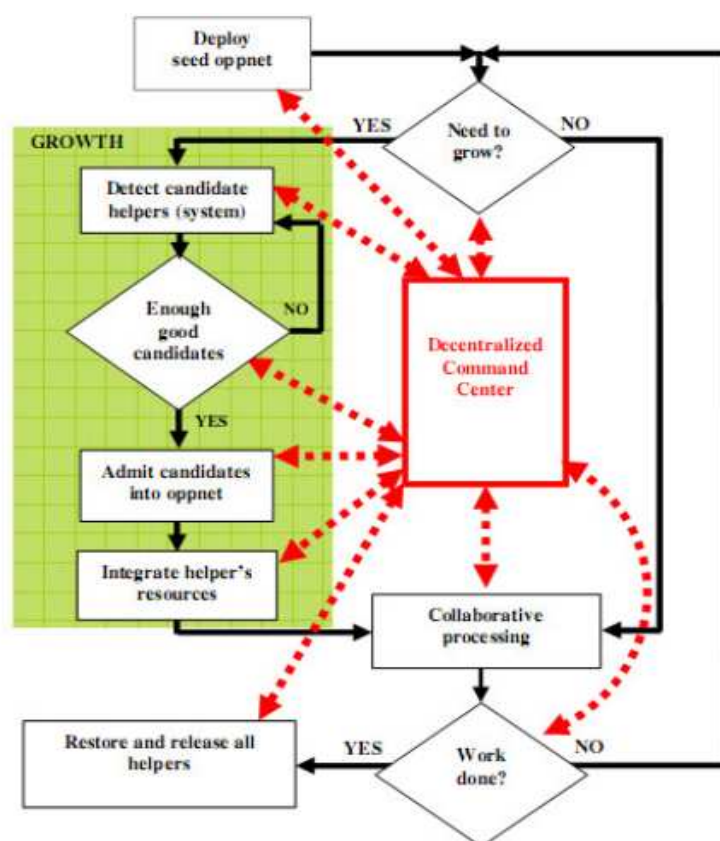


Figura 2.11 - Algoritmo de evolução de Rede Oportunista [3].

A geração de convites são cancelados quando a *oppnet* destinada a uma determinada aplicação possuir os *oppnets helpers* suficientes que permitam sensorizar, processar e estabelecer comunicações entre os nós. Desta forma, a *oppnet* não está constantemente a enviar convites aos dispositivos, deixando esse procedimento apenas para quando se justificar.

2.4 - Arquitectura da Comunicação

2.4.1 - Redes Oportunistas e Redes *Ad Hoc* Móveis

Os módulos de uma Rede Oportunista podem ser fixados em estruturas móveis. Neste aspecto, as Redes Oportunistas estão intrinsecamente ligas às MANETs, só que, do ponto de vista da camada de rede, as MANETs estão para a camada de rede tal como as *oppnets* estão para a camada de aplicação. Em particular, uma importante diferença entre ambas consiste no encaminhamento de informação ou *routing*. As MANETs focam algoritmos de encaminhamento eficientes. Os mais promissores são o modo proactivo e reactivo [5]. São comuns soluções que incluem a posição geográfica dos nós [6]. Neste contexto, desde que as MANETs têm sido estudadas quer no âmbito de aplicações militares, em resposta a emergências, quer em redes de sensores móveis, assume-se sempre que: todos os nós se relacionam entre si, confiam entre si e partilham um objectivo comum na rede.

Por sua vez, as *oppnets* são formadas por grupos anónimos de dispositivos. Tal revela um impacto importante no encaminhamento de informação. Considerando a situação da figura 2.12, com três nós possíveis onde A encontra-se no mesmo alcance de transmissão que o nó B mas não se encontra no mesmo alcance de transmissão que o dispositivo C, e, por outro lado, o nó B encontra-se no mesmo alcance de transmissão que o nó C. Se porventura o nó A pretende comunicar com o nó C, toda a informação passará pelo nó B. Ora, se os nós não se conhecem levantam-se as seguintes questões:

- Porque razão o nó B está motivado a estabelecer a comunicação entre o nó A e C? Faz sentido ele accionar-se (e consumir a sua bateria) apenas para estabelecer a ponte entre dois nós (A e C)?
- Porque devem os nós A e C confiar no nó B para estabelecer a comunicação entre ambos? O nó B pode facilmente manipular ou simplesmente rejeitar a mensagem.

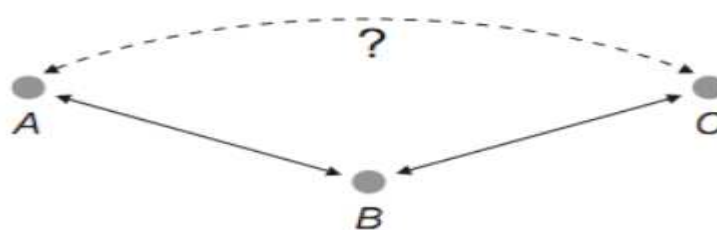


Figura 2.12 - Situação hipotética de transmissão de mensagens.

Até ao melhor estudo no âmbito desta dissertação, não é simples encontrar a resposta a estas questões. Contudo, os modelos mais recentes das Redes Oportunistas, propõem um esquema de comunicação *one-hop* onde a troca de mensagens entre nós é feita entre nós que se encontrem directamente conectados. Adicionalmente, são aplicadas técnicas de preservação da segurança das mensagens trocadas.

2.4.2 - Redes Oportunistas e Redes *Peer-to-Peer*

Os sistemas *Peer-to-Peer*, ou P2P, têm levantado elevado interesse nas comunicações [7]. Trata-se de arquitecturas de redes distribuídas onde os participantes partilham os seus próprios recursos de hardware. Essa partilha é necessária para fornecer diversas funcionalidades à rede. Os recursos são acessíveis entre si sendo que a comunicação entre dois dispositivos não necessita de passar por dispositivos intermédios.

O primeiro aspecto que as Redes Oportunistas e as redes *Peer-to-Peer* têm em comum é a integração das funcionalidades do cliente e do servidor num único nó ou *Peer*. O nó de uma Rede Oportunistas consome e publica informação. Contudo, a mobilidade dos nós não é ponderada nas redes P2P, pois o principal objectivo destas redes é partilhar recursos e mecanismos. Tal como as MANETs e as Redes Oportunistas, a conexão entre os dispositivos são definidas automaticamente, logo, são imprevisíveis. Identificar e alocar recursos são serviços partilhados por dois nós o que implica um comportamento cooperativo entre ambos.

Para redes P2P móveis, a partilha de recursos levanta questões em termos de incentivos, confiança e reconfiguração. Até ao momento da escrita desta dissertação, não existem definições coerentes que compreendam o comportamento das redes P2P Móveis, contudo a única concordância existente é em termos da mobilidade dos nós que contém dispositivos que permitem comunicação *Wireless*. A gama de aplicação de redes móveis P2P baseia-se em redes de telemóveis [8] e veículos com capacidade de comunicação sem fios [9].

2.5 - Principais tecnologias *Wireless* aplicadas

Nesta secção introduz-se as tecnologias de comunicação *Wireless* mais utilizadas no mercado, nomeadamente as que utilizam os *standards IEEE 802.11* [10], IEEE 802.15 [11] e IEEE 802.16. Estas tecnologias encontram-se actualmente integradas em dispositivos móveis *of-the-shelf* e estão disponíveis para Redes Oportunistas.

2.5.1 - IEEE 802.11

O *standard* IEEE 802.11 foca os dois níveis inferiores do modelo OSI: a camada física (PHY) e a camada de ligação de dados (MAC) e especifica as tecnologias WLAN. A família 802.11 inclui seis técnicas de modulação. As tecnologias mais populares são: IEEE 802.11a, IEEE 802.11b e IEEE 802.11g.

O *standard* IEEE 802.11b transmite na banda de frequência de 2.4GHz com taxa de transmissão de 11Mbps usando *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). O *standard* IEEE 802.11g, tal como o anterior, transmitem na banda de frequências 2.4GHz com taxa de transmissão de 54Mbps usando DSSS ou *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Por este motivo podem interferir entre si e mesmo com outras aplicações que utilizem a mesma banda de frequência: telefones, dispositivos *Bluetooth*, etc. Já o *standard* IEEE 802.11a utiliza a banda 5GHz e por isso não interfere com os dispositivos na banda 2.4GHz, por outro lado, possui taxa de transmissão de 54Mbps usando OFDM.

2.5.2 - IEEE 802.15.4

O *standard* IEEE 802.15 é tipicamente utilizado numa tecnologia WPAN. As mais utilizadas são: IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*), IEEE 802.15.3 (UWB) que especifica as camadas MAC e PHY

para altas taxas de transmissão (11-55Mbps) e IEEE 802.15.4 (ZigBee) especifica a camada PHY e MAC para baixa taxas de transmissão.

O *Bluetooth* consiste numa tecnologia de comunicação Wireless de forma segura desenvolvida para WPAN. Foi especificada pela cooperação *Bluetooth Special Interest Group* (SIG) estabelecida pela Sony Ericsson, IBM, Intel e Nokia em 1999. É uma tecnologia robusta, de baixo consumo e de custo reduzido. Cada dispositivo pode comunicar directamente com oito dispositivos. Pese embora seja uma tecnologia de baixo consumo, a durabilidade da bateria depende da bateria do dispositivo em que se encontra embebido. Por exemplo, o serviço *Bluetooth* dos telemóveis apenas pode ser prestando enquanto a sua bateria permitir que este dispositivo se encontre activo. Opera na banda não licenciada ISM de 2.4GHz a 2.485GHz num sinal *Full-duplex* à taxa nominal de 1600hops/sec. A tecnologia *Bluetooth* desenvolveu capacidade para reduzir a interferência entre as tecnologias Wireless que partilham o espectro de 2.4GHz. Em aplicações com Redes Oportunistas, a classe 2 do *Bluetooth* pode ser utilizada desde que a distância entre os dispositivos seja de aproximadamente 10m.

O UWB (*Ultra-Wideband*) consiste numa tecnologia Wireless que oferece um sistema de comunicação de banda larga suportando altas taxas de transferência de dados, vídeo digital e *streaming* de áudio. Foi lançada com o objectivo de substituir os fios de ligação de componentes electrónicos domésticos de alta-fidelidade que necessitam de transmissão superiores a 1Mbps e baixos consumos de potência. Baseia-se no standard IEEE 802.15.3, é uma tecnologia de curto alcance (até 70 metros) e de altas velocidades (até 55 Mbps). O standard IEEE 802.15.3 apenas especifica a camada física e MAC, enquanto O UWB preenche as camadas seguintes deixando a camada aplicação livre ao utilizador.

O standard IEEE 805.15.4 será detalhado no próximo capítulo.

2.5.3- IEEE 802.16

Para redes de grande alcance e alto débito existe o *standard* IEEE 802.16 (WiMAN) que consiste numa colecção de *standards* tipicamente utilizados numa tecnologia WMAN: IEEE 802.16a (WiMAX) e especifica as camadas PHY e MAC do modelo OSI.

Na tabela [2.1](#) pode-se comparar as características mais importantes no momento da escolha da tecnologia *Wireless*. Não obstante, a escolha da tecnologia que melhor se adequa à aplicação que se pretende realizar depende muito dos requisitos dessa mesma aplicação.

Assim, para ambientes que se enquadrem na descrição de redes WPAN (curta distancia, baixa taxa de transmissão) podemos utilizar as tecnologias *ZigBee*, *Bluetooth* e *Wibree* (englobando ambientes industriais e não industriais). No caso de redes WLAN, em que se requer taxa de transmissão e alcance superior às redes WPAN, aconselha-se a tecnologia *Wi-Fi* (801.11b e 802.11g). Para as redes WWAN, definidas pela necessidade de transmitir a longa distância e a elevada taxa de transmissão as tecnologias que melhor se adequam são claramente as tecnologias de comunicação móvel, por exemplo, GPRS, e ainda as tecnologias WiMAN e WiMAX definidas pelos *standards* IEEE 802.16.

Tabela 2.1 – Comparação das Tecnologias *Wireless*.

Standard	ZigBee/IEEE802.15.4	Bluetooth	IEEE802.11 b/g	UWB
Frequência de operação	868/915 MHz, 2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz	3.1-10.6 GHz
Distancia (m)	30-70+	10-30	30-100+	~10
Taxa	20/40/250kbps	1Mbps	2-54Mbps	100+Mbps
Numero de Dispositivos	255-65k	8	50-200	
Consumo	~1 mW	~40-100mW	~160mW-600W	~80-300 mW
Custo	~2-5	~4-5	~20-50	~5-10

Perspectiva-se que brevemente surjam soluções mais flexíveis, mais optimizadas para os recursos disponíveis, mais autónomos e, principalmente, mais baratas e massificadas no mercado, permitindo que de uma forma simples e quase imediata se consiga estabelecer comunicações entre os mais variados dispositivos.

2.6 - Sumário

As Redes Oportunistas são um tipo de Redes Móveis que, como tal, possuem um ou vários módulos móveis.

Apresentam alterações frequentes da sua topologia visto não necessitarem permanentemente dos mesmos módulos durante o seu ciclo de vida. Portanto, estas redes designam-se “oportunistas”, precisamente porque apenas admitem módulos associados à rede enquanto os seus recursos e serviços podem contribuir para o desempenho momentâneo da rede, caso contrário abandona o módulo que não está a ser útil.

Capítulo 3

Redes ZigBee

Os protocolos *Wi-Fi* e *Bluetooth* não foram equacionados para redes de sensores devido ao seu elevado consumo energético. O interesse por dispositivos de baixo consumo energético despoleta soluções de design para protocolos de redes de sensores *Wireless*. Para garantir a interoperabilidade dessas soluções, a utilização de um protocolo standard pode acelerar a utilização dessas redes.

Neste contexto surge o protocolo ZigBee/IEEE 802.15.4. As Redes *ZigBee* são um tipo de Redes *Wireless* dedicadas a baixa taxa de transmissão e curto alcance com base numa implementação simples e de baixo custo. A *ZigBee Alliance* consiste num grupo de empresas que uniformiza esta proposta garantido a interoperabilidade de vários fabricantes.

3.1 - Definição de Redes ZigBee

As redes ZigBee são conhecidas por usufruírem de módulos com uma electrónica simples, de baixo custo e baixo consumo (uma bateria poderá durar 1000 dias) permitindo grande escalabilidade e expansão, tornando esta tecnologia a ideal para sensores, controladores, monitorização remota e dispositivos electrónicos portáteis. A eficiente gestão de consumos de energia dos dispositivos ZigBee consegue-se através das rápidas operações de associação, troca de informação e da utilização do modo de poupança de energia *sleep*.

O protocolo *ZigBee* trata-se de um standard de *hardware* e *software* flexível que assenta sobre o IEEE 802.15.4 para baixa taxa de transmissão de dados e para dispositivos de baixo consumo energético. O standard IEEE 802.15.4 aparece muitas vezes ligado ao termo “*ZigBee*”, porém, não se trata do mesmo [19]. O IEEE 802.15.4 foi desenvolvido pelo IEEE e define a camada física (PHY) e a camada de ligação de dados (MAC), conforme é visível na figura 3.1. Por sua vez, o *ZigBee* é o primeiro protocolo sobre o standard IEEE 802.15.4 adicionando à camada de rede a possibilidade de criar redes *Mesh*, *multi-hop* ou *Peer-to-Peer*, opções de segurança e a camada de aplicação para estabelecer a interoperabilidade de

perfis de aplicação. A tecnologia *ZigBee* permite uma excelente área de cobertura, com ligações rádio robustas. Os dados são modulados na portadora de rádio, podendo existir múltiplas portadoras no mesmo ambiente de monitorização sem que no entanto estas interfiram entre si. Para extrair dados cada receptor sintoniza uma frequência específica e rejeita todas aquelas que sejam diferentes dessa frequência.



Figura 3.1 - Pilha Protocolar IEEE 802.15.4/*ZigBee*.

3.2 - IEEE 802.15.4

O *standard* IEEE 802.15.4 especifica uma tecnologia de acesso sem fios semelhante ao *Bluetooth* numa perspectiva de redes pessoais (PAN) e redes domésticas (HAN), de sensores e dispositivos alimentados por baterias.

Este *standard* especifica a camada física PHY e a sub-camada MAC. O protocolo IEEE 802.15.4 foi recentemente adoptado como um *standard* de comunicação LR-WPAN (*Low Rate Wireless Local Area Networks*) bastante flexível para diferentes requisitos das WSN [16]. O sucesso desta tecnologia revela-se na baixa taxa de transmissão, reduzido consumo de energia e custo. O consumo de energia é um ponto crítico no design destas redes.

A camada MAC especificada no IEEE 802.15.4 tem a capacidade de trabalhar com *duty-cycles* entre os 100% aos 0.1% o que é muito importante nas redes de sensores sem fios onde o consumo de energia e a durabilidade dos equipamentos da rede são a principal preocupação.

Este protocolo também implica requisitos de tempo real através do mecanismo GTS (*Guaranteed-Time Slot*). Este mecanismo fornece um serviço mínimo garantido para os módulos correspondentes o que permite a previsão do comportamento de pior caso para cada módulo da aplicação. Este protocolo está muito associado ao protocolo ZigBee (*ZigBee Alliance*). Na realidade esta organização vai assegurar a interoperabilidade entre a pilha protocolar IEEE 802.15.4/ZigBee [17].

A especificação IEEE 802.15.4/ZigBee distingue dois dispositivos lógicos: FFD (*Full Function Device*) e o RFD (*Reduced Function Device*). O IEEE 802.15.4 FFD tem a capacidade de cumprir todas as funcionalidades da rede entre as quais tornar-se o PAN *Coordinator* ou apenas associar-se a algum já existente. O IEEE 802.15.4 RFD cumpre funções mínimas na rede e apenas envia ou recebe dados do PAN *Coordinator* ao qual se encontra associado.

O PAN *Coordinator* é o controlador principal da rede com identificadores de rede (PAN ID) aos quais os restantes nós da rede estão associados. Estes dispositivos fornecem ainda a sincronização de toda a rede e responsabilizam-se pela gestão da manutenção da rede e pela gestão dos restantes dispositivos.

3.2.1- Camada Física (PHY)

O *standard* IEEE 802.15.4, conforme disposto na figura [3.3](#), define as duas camadas inferiores do modelo OSI. São elas a Camada Física (PHY) e a Camada de Ligação de Dados (MAC). A camada PHY é responsável pelas seguintes tarefas:

- Transmissão e recepção de informação;
- Prevenção de colisões (Mecanismo CSMA/CA);
- Activação e desactivação do *transceiver*;
- Detecção de energia do canal actual;
- Selecção da frequência do canal;
- LQI para recepção de pacotes.

Para tal baseia-se em três bandas de frequência de operação com 27 canais *radio*. As três bandas são: 868MHz, 915MHz e 2.4GHz.

No canal 0 compreende-se frequências entre os 868.0 MHz e os 868.6 MHz com uma taxa de transmissão de 20kbps. Do canal 1 ao canal 10 utilizam-se frequências compreendidas entre 902.0 MHz e 928.0 MHz com uma taxa de transmissão de 40kbps. Finalmente, do canal 11 ao canal 26 utilizam-se frequências entre 2.4 GHz e 2.4835 GHz com uma taxa de transmissão de 250kbps, figura [3.2](#). Os canais 0 a 10 são modulados através do método BPSK e os canais 11 a 26 modulados através de QPSK. Ambos os conjuntos de canais transmitem para

um raio de 10m a 75m e tendo em conta a baixa taxa de transmissão as tramas estão limitados a 127bytes.

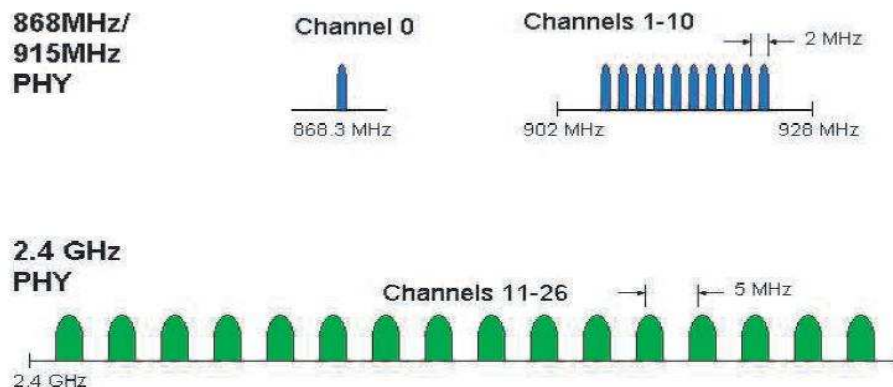


Figura 3.2 - Canais IEEE 802.15.4.

3.2.2- Camada de Ligação de Dados (MAC)

Na especificação *IEEE 802.15.4* a camada de ligação de dados está dividida em duas sub-camadas: *Logical Link Control (LLC)* e *Medium Access Control (MAC)* [16].

A sub-camada LLC segue a especificação IEEE 802.2. A sub-camada MAC gere as tramas, controla o acesso aos canais, valida as tramas e envia *acknowledgements*. Por outro lado, suporta operações de baixo consumo e mecanismos de segurança.

Existem dois modos de operação que devem ser seleccionados pelo *PAN Coordinator*: *non-beacon-enabled* em que a camada MAC é simplesmente regulada pelo *non-slotted CSMA/CA*; e *beacon-enabled-mode* onde os *beacons* são periodicamente enviados pelo *PAN Coordinator* para sincronizar os nós associados e para identificar o PAN ID.

No modo *beacon-enabled* as *beacon frames* são enviadas periodicamente para sincronizar os nós que estão associados na rede. O *beacon interval* determina o tempo entre duas *beacon frames* consecutivas.

3.2.3- Estrutura das *frames* PHY e MAC

No protocolo *IEEE 802.15.4* é o *PAN Coordinator* que define a estrutura da trama (*Superframe*). O comprimento da *frame* é igual ao intervalo de tempo entre dois *beacons* adjacentes enviados pelo *Coordinator* e pode ser dividida numa parte activa e noutra parte inactiva. A parte activa consiste em 16 slots de igual comprimento. O *Coordinator* e os restantes dispositivos da rede podem trocar pacotes durante a parte activa e vão para o modo *sleep* durante a parte inactiva. Os *beacons* são usados para iniciar tramas, sincronizar com outros dispositivos, anunciar a existência de PAN e informar sobre a existência de informação pendente no coordenador. A figura 3.3 apresenta esta estrutura.

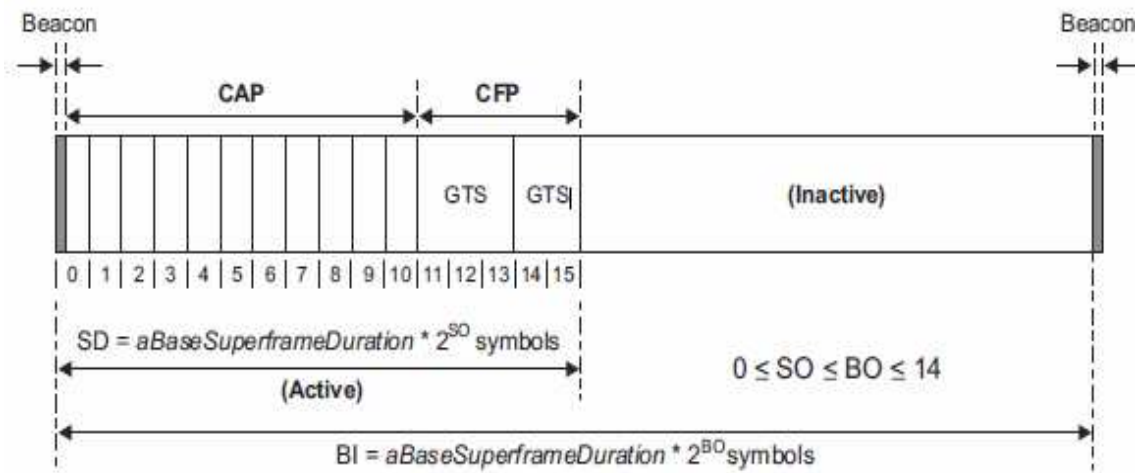


Figura 3.3 - Estrutura da trama da camada MAC.

Mecanismos CSMA/CA

Existem duas formas de aceder aos canais especificadas pelo protocolo *IEEE 802.15.4*: *unslotted CSMA/CA* e *slotted CSMA/CA*.

Numa operação *unslotted CSMA/CA* o dispositivo que contém a informação ou o comando a ser transmitido vai esperar um determinado tempo aleatório. Após esse tempo se o meio estiver livre o dispositivo poderá transmitir a *frame*. Caso contrário, o dispositivo incrementa a sua janela e espera um novo período aleatório.

A operação *slotted CSMA/CA* depende da estrutura da *frame* que pode ser dividida em *slots* mais pequenos designados por *backoff periods*. O início da transmissão do primeiro *backoff period* coincide com o início da transmissão do *beacon*. Depois da transmissão o dispositivo calcula um número aleatório de *backoff periods*. Se o canal estiver livre o dispositivo pode começar a transmitir a *frame* para o *Coordinator*. Se o canal estiver ocupado o dispositivo deve recalculer a sua janela de transmissão e aguardar um novo período aleatório.

Processo de Associação e Desassociação

Um dispositivo que pretenda fazer parte de uma PAN terá de se associar a um PAN *Coordinator*.

No início o dispositivo analisa os canais no sentido de encontrar um potencial *Coordinator*. Após escolher um *Coordinator* o dispositivo deve alocar o *beacon Coordinator* e transmitir o comando de pedido de associação ao *Coordinator*. Ao receber o pedido de associação o *Coordinator* deve enviar um *acknowledgement* ao dispositivo. Porém, o recebimento desse ACK não significa que o dispositivo esteja correctamente associado à rede.

O dispositivo tem ainda que esperar ser associado à rede enquanto o *Coordinator* analisa os seus recursos para determinar se deve aceitar o pedido. Segundo o protocolo *IEEE 805.15.4*, o *Coordinator* responde ao pedido de associação anexando a resposta no *long*

address da *beacon frame*. Se o dispositivo encontrar o seu endereço anexado na *frame*, então envia um pedido de associação ao *Coordinator* para adquirir o resultado da associação.

Quando o *Coordinator* deseja que um determinado dispositivo deixe a PAN ele envia um comando de desassociação que notifica o dispositivo que será desassociado. Depois de receber esse comando o dispositivo responde com um ACK. Se o ACK não for recebido pelo *Coordinator*, este assume que o dispositivo já estará desassociado.

Quando um dispositivo deseja deixar a PAN, envia um comando ao *Coordinator* que notifica a sua vontade de sair. Ao receber esse comando o *Coordinator* envia um ACK e remove o endereço desse dispositivo. Tal como no caso anterior, o dispositivo considera-se desassociado da PAN no caso de não receber um ACK por parte do *Coordinator*.

3.3 - ZigBee Alliance

A *ZigBee Alliance* é uma organização cuja missão é definir, monitorizar e controlar produtos fiáveis, de baixo custo e consumo completando o *Standard* IEEE 805.15.4 com base num padrão aberto e global. São especificadas as camadas de rede e de aplicação tal como o serviço de segurança entre elas oferecendo:

- Camada superior da pilha protocolar e respectivos perfis de aplicação;
- Conformidade e testes de certificação;
- Reconhecida interoperabilidade entre agentes de mercado.

Esta aliança tem crescido rapidamente nos últimos anos e já conta com mais de 300 participantes dos quais se destacam os principais líderes da indústria moderna que se comprometem em desenvolver produtos e soluções em concordância com o protocolo *ZigBee*, figura [3.4](#).

Os membros da *ZigBee Alliance* têm criado um *standard* de redes *Wireless* oferecendo um extraordinário controlo, expansibilidade, segurança, simplicidade de utilização e capacidade de adaptação da tecnologia *ZigBee* em qualquer parte do mundo. Hoje em dia as organizações recorrem ao *ZigBee* para criar soluções em variadíssimas áreas como por exemplo dispositivos de Controlo Electrónico, Gestão de Energia e Eficiência, automatização de casas e centros comerciais e ainda planeamento industrial.



Figura 3.4 - Alguns promotores e participantes da ZigBee Alliance.

3.4 - Topologia de Redes ZigBee

Partindo dos conceitos de IEEE 802.15.4 FFD e IEEE 802.15.4 RFD, a especificação ZigBee aponta três dispositivos:

- *ZigBee Coordinator*;
- *ZigBee End-Device*;
- *ZigBee Router*.

O *ZigBee Coordinator* consiste num dispositivo FFD responsável por iniciar a rede. Assim que inicia uma rede aloca uma tabela de endereçamentos de rede que irão permitir adicionar novos dispositivos bem como manter a tabela de *bindings*. O *ZigBee Coordinator* também permite o encaminhamento de mensagens entre os diferentes dispositivos da rede.

O *ZigBee End-Device* faz a interface física com os sensores e/ou actuadores da rede e pode ser representado por um FFD ou RFD dependendo da aplicação.

Por último, o *ZigBee Router* é um dispositivo opcional na rede. É representado por um dispositivo FFD e permite uma expansão física da rede, isto é, permite que a rede tenha uma

maior cobertura geográfica através da simples distribuição geográfica de dispositivos deste tipo.

Conjugando os diferentes dispositivos constrói-se uma rede *ZigBee* que poderá ter as seguintes topologias: *Star*, *Mesh* ou *Cluster-Tree*, figura [3.5](#).

Na topologia *Star* apenas um nó trabalha como *PAN Coordinator*. É uma topologia centralizada em que o *PAN Coordinator* terá de ser auto-suficiente e não deve ser utilizada nas tradicionais *Wireless Sensor Networks* por duas razões: primeiro porque os dispositivos destinados a *PAN Coordinator* terão um grande consumo de energia e segundo porque a cobertura do *IEEE 802.15.4* é muito limitada quando se está a endereçar os vários elementos da rede. É o *PAN Coordinator* quem controla a entrada e a saída de dispositivos da rede e é por ele que passa toda a comunicação da rede. Esta topologia tem a vantagem de facilitar a sincronização dos vários dispositivos e de suportar operações de baixo consumo de energia. Apresenta também uma baixa latência mas servem apenas para aplicações de curta escala, isto é, é útil apenas para aplicações muito simples e de curto alcance.

Por sua vez, a topologia *Mesh* é mais robusta que a topologia *Star*. Tal como na anterior, é o *PAN Coordinator* quem controla as entradas e saídas da rede e trata-se de uma topologia descentralizada onde cada nó comunica directamente com os restantes nós da rede dentro da gama *radio* de interesse. É também uma topologia muito flexível tendo em conta que permite comunicações robustas entre dispositivos e ao mesmo tempo inclui uma latência reduzida. As suas principais limitações são o facto de não suportar o modo *sleep* e possuírem custos associados ao encaminhamento de informação visto necessitar de construir e actualizar uma tabela de endereçamentos entre os diferentes dispositivos da rede.

Por último, a topologia *Cluster-Tree*, trata-se de um caso particular da topologia *Mesh* com as vantagens de permitir uma redução dos custos de encaminhamento e permitir modo de poupança de energia ao mesmo tempo que possibilita que os dispositivos comuniquem directamente entre si. Contudo fica limitada pelos custos associados à reconfiguração da tabela de endereçamentos e ao facto de possuir uma latência um pouco superior à topologia *Star*.

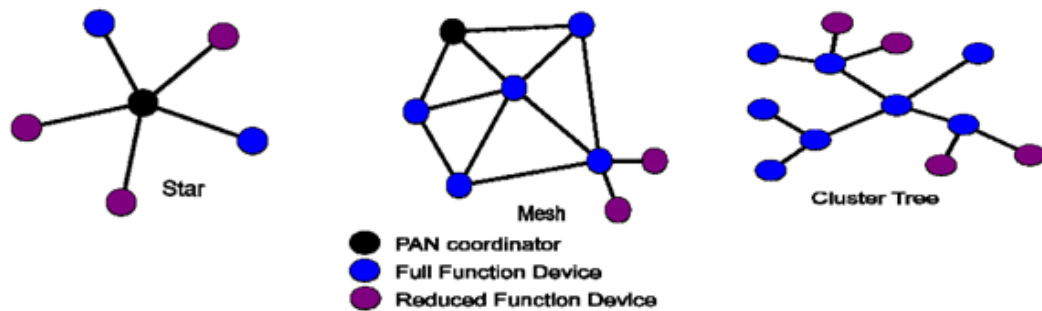


Figura 3.5 - Topologias de redes ZigBee/IEEE 802.15.

3.5 - Segurança de Redes ZigBee

O serviço de segurança ZigBee está especificado através do uso de:

- *Key establishment;*
- *Key transport;*
- *Frame Protection;*
- *Device authorization.*

A segurança ZigBee baseia-se em chaves simétricas, isto é, numa transacção com protecção entre dois nós, tanto o nó de origem como o destinatário devem partilhar a mesma chave. Existem três métodos para que os dois dispositivos partilhem a mesma chave:

- Pré-Instalação: quando as chaves são colocadas nos dispositivos usando o método *out-of-band* (ferramentas de comissionamento);
- Transporte: quando o dispositivo “*Trust Center*” envia a chave para os restantes dispositivo;
- Estabelecimento: quando o dispositivo negocia com o dispositivo “*Trust Center*” e as chaves são estabelecidas.

Estes métodos são “*open trust*” em que as camadas da pilha protocolar confiam entre si. Contudo, apenas é razoável para o tipo de dispositivos ZigBee em que um microcontrolador implementa ligações *Wireless* executando a pilha inteira num único CPU. Desta forma, a criptografia deve ser implementada para a protecção de dados quando se utiliza mais do que um dispositivo. Para que a rede funcione com segurança um dispositivo deve ter um

dispositivo de confiança ao qual irá obter a sua chave de acesso. Este dispositivo de confiança é também responsável pelo controlo de acesso. Deste modo o “*Trust Center*” atribui chaves de acesso á rede, utiliza os serviços de segurança para configurar os dispositivos com a chave correcta e autoriza a entrada do dispositivo na rede. Normalmente quem assume o papel de “*Trust Center*” é precisamente o *ZigBee Coordinator*.

No que à segurança diz respeito, permite-se a autenticação e encriptação da rede e da camada de aplicação, *Symmetric Key* com AES-128 e ainda *Key Hierarchy* com *Master Keys*, *Link Keys* e *Network Keys*.

Uma *Master Key* é unicamente partilhada por dois dispositivos para proteger as *frames* da camada ASP. Um desses dois dispositivos será o *Trust Center*. Estas chaves podem ser estabelecidas de forma dinâmica usando os serviços de estabelecimento ou ainda através da pré-instalação ou transporte do *Trust Center* para o dispositivo em questão.

Uma *Network Key* trata-se de uma chave global que é utilizada por todos os dispositivos da rede. Um conjunto de chaves de rede é mantida pelo *Trust Center* e a chave de rede actual é identificada por um número de sequência de chaves. O método normalmente implementado é o transporte mas podem também ser pré-instaladas. Existem duas formas de actualizar as chaves: actualização da chave e associação a um novo número de sequência; comutar para o novo número de sequência.

3.6 - Encriptação e Protecção de Integridade

A encriptação esconde a informação original do texto e previne o acesso indevido à informação que se pretende manter inviolável. O mecanismo de criptografia fornece os seguintes serviços de segurança:

- **Confidencialidade de informação:** permite que a informação possa ser lida apenas pelos nós de destino pretendidos;
- **Autenticidade de Informação:** assegura que o destinatário da informação conheça o nó que enviou essa informação e verifica se a mesma não fora modificada durante a transmissão;
- **Reply Protection:** para assegurar que uma transmissão segura não possa ser simplesmente repetida por um dispositivo intruso durante a transmissão.

A protecção de integridade associa uma mensagem de integridade conhecida como *Message Integrity Code* (MIC) que será transportada juntamente com a informação a ser protegida. Esse acompanhamento permite no destino verificar se a informação recebida sofreu um acesso indevido ou não. A MIC está associada ao endereço IEEE do nó de origem para, deste modo, manter a sua autenticidade original. Sem protecção de autenticidade um

dispositivo malicioso pode modificar uma *frame* transmitida e essas modificações podem não ser detectadas pelo receptor/destinatário.

3.7 - Microchip Stack for ZigBee Protocol

A *Microchip* é membro da organização *ZigBee Alliance* pelo que oferece a *Microchip Stack for ZigBee Protocol* aos seus membros para um desenvolvimento harmonioso de aplicações [21]. Trata-se de uma pilha protocolar que ao ser utilizada vai garantir a interoperabilidade com produtos e soluções de outros fabricantes. Desta forma, o código desenvolvido torna-se portátil.

No momento da redacção desta dissertação, a versão actual correspondia à v1.0-3.8 oferecendo os seguintes recursos:

- Suporte para a utilização da banda de frequência de 2.4GHz;
- Suporte para todo o tipo de dispositivos possíveis do protocolo *ZigBee* (*Coordinator*, *Routers* e dispositivos *End Device*).
- Permite o armazenamento não volátil de tabelas e dados obrigatórios.
- Portabilidade para microcontroladores PIC18;
- RTOS e aplicações independentes;
- Suporte a *Out-of-box* para Microchip MPLAB C18;
- Alinha a nomenclatura padrão com a nomenclatura utilizada no protocolo *ZigBee* e especificação IEEE 802.15.4.

3.7.1 -Arquitectura *ZigBee Protocol Profile*

O protocolo *ZigBee* define as seguintes terminologias: *Profile*, *Attribute* e *Cluster*.

Um *Profile ZigBee* consiste na descrição dos dispositivos lógicos utilizados na aplicação e da forma como eles interagem entre si, isto é, da interface entre os diferentes dispositivos lógicos. Por sua vez, um *Attribute* consiste na informação que pode ser trocada entre os dispositivos cada um dos quais distinguidos por identificador único. Um *Cluster* consiste no conjunto de *Attributes* que se distinguem por um identificador único. Note-se que um *Profile* é distinguido ao nível dos *Clusters* e nunca ao nível dos *Attributes*, de maneira que, é o *Profile* que define o identificador dos *Attributes* e dos *Clusters*.

A *Microchip Stack for ZigBee Protocol* oferece o suporte para os *Profiles* a serem implementados através de um *header* que contém:

- ID do *profile*;
- ID e versão dos dispositivos;
- ID dos *clusters*;
- ID dos *attributes*;

- *Attributes* e tipos de dados.

A figura 3.6 apresenta a *ZigBee Protocol Stack* que se encontra programada em C e pronta a executar em microcontroladores PIC dos quais utiliza a memória flash interna para guardar parâmetros tais como o endereço MAC do dispositivo. A *ZigBee Alliance* é responsável pela camada de rede NWK e de aplicações APS que se implementam sobre as camadas PHY e MAC definida pela especificação IEEE 802.15.4. A camada de rede NWK é responsável pela formação da rede, endereçamento dos nós e pesquisa de novos nós a adicionar à rede.

A camada de aplicação é constituída por três sub-camadas: *Framework Application*, *ZigBee Device Object* (ZDO) e a *Application Sub Layer* (APS). A *Framework Application* é responsável pelo mapeamento dos nós vizinhos a fim de facilitar a interacção entre eles; os ZDO permitem a descoberta de novos elementos na rede e trata dos serviços por eles implementados; finalmente a APS é responsável pelo encaminhamento da informação entre os APO's e do ZDO para a camada inferior.

Para ter acesso às configurações da *Stack* utiliza-se o software Zena™. Basta para tal configurar o *ZigBee Device*, *Transceivers*, *Endpoints*, *Security*, ZDO, APS, NWK/MAC e PIC que o software automaticamente gera ficheiros com configurações que serão extremamente úteis na implementação da rede [21].

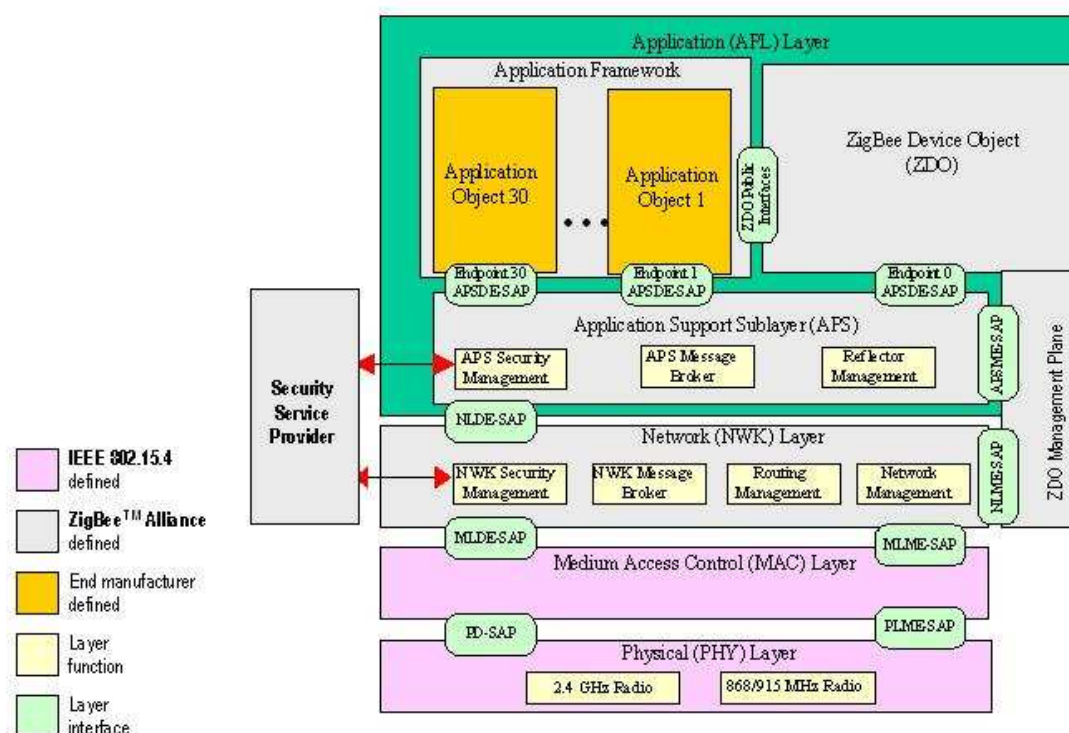


Figura 3.6 - Microchip Stack for ZigBee Protocol.

3.8 - Sumário

As redes ZigBee inserem-se num tipo de redes Wireless classificadas como WLAN. São úteis para o desenvolvimento de aplicações de baixo custo, baixo consumo energético e baixo

débito de informação. A sua simplicidade permite desenvolver aplicações elegantes através da dispersão de módulos de dimensões reduzidas, baixo consumo e fácil montagem.

Permite diferentes topologias de redes, facilmente configuráveis. Tomando partido das vantagens que as Redes ZigBee oferecem poder-se-á cumprir os objectivos propostos desta dissertação.

Capítulo 4

Análise de Requisitos

Neste capítulo apresenta-se a Análise de Requisitos do sistema de monitorização da qualidade do ar proposto começando por um enquadramento geral dos vários subsistemas envolvidos na solução.

4.1- Enquadramento geral

Pretende-se desenvolver um sistema de monitorização da qualidade do ar de uma cidade utilizando de forma oportunista a sua infra-estrutura de transportes públicos. A transferência de dados entre os vários elementos dessa infra-estrutura será realizada através de Redes Sem Fios.

Os principais elementos que constituem uma infra-estrutura de transportes públicos são os Autocarros e as Paragens. As Paragens distribuem-se geograficamente na planta de uma cidade onde os Autocarros realizam um itinerário aproximando-se e imobilizando-se junto de algumas paragens, figura [4.1](#). Desta forma, a infra-estrutura de transportes públicos apresenta uma área de cobertura geográfica alargada. Na figura [4.2](#) exemplifica-se a infra-estrutura de transportes públicos da cidade do Porto.

Um sistema de Monitorização da Qualidade do Ar é constituído por uma ou várias Estações de Monitorização do Ar que contêm sensores de agentes meteorológicos ou de poluição atmosférica, tal como exemplificado na figura [4.3](#). Em geral, os agentes meteorológicos e/ou atmosféricos não apresentam grande variação ao longo do tempo e não são notáveis diferenças significativas entre pontos geograficamente próximos. Deste modo, interessa dispersar Estações de Monitorização do Ar por diferentes pontos da cidade para futuro processamento. Para o efeito, pode-se aproveitar a distribuição geográfica de algumas Paragens para instalar Estações de Monitorização do Ar, figura [4.4](#).

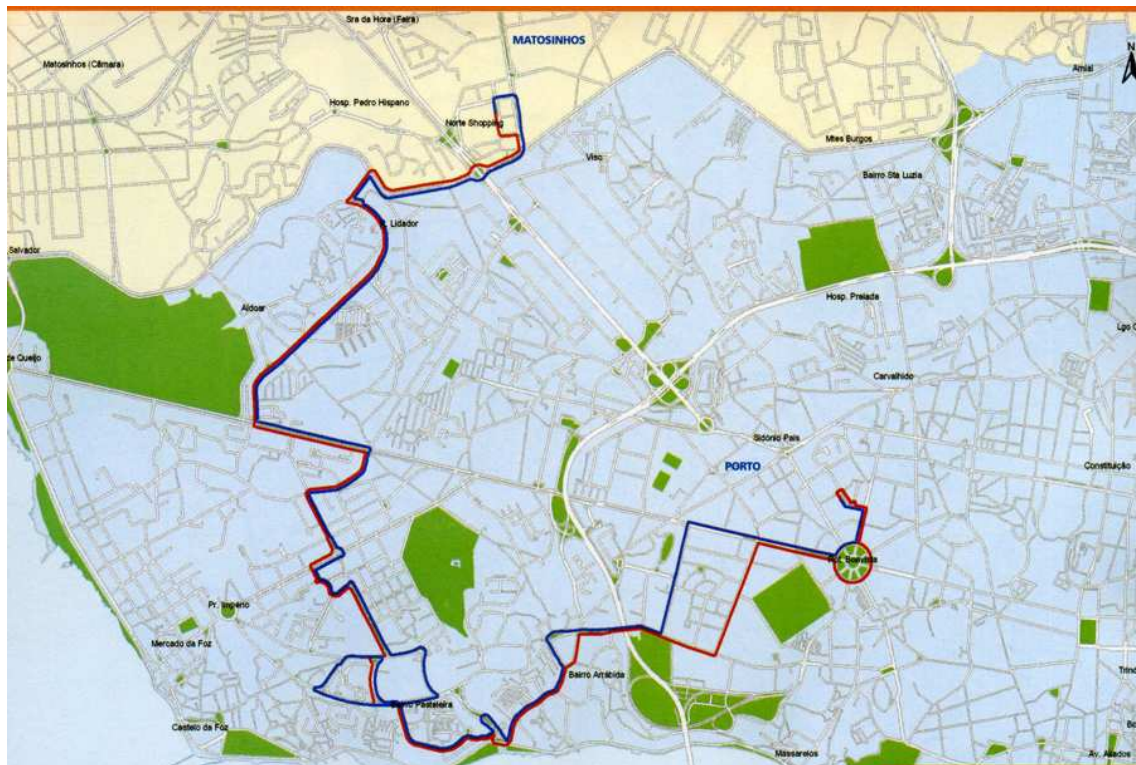


Figura 4.1 - Itinerário de Autocarros ao longo da cidade do Porto.



Figura 4.2 - Infra-estrutura de transportes públicos na Baixa da cidade do Porto.

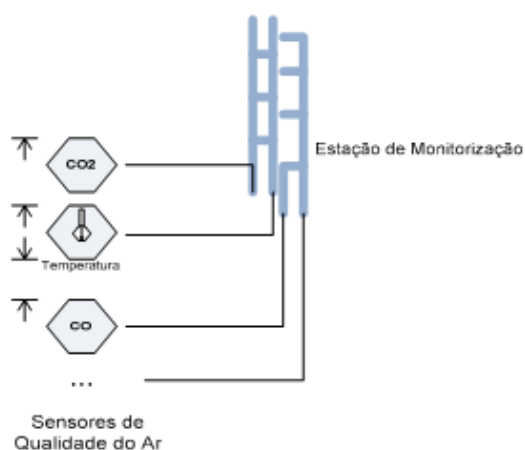


Figura 4.3 - Protótipo de Estação de Monitorização do Ar.



Figura 4.4 - Distribuição de Estações de Monitorização do Ar.

No âmbito desta dissertação, não se pretende que o processamento da qualidade do ar se realize localmente mas sim numa estação de processamento de dados remota. Portanto, de alguma forma é necessário encaminhar a informação das Paragens para uma Estação de Processamento Central, as quais podem-se encontrar geograficamente muito distantes. Neste sentido, aproveita-se a mobilidade dos Autocarros para que estes à medida que fazem o seu percurso pela cidade recolham os dados de cada Estação de Monitorização do Ar quando se aproxima da respectiva Paragem e armazena-os até chegar à estação de processamento central (por exemplo, no Terminal de Autocarros). Aí os dados são transferidos para uma aplicação de processamento. Este conceito mostra o carácter oportunista da utilização da infra-estrutura de transportes públicos.

O Terminal de Autocarros, figura 4.6, é entendido como o local onde os Autocarros finalizam o seu percurso e/ou repousam no intervalo entre turnos ou itinerários. É o local onde estes podem ser configurados com um novo percurso. Neste contexto, aproveita-se este ponto geográfico comum a todos os veículos para se instalar uma Estação de Processamento Central dedicada à recolha dos dados armazenados e transportados por cada Autocarro.



Figura 4.5 - Autocarro imobilizado junto a Paragem [26].



Figura 4.6 - Exemplo de Terminal de Autocarros.

4.2- Análise de Requisitos

4.2.1- Estação de Processamento Central

A Estação de Processamento Central, situada no Terminal de Autocarros, deve possuir dispositivos com capacidade de recolher os dados armazenados nos Autocarros para processamento futuro e de configurar os Autocarros com um novo itinerário.

Deve identificar todos os Autocarros destinados a “repositórios de informação” para ser mais simples associar a informação recolhida a um conjunto de Paragens. Para tanto, a Estação de Processamento Central também deve identificar todas as Paragens onde existam Estações de Monitorização do Ar para lhes fazer corresponder uma posição geográfica na cidade. Como podem existir diferentes Estações de Monitorização do ar distribuídas pela cidade, isto é, com diferente número e tipo de sensores, a Estação de Processamento Central deve identificar todos os sensores quanto ao seu tipo de sensor e gama de conversão aplicável. Com estes requisitos a Estação de Processamento é capaz de recolher a informação armazenada nos Autocarros, e associar cada leitura a um agente de qualidade do ar e à respectiva posição geográfica.

Finalmente, a Estação de Processamento Central deve configurar o itinerário dos Autocarros atribuindo-lhe um conjunto de Paragens que devem ser visitadas para a recolha de informação de qualidade do ar.

4.2.2- Autocarro

A recolha e transporte de dados ficam a cargo dos Autocarros que devem conter dispositivos de comunicação que permitam transferir dados com as Paragens.

Cada Autocarro deve possuir um identificador único de modo a ser identificado pela Estação de Processamento Central que os configura com um itinerário a ser realizado pela cidade. Esse itinerário deve consistir num conjunto de Paragens destinados à recolha de dados.

O Autocarro deve distinguir quais são as Paragens e qual a Estação de Processamento Central para que ao realizar o seu percurso pela cidade recolha informação apenas das Paragens com que foi configurado e transportar essa informação até serem recolhidos pela Estação de Processamento Central.

O percurso de um Autocarro apresenta algumas imprevisibilidades associadas a situações de trânsito nas estradas especialmente a necessidade do Autocarro realizar inversão do sentido de marcha ou marcha atrás nas imediações de uma Paragem da qual já tenha recolhido informação recentemente. Por outro lado, pode também ter de realizar espera prolongada junto de uma Paragem. Deste modo, o Autocarro deve evitar realizar recolhas consecutivas da mesma Paragem com vista a realizar uma eficiente gestão do armazenamento de dados.

Ao nível das comunicações entre os Autocarros e as Paragens estas devem ser simples e imediatas. Caso se verifique uma falha de comunicação enquanto se encontravam a trocar informação a operação deve ser imediatamente cancelada visto o veículo poder iniciar a sua marcha. É certo que os dados trocados não são críticos ao ponto de exigirem tais medidas, contudo o sistema fica mais robusto e portátil para dados de natureza mais crítica.

No caso das comunicações entre o Autocarro e a Estação de Processamento Central estas devem ser repetidas em caso de falhas. Assim, Autocarro não deve iniciar um novo itinerário sem antes depositar a totalidade dos dados recolhidos no itinerário anterior.

4.2.3- Estações de Monitorização do Ar

As Estações de Monitorização do Ar, localizadas nas Paragens, devem possuir uma identificação única para serem distinguidas quer pelos Autocarros quer pela Estação de Processamento Central.

As Estações de Monitorização do ar distribuídas pela cidade podem diferir no número e no tipo de sensores de qualidade do ar. Em todas elas deve-se adquirir e armazenar periodicamente a leitura proveniente dos sensores com vista a produzir um histórico de leituras. Como a natureza dos dados de qualidade do ar não apresenta grande variação ao longo do tempo, pode-se correr o risco de adquirir amostras repetitivas entre aquisições muito próximas e, por outro lado, gerar históricos de leituras mais extensos. Portanto, a frequência de aquisição e armazenamento deve ser relativamente baixa. A leitura dos sensores de forma periódica vai facilitar o processamento do histórico de leituras na Estação de Processamento Central.

O histórico de leituras deve ser mantido na Paragem até que um Autocarro os solicite. No final da recolha deve ser libertado espaço para o armazenamento de novas aquisições.

4.3- Sumário

Neste capítulo apresentaram-se os requisitos do sistema de monitorização da qualidade do ar integrado na infra-estrutura de transportes públicos de uma cidade. Estudou-se o funcionamento de uma infra-estrutura de transportes públicos de forma a identificar os principais aspectos para a integração do sistema de monitorização de qualidade do ar.

Capítulo 5

Arquitectura da Solução

Neste capítulo apresenta-se a Arquitectura da Solução proposta para o sistema em estudo com base na Análise de Requisitos do capítulo anterior. A implementação da Estação de Processamento Central está fora do âmbito desta dissertação mas apesar disso será feita uma referência às funções que esta deveria implementar.

5.1- Apresentação da proposta

A Estação de Processamento Central de dados localiza-se no Terminal de Autocarros sendo constituída por plataformas com capacidade de recolher a informação dos veículos e processar essa mesma informação. A Recolha e Transporte da Informação fica a cargo dos Autocarros devido à sua mobilidade. Para tal, os veículos devem conter plataformas capazes de recolher, armazenar e transportar informação até à Estação de Processamento Central. A Aquisição de dados é uma função das Paragens que contenham uma Estação de Monitorização do Ar. As Estações de Monitorização do Ar são compostas por um conjunto de sensores que monitorizam a qualidade do ar que serão lidos periodicamente e armazenados nas plataformas existentes nas Paragens que também são capazes de comunicar com os Autocarros.

As transferências de dados entre os vários elementos (Estação de Processamento Central, Autocarros e Paragens) são realizadas recorrendo a uma rede Zigbee. Esta rede, para além de ser uma rede sem-fios de baixo consumo, são pensadas para aplicações de curta distância e baixa taxa de transmissão de dados. Os módulos de uma Rede ZigBee distinguem-se em ZigBee *Coordinator* e em ZigBee RFD.

Como os Autocarros atravessam vários pontos geográficos, aproximam-se de Paragens iniciando a troca de dados e requer funcionalidades complexas da rede ZigBee, as suas plataformas são configurados como ZigBee *Coordinator*. As plataformas das Paragens bem

como as da Estação de Processamento central por se encontrarem dispersas entre si e apresentarem acções mínimas para a rede, são configuradas como ZigBee RFD.

Detalhes relativos às características das plataformas de implementação apresentam-se na secção 5.5. Na figura 5.1 apresenta-se um esquema geral da arquitectura da solução.

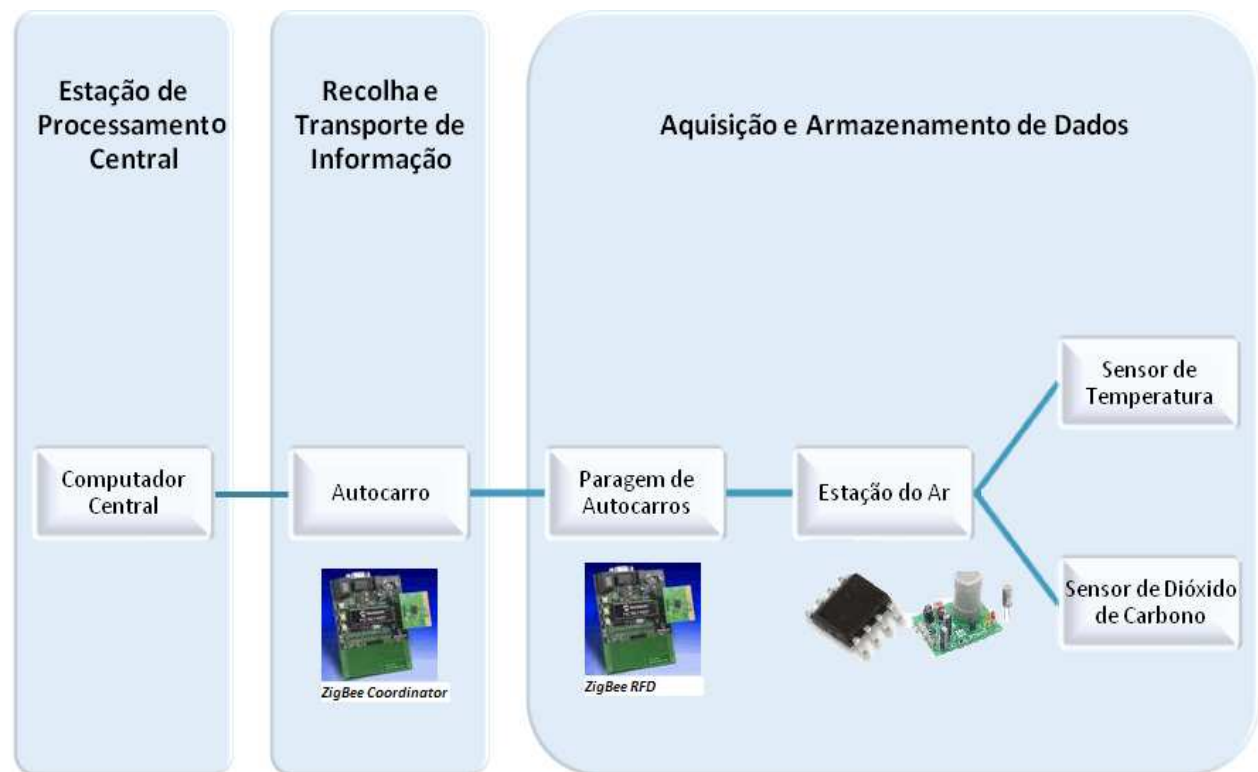


Figura 5.1 - Integração da solução na infra-estrutura de transporte.

Na figura 5.2 apresenta-se o Modelo Entidade-Associação da solução com vista a favorecer a análise de requisitos discutida no capítulo anterior.

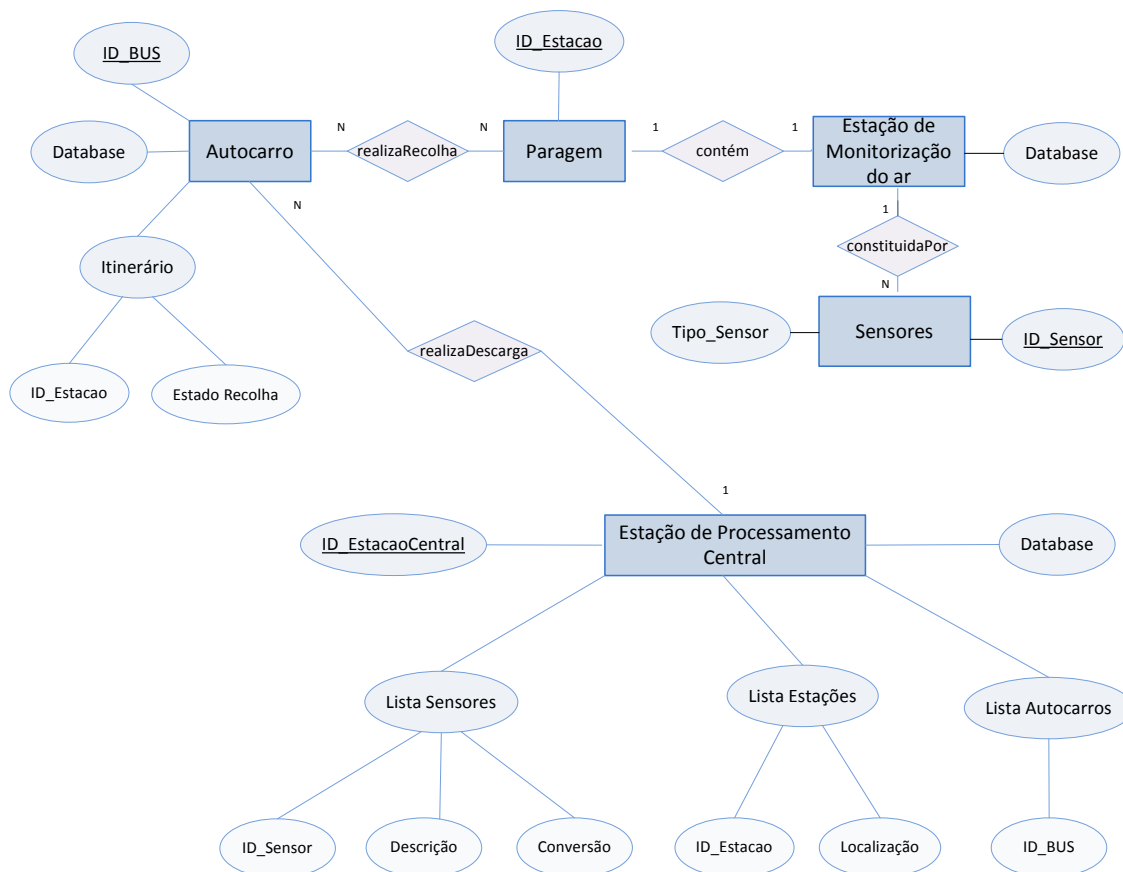


Figura 5.2 - Modelo Entidade Associação da solução.

Como é perceptível na figura 5.2, vários Autocarros realizam recolha de várias Paragens de Autocarro desde que estas possuam uma Estação de Monitorização do ar. Por outro lado, a Estação de Processamento Central recolhe os dados armazenados do Autocarro. Os atributos de cada Entidade serão discutidos nas secções seguintes.

5.2- Estação de Processamento Central

A implementação da Estação de Processamento Central está fora do âmbito desta dissertação. Contudo, é descritas as funções que esta deveria implementar.

A Estação de Processamento Central, figura 5.3, desempenha dois papéis fundamentais neste sistema: processamento dos dados recolhidos pelos Autocarros para posterior análise; e a configuração dos Autocarros com um conjunto de Paragens a visitar para realizar a recolha de dados.

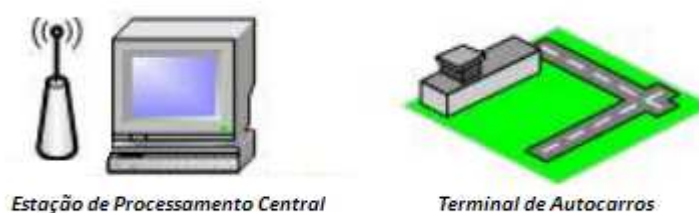


Figura 5.3 - Estação de Processamento Central e Terminal de Autocarros.

A Estação de Processamento Central faz o tratamento da informação que recolhe dos Autocarros para posterior análise. Para tal, a Estação de Processamento Central necessita da seguinte informação:

- Identificação do Autocarro.
- Identificação das Paragens de onde foram recolhidos os históricos;
- Identificação dos Tipo de sensores de cada Paragem;

A Estação de Processamento Central possui uma Lista de Autocarros que contém as suas identificações. A identificação do Autocarro é guardada numa variável inteira *ID_BUS* de 8 bits. Com esta informação será capaz de identificar os Autocarros dos quais irá recolher informação.

Por outro lado, a Estação de Processamento Central contém uma Lista de Paragens, onde se assinala a identificação de cada Paragem e a respectiva Localização Geográfica, figura 5.4. A identificação da Paragem é guardada numa variável inteira *ID_Estacao* de 16 bits, admitindo a existência de até 256 veículos destinados a recolha.

A Estação de Processamento, contém ainda uma Lista de Sensores onde se assinala a identificação dos diferentes Tipos de Sensores e a respectiva gama de conversão, figura 5.5. A identificação dos sensores é guardada numa variável inteira *ID_Sensor* de 8 bits.

Para reduzir o processamento nas Paragens optou-se por converter a leitura dos sensores apenas na Estação de Processamento Central. Deste modo, cada leitura dos sensores é representada num inteiro de 10 bits¹ que se faz acompanhar da identificação do sensor de que provém. Assim sendo, na Estação de Processamento, para cada leitura aplica-se a correspondente gama de conversão, resultando o seu valor real.

Em princípio, o histórico de leituras vem ordenado sendo o primeiro valor a leitura mais recente e o último valor a leitura mais antiga. Como a aquisição dos sensores nas Estações de Monitorização é periódica torna-se simples estimar o instante de aquisição de cada leitura através da Hora de Recolha. A Hora de Recolha é atribuída no formato: mm/dd/hh/mm/ss. Na figura 5.6 apresenta-se um fragmento da informação que está armazenada no Autocarro.

Com esta informação a Estação de Processamento é capaz de construir uma aplicação para posterior análise. Na figura 5.7 descreve-se como é composta a trama de informação desde a aquisição nas Estações de Monitorização até à Estação de Processamento Central.

¹ Surge do ADC das plataformas utilizadas na implementação.

ID_Estacao (int 16 bits)	Localização Geográfica	ID_Sensor (int 8 bits)		
70	Escola Superior da Educação	1	3	
75	Faculdade de Engenharia	1	2	3
78	Faculdade de Economia	1	2	
80	Manuel Laranjeira	1	2	3

Figura 5.4 - Exemplo de configuração das Estações de Monitorização da cidade.

ID_Sensor (int)	Tipo de Sensor	Gama de Conversão
1	Temperatura	-55°C to +125°C
2	CO2	0 to 5000 ppm
3	CO	0 to 100 ppm

Figura 5.5 - Exemplo de configuração de Lista de Sensores distribuídos pela cidade.

ID_Estacao1	Hora	Dados					Hora	Dados				
		S1	S2	S3	...	Sn		S1	S2	S3	...	Sn
ID_Estacao2	Hora	Dados					Hora	Dados				
		S1	S2	S3	...	Sn		S1	S2	S3	...	Sn
ID_Estacao3	Hora	Dados					Hora	Dados				
		S1	S2	S3	...	Sn		S1	S2	S3	...	Sn
ID_Estacao4	Hora	Dados					Hora	Dados				
		S1	S2	S3	...	Sn		S1	S2	S3	...	Sn
ID_Estacao5	Hora	Dados					Hora	Dados				
		S1	S2	S3	...	Sn		S1	S2	S3	...	Sn

Figura 5.6 - Réplica de informação armazenada no Autocarro.

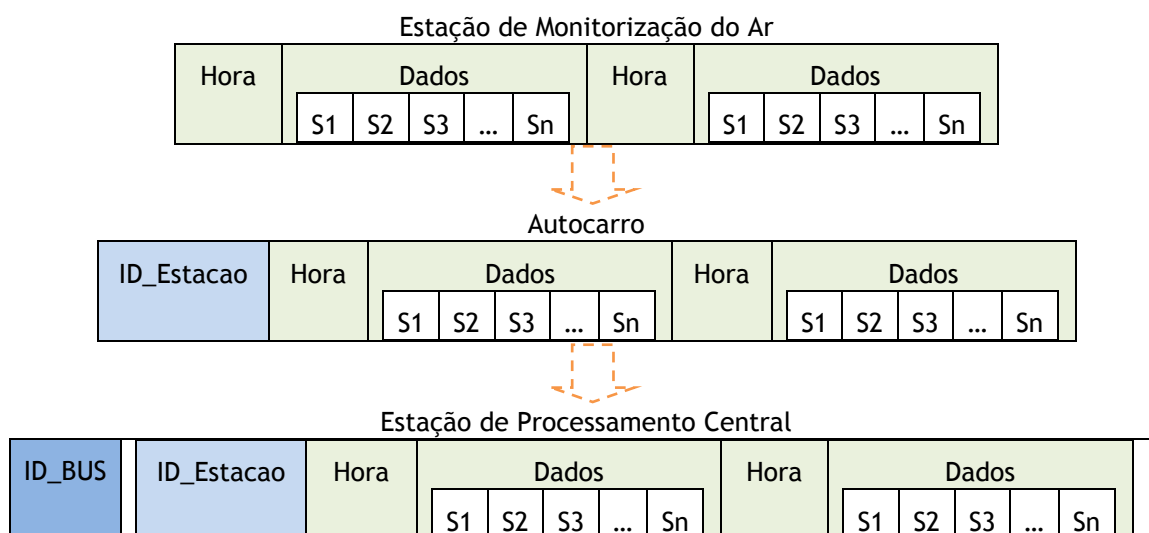


Figura 5.7 - Construção de trama até à Estação de Processamento Central.

No Terminal de Autocarros cada Autocarro é configurado com um Itinerário. O Itinerário com que a Estação de Processamento configura cada Autocarro consiste numa lista de Paragens e respectivo Estado de Recolha. Este conceito pode ser entendido como uma “Checklist de Recolha” cujo princípio de funcionamento será detalhado na secção seguinte.

5.3- Autocarros

Nesta secção apresenta-se as funcionalidades implementadas no âmbito desta dissertação para os Autocarros, com atenção para a configuração dos veículos, o percurso ao longo da cidade e a interacção com as Paragens.

Nos Autocarros são instaladas plataformas com a estrutura da figura [5.8](#).

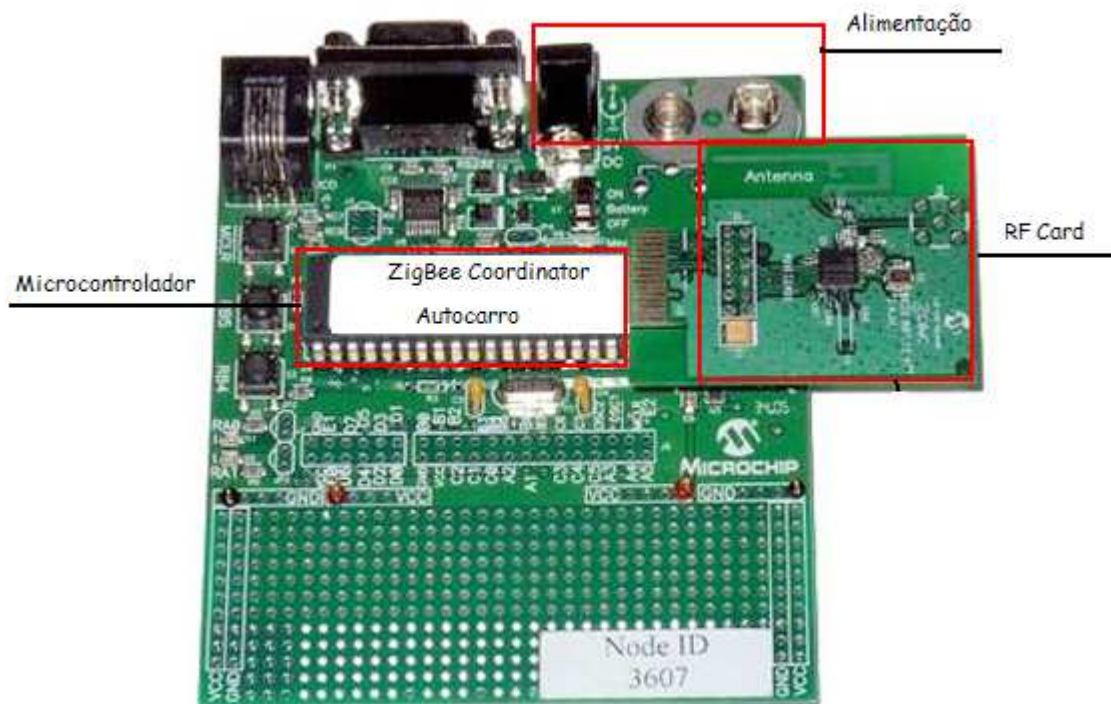


Figura 5.8 - Arquitectura de hardware do Autocarro.

5.3.1- Configuração de um novo Itinerário

Como referido na secção anterior, cada Autocarro é configurado com uma lista de Paragens a visitar que recebe na Estação de Processamento Central. Essa lista é idêntica à da figura 5.9 em que o Autocarro à medida que realiza o seu percurso vai actualizando o Estado de Recolha (Booleano). No final de um itinerário de recolha de dados (ie, na Estação de Processamento Central), os Autocarros podem ser configurados com novos itinerários ou manterem o itinerário com que se encontram configurados após reinicialização dos Estados de Recolha.

Salienta-se que um Autocarro pode realizar diferentes itinerários ao longo da cidade sem que no entanto se aproxime da Estação de Processamento Central no final de cada percurso. Neste caso, a *Checklist de Recolha* com que a Estação de Processamento Central configura o Autocarro deve incluir a lista de todas as Paragens que possam existir nos diferentes itinerários até ao itinerário que inclua a aproximação ao Terminal. Desta forma, garante-se que o Autocarro recolhe dados das Paragens destinadas a recolha nos diferentes itinerários como se trata-se de um itinerário único.

ID_Estacao	Estado_Recolha
70	0
75	0
78	0
80	0

Figura 5.9 - Checklist de Recolha.

5.3.2- Percurso ao longo da cidade

Para evitar que o Autocarro recolha dados de todas as Paragens que encontra no seu percurso ou que este recolha dados repetidamente da mesma estação de monitorização do ar, cada Autocarro utiliza a sua “*Checklist* de Recolha” de uma forma simples.

Sempre que o autocarro se aproxima de uma Paragem e com ela estabelece conexão questiona qual a sua identificação após o que, consultado a sua *Checklist* de Recolha, averigua se há-de pedir o histórico de leituras dessa Paragem. Em caso afirmativo, à medida que o autocarro se aproxima e recolhe a informação da Paragem altera o Estado de Recolha correspondente à Estação de Monitorização actual, figura 5.10. Para tornar o sistema mais flexível, assume-se que quando o Autocarro se encontra numa Paragem, reinicia o estado de recolha da penúltima Paragem de que recolheu dados. Assim, aproximando o problema às questões práticas do tráfego rodoviário, caso o autocarro efectue “marcha atrás” e volte a aproximar-se da última Paragem em que recolhera dados, como o Estado de Recolha indica que tivera sido feita uma recolha recentemente, o Autocarro não repete o pedido de históricos. Por outro lado, em caso de espera prolongada junto da mesma estação evita-se, de igual forma, sucessivas recolhas de leituras junto da mesma Paragem. Esta solução aproxima-se do conceito de *buffer* circular, como apresentado da figura 5.11.

Cada Autocarro pode realizar o mesmo percurso várias vezes ao longo do dia e, como tal, aproxima-se várias vezes na mesma Paragem. Neste sentido, é necessário reinicializar a *Checklist* de Recolha. Cada percurso que o Autocarro descreve num determinado itinerário tem uma duração média prevista. Assim, quando um Autocarro recolhe dados de uma Paragem altera o Estado de Recolha e inicia um tempo de contagem. Este temporizador serve para reiniciar o Estado de Recolha ao fim do tempo correspondente a metade da duração média de percurso do autocarro. Ao fim deste tempo, estima-se que o Autocarro já se encontra afastado da Paragem de Autocarro. A próxima vez que o Autocarro se aproximar da Paragem já irá corresponder a um novo percurso ou itinerário.

ID_Estacao	Estado_Recolha
70	0
75	1☑
78	1☑
80	0

Figura 5.10 - Checklist Estado de Recolha.

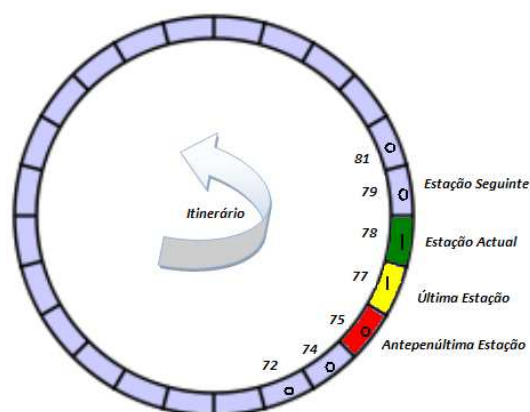


Figura 5.11 - Esquema de actualização de flags das Paragens de Recolha.

5.3.3- Interacção com as Paragens

Quando o Autocarro se aproxima de uma Paragem questiona a identificação da respectiva Paragem e avalia se deve pedir o envio do histórico de leituras. A figura 5.12 apresenta as posteriores trocas de informações. Basicamente ilustra-se o fluxo de mensagens trocadas desde que o Autocarro realiza o pedido de Histórico à Paragem e esta lhe responde ao pedido. Finalmente, a figura 5.13 apresenta o algoritmo de funcionamento do Autocarro proposto.

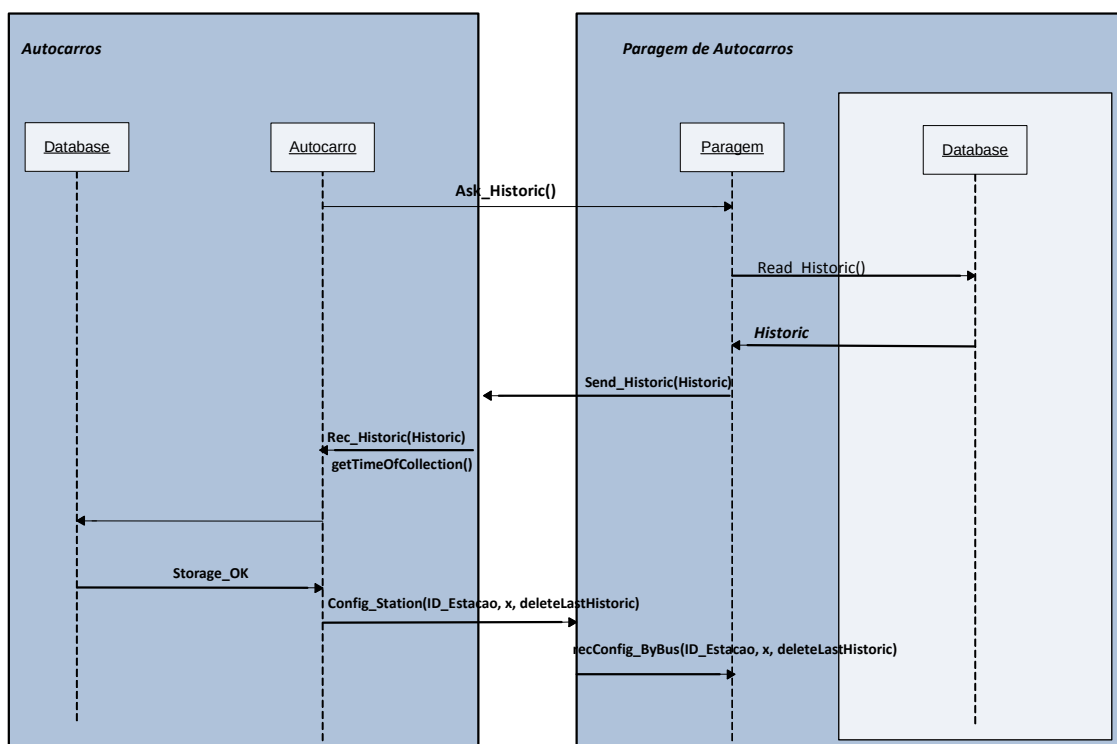


Figura 5.12 - Diagrama de Sequências de interação entre Autocarro e Paragem.

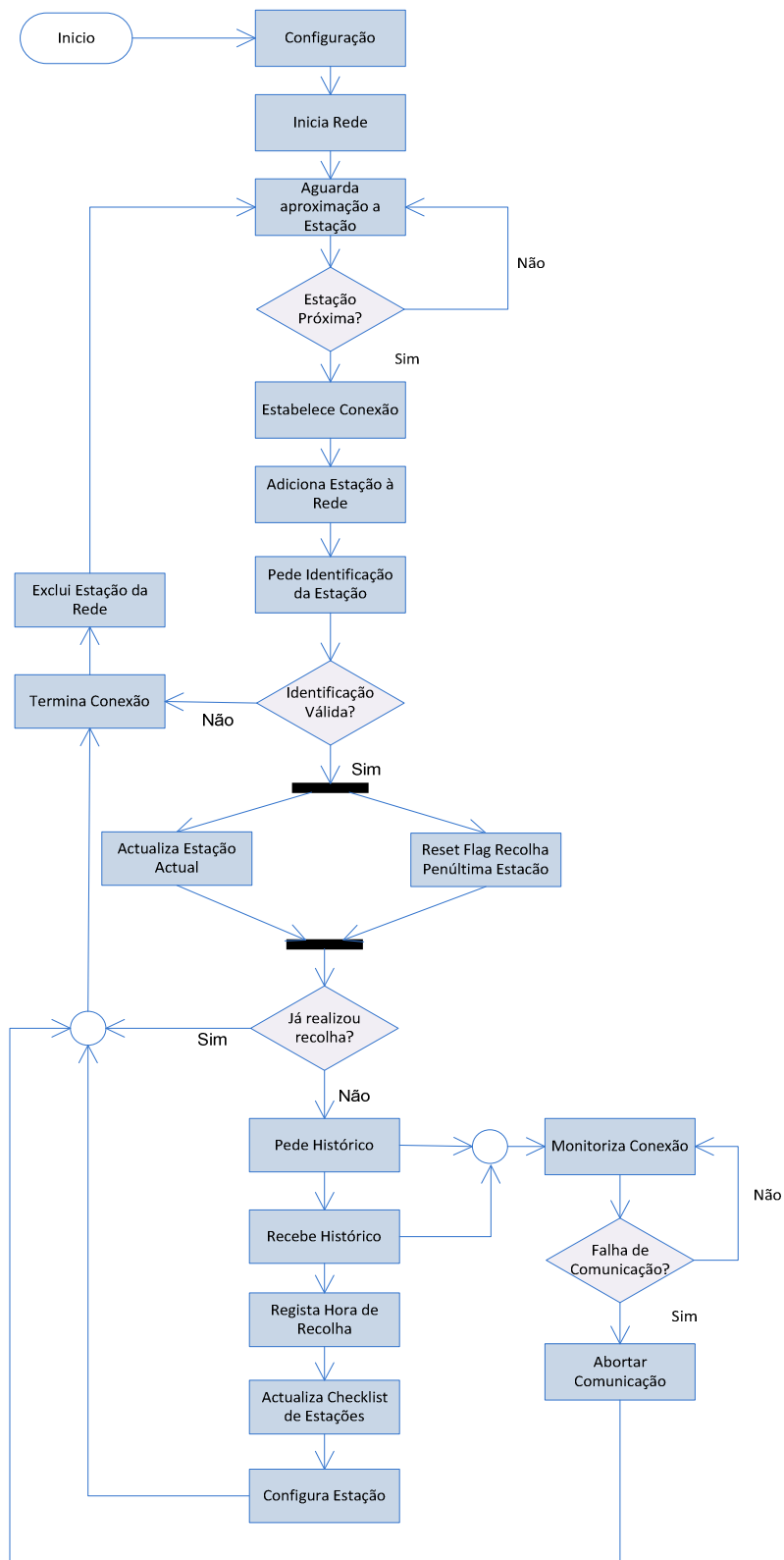


Figura 5.13 - Algoritmo implementado nos Autocarros.

5.4 - Paragens

Periodicamente, as Paragens adquirem dados de cada sensor da Estação de Monitorização do Ar e armazenam as leituras até estas serem solicitadas por um Autocarro.

5.4.1- Estação de Monitorização do Ar

As Estações de Monitorização do Ar, localizam-se nas Paragens as quais possuem plataformas sem-fios capazes de: adquirir e armazenar a leitura dos sensores com vista a produzir um histórico de leituras, figura [5.14](#).

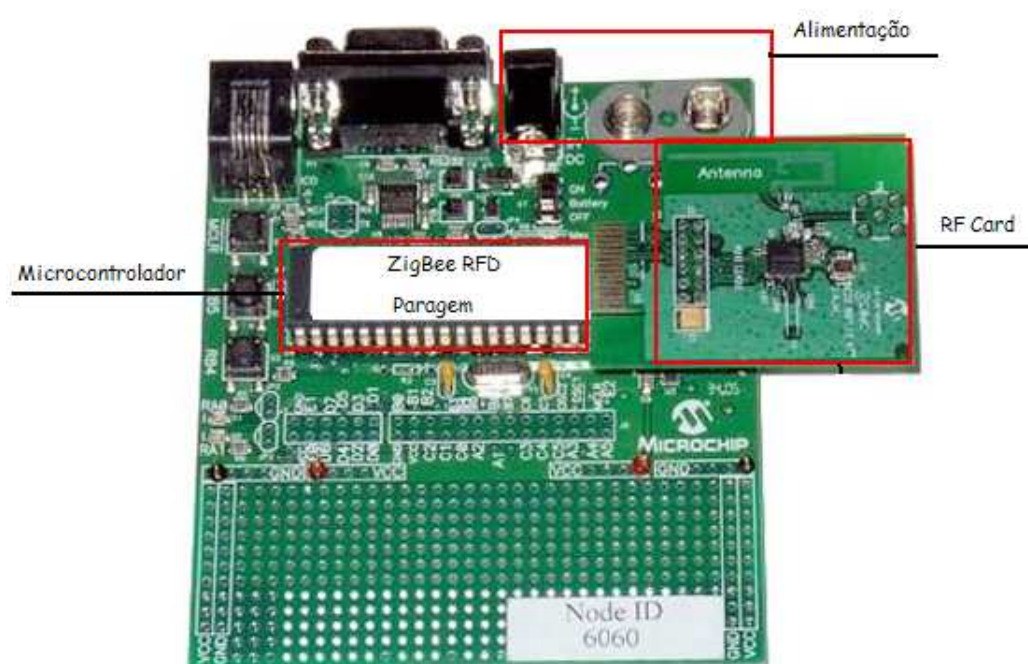


Figura 5.14 - Arquitectura de Paragens.

As Estações de Monitorização do ar propostas são constituídas por sensores de Temperatura e Dióxido de Carbono, figura [5.15](#). Na tabela [5.1](#) apresenta-se a respectiva identificação e Gama de Conversão a aplicar na Estação de Processamento Central.

As leituras de cada sensor são acompanhadas da identificação do sensor de que é proveniente e posteriormente, na Estação de Processamento, aplica-se a escala de conversão relativa ao sensor em causa.

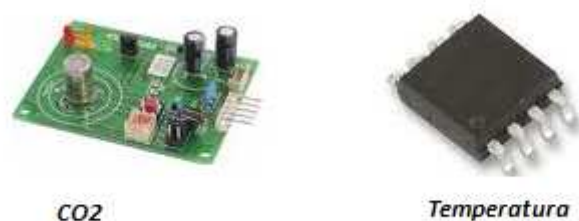


Figura 5.15 - Estação de Qualidade do Ar.

Tabela 5.1 – Estação de Monitorização do ar.

ID_Sensor	Tipo de Sensor	Gama de Conversão
1	Temperatura	-55° C to +125°C
3	Dioxido de Carbono	0 to 5000 ppm

Dada a natureza dos dados a adquirir, a menos que os sensores estejam submetidos directamente à respectiva fonte de agentes atmosféricos, não apresentarão uma variação muito significativa entre aquisições muito próximas. Por esta razão as estações irão adquirir a um período constante *timeAquisition*. A figura 5.16 apresenta o diagrama sequencial de evolução das aplicações que correm nas Paragens.

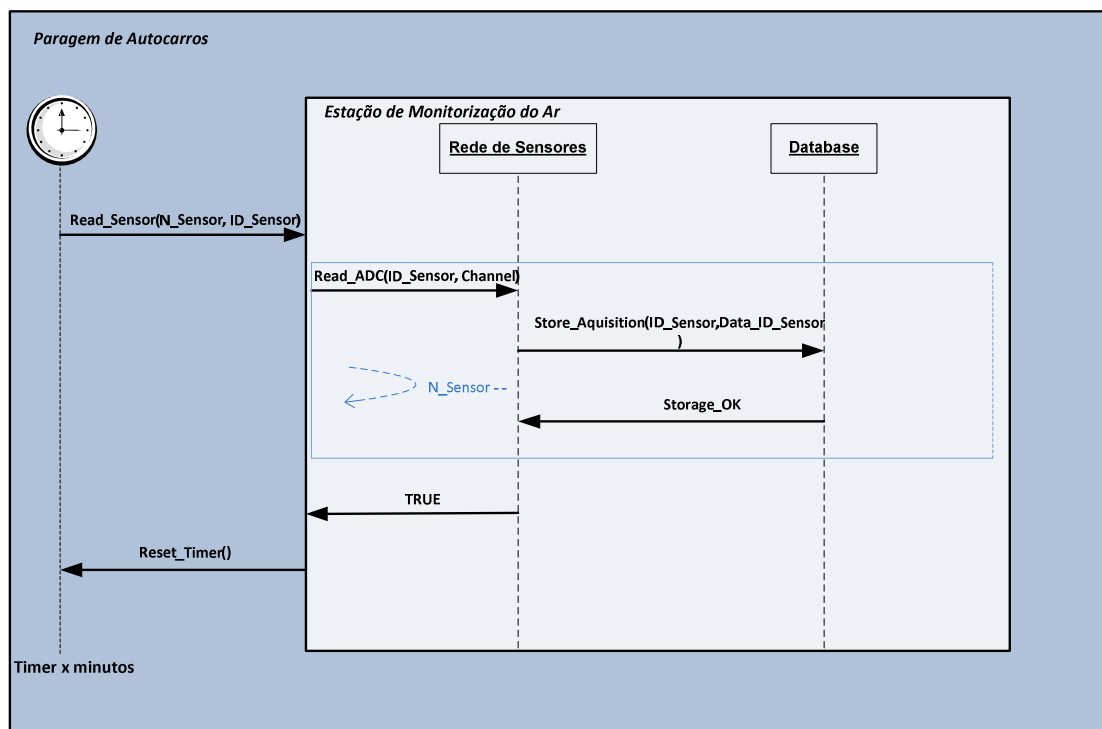


Figura 5.16 - Diagrama de Sequências: Paragem.

5.4.2- Armazenamento de dados

No final da leitura dos sensores constrói-se uma tabela que faz corresponder cada leitura ao respectivo Tipo de Sensor. Deste modo com a mesma periodicidade com que os sensores são lidos, as tabelas são armazenadas formando um histórico de dados.

Na figura 5.17 apresenta-se o algoritmo de funcionamento da Estação de Monitorização do ar propostas na presente subsecção e na subsecção anterior (5.4.1).

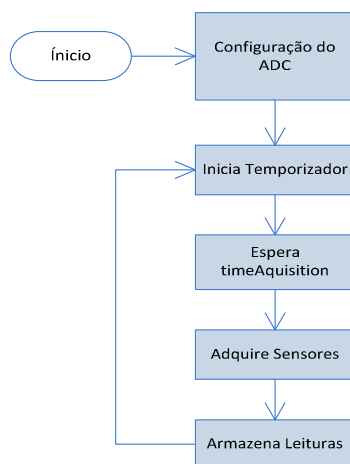


Figura 5.17 - Estação de Qualidade do Ar.

5.4.3- Recolha de dados das Estações de Monitorização

Quando uma Paragem não se encontra associada a um Autocarro, esta rastreia o meio no sentido de detectar um Autocarro na sua proximidade com a qual possa estabelecer conexão. Quando associada a um Autocarro, este primeiramente pede a sua identificação após o que avalia se irá pedir o histórico de leituras. Caso o Autocarro entenda que não deve pedir as leituras este convida a Paragem a abandonar a rede. O mesmo acontece no final do envio de um histórico em que Paragem é convidada a abandonar a rede e mesmo apagar o seu histórico com vista a novas aquisições/armazenamentos.

5.4.4- Alimentação das Paragens e Estações de Monitorização do Ar

A alimentação dos módulos existentes nas Paragens é um aspecto a ter em conta neste projecto pois implica uma reflexão nos seguintes níveis:

- Existência de Alimentação nas Paragens;
- Frequência de passagem de autocarros.

No primeiro caso, entende-se que nem todas as Paragens possuem fontes de alimentação próprias. Neste contexto, é necessário que os módulos sejam auto-suficientes, com baterias próprias e modos de poupança de energia para rentabilizar o consumo energético. Contudo, a autonomia das baterias é limitada e é necessário proceder à sua substituição. No caso de a Paragem possuir fonte de alimentação os módulos poderão ser alimentados a partir dela e, eventualmente, prescindir de módulos de poupança de energia para aumentar a disponibilidade da rede quando a frequência de passagem de autocarros é elevada, por

exemplo de, de 3 em 3 minutos. A utilização de painéis solares para a alimentação das Paragens apresentaria uma forma simples de produzir energia.

No segundo caso, é necessário equacionar a frequência de passagem de Autocarros numa determinada Paragem com a existência de alimentação própria. No caso de a Paragem possuir alimentação própria e uma elevada frequência de passagem de autocarros (de 3 em 3 minutos, por exemplo), os módulos correspondentes podem estar continuamente ligados garantindo assim um funcionamento permanente sem problemas de alimentação. Caso a frequência de passagem seja reduzida (ou seja, para tempos de espera superiores a 20 minutos) pode-se, por questões de optimização dos consumos, implementar o modo de poupança de energia mas com polling frequente, ie, de 1 em 1 minuto, a qual se trata de uma estimativa do tempo que um autocarro demora a aproximar-se e afastar-se de uma Paragem, minimizando-se assim as “perdas de autocarro”.

Na figura [5.18](#) apresenta-se o algoritmo proposto para o funcionamento das Paragens de Autocarro.

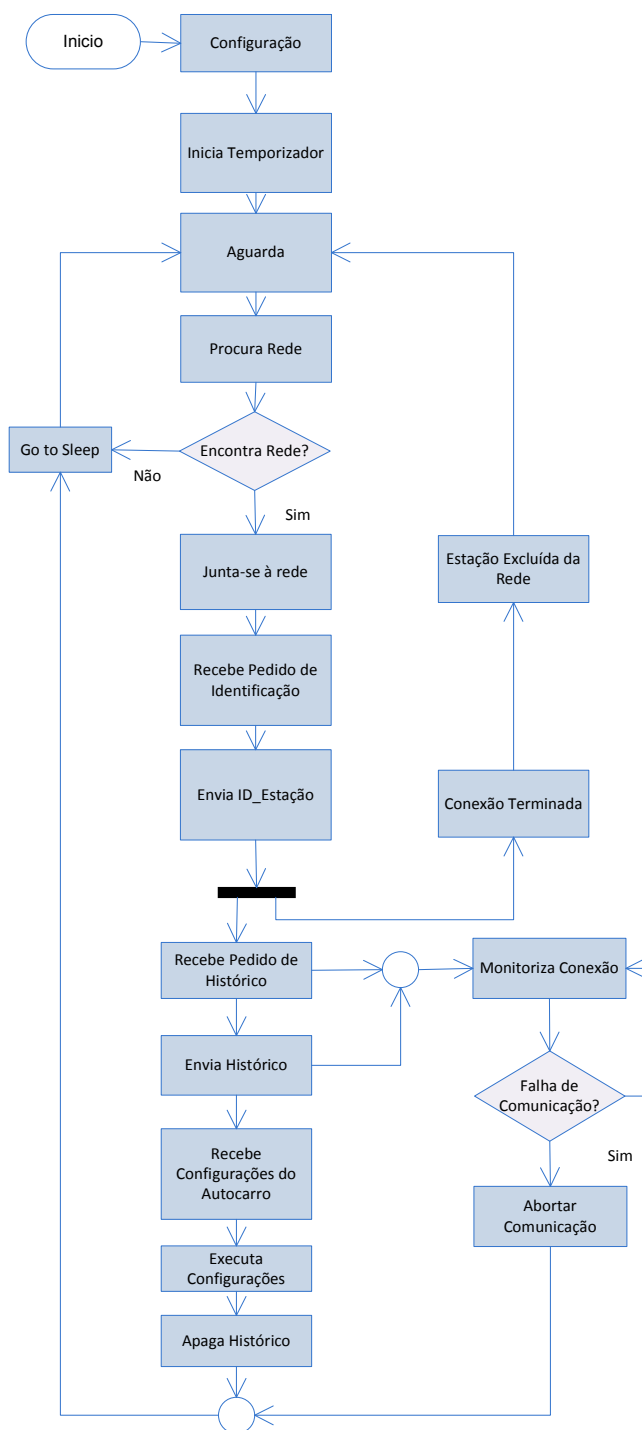


Figura 5.18 - Algoritmo implementado nas Paragens.

5.5 - Solução da *Microchip*

Nesta secção apresenta-se a proposta de Hardware que permite responder aos principais requisitos do projecto de um sistema de monitorização da qualidade do ar. Trata-se de módulos pertencentes ao kit PICDEM Z (DM163027-2) da Microchip. Nela encontra-se dois pares de dispositivos idênticos. Os de maiores dimensões correspondem às *boards* PICDEM Z (AC163027-1) cada uma das quais destinadas a implementarem o ZigBee *Coordinator* e ZigBee RFD. Os de dimensões inferiores correspondem aos *transceivers daughter-card* (AC-163027-2) que contêm as antenas RF em PCB para a troca de mensagens. Estas últimas são acopladas às *boards* PICDEM Z. O dispositivo complementar corresponde a um “*sniffer*” que permite monitorizar o tráfego *over-the-air* quando conectado através do cabo USB ao computador através do software Zena.



Figura 5.19 - Hardware PICDEM Z.

Visto os Autocarros apresentarem mobilidade ao longo da cidade e dele partirem as principais funções do sistema, propõem-se que este seja o ZigBee *Coordinator* da Rede ZigBee. Ficam assim responsáveis por iniciar PAN, através de busca de PAN ID e permitir a associação de outros dispositivos na rede por ele iniciada. Por sua vez, as Paragens encontram-se fixas, desempenham funções pouco relevantes para a Rede ZigBee, propõem-se que desempenhem o papel de ZigBee RFD, em que periodicamente irão rastrear o meio no sentido de averiguar se existe algum Autocarro próximo para com ele se associar.

5.5.1- *Motherboard e daughter-card*

Relativamente aos módulos, estes separam-se entre uma *Motherboard* e uma *daughter-card*. Esta separação física permite que possam ser usados diferentes *transceivers* para a mesma motherboard, verificando-se assim, a interoperabilidade entre produtos de diferentes fabricantes. Este kit contém o *transceiver* MRF24J40 RF 2.4Ghz, que comunica com o microcontrolador PIC18F4620 através de uma interface SPI, figura [5.19](#).

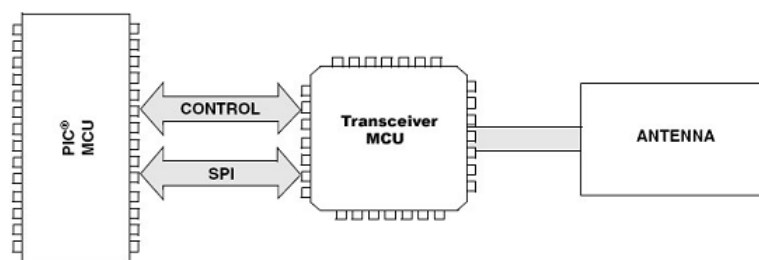


Figura 5.20 - Esquema de ligação da Antena.

5.5.2- Profiles, Endpoints, Clustes e Attributes

Para permitir a troca de mensagens entre os dispositivos ZigBee: ZigBee *Coordinator* e ZigBee RFD é necessário definir os *endpoints*, *clusters*, e *attributes*, cujo conceito foi apresentado no capítulo 3. Neste capítulo propõe-se a troca de mensagens entre os Autocarros e as Paragens em que o Autocarro pede a identificação da estação, faz o pedido de histórico de leituras e envia um comando de configurações (e confirmações).

Nas comunicações ZigBee, os pedidos e respostas são endereçáveis entre os dispositivos. Para permitir o diálogo entre o ZigBee Coordinator (Autocarro) e o ZigBee RFD (Paragens) configurou-se um endpoint, um cluster e três attributes, figura 5.21.

No dispositivo ZigBee *Coordinator* define-se um *endpoint* chamado “EP_AirQuality” com o endereço 0x09 que contém o Cluster “AirQuality_Cluster” com o endereço 0x20. O Cluster contém três *attributes*, um relativo ao *ID_Estacao*, outro relativo ao histórico de dados e outro relativo às configurações do sistema.

Por sua vez, no dispositivo ZigBee *RFD* define-se o *endpoint* chamado “EP_AirQuality” com o endereço 0x03 que contém o Cluster “AirQuality_Cluster” com o endereço 0x20. Tal como os dispositivos ZigBee *Coordinator* apenas estão definidos dois *Attributes*.

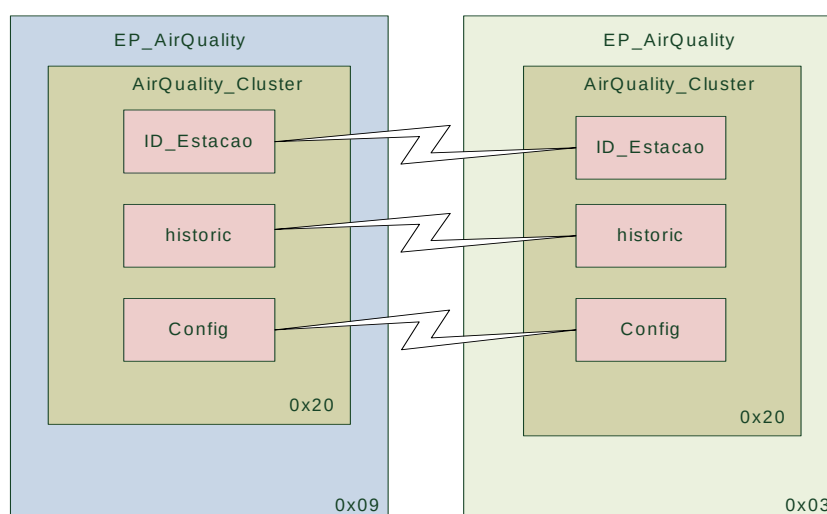


Figura 5.21 - Endpoints, cluster e attribute da aplicação.

5.5.3- Mensagens trocadas

Para a correcta manipulação da *Microchip Stack for ZigBee Protocol* [27], foi necessário um estudo das primitivas que suportam as mensagens de protocolo nas quais se destacam a associação de nós, a desassociação de nós, o pedido de mensagens e o envio de mensagens. Na figura 5.22 apresenta-se a sequência de primitivas e mensagens no sentido de se associar um módulo à rede. Na figura 5.23 apresenta-se as primitivas utilizadas para o pedido de informações entre dispositivos, representando-se na figura 5.24 o pedido de endereços de rede. Outras importantes primitivas utilizadas são as que se referem na figura 5.25, relativas à sincronização entre os dispositivos. Na figura 5.26 apresenta-se a primitiva que resulta no reset da *ZigBee Stack*.

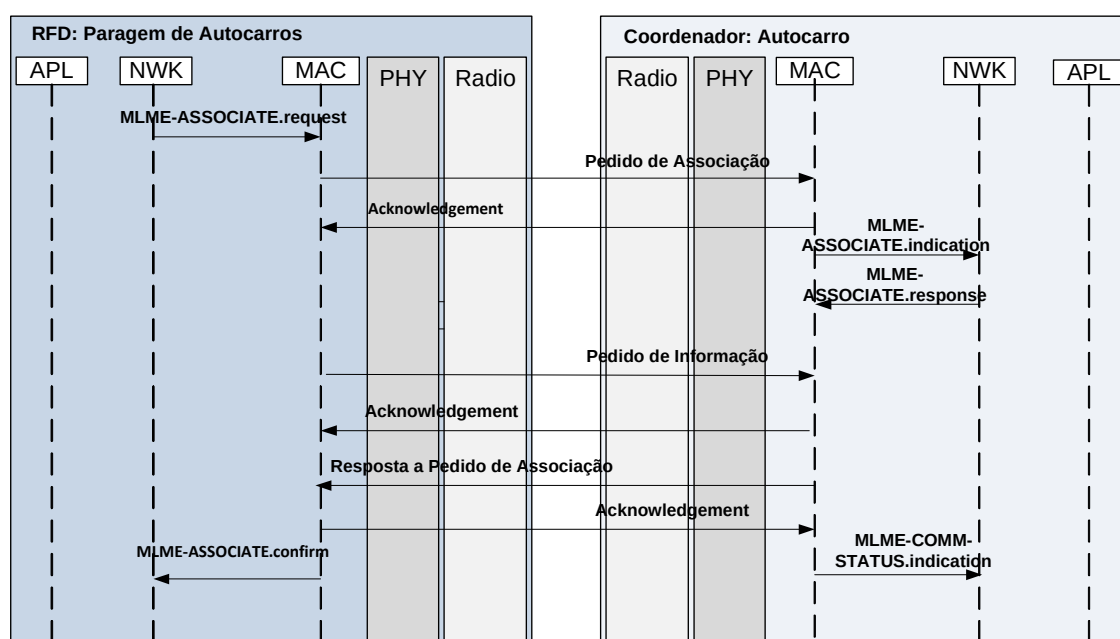


Figura 5.22 - Associação de nós.

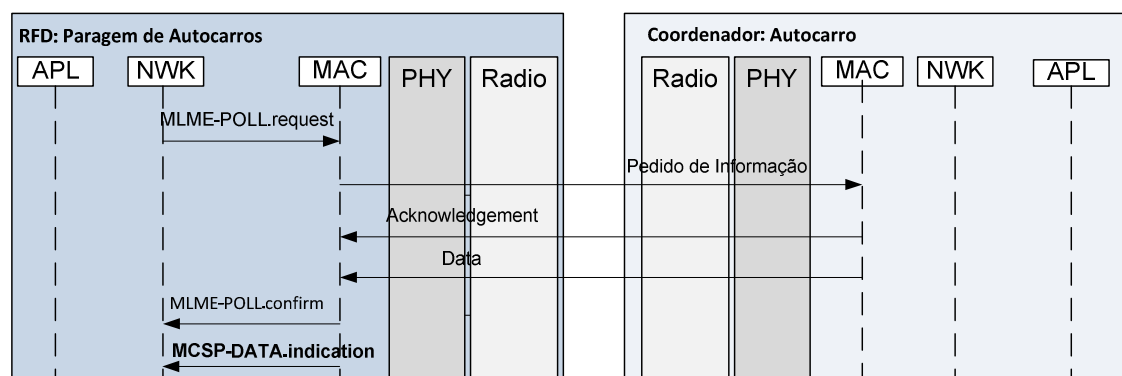


Figura 5.23 - Pedido de Informação.

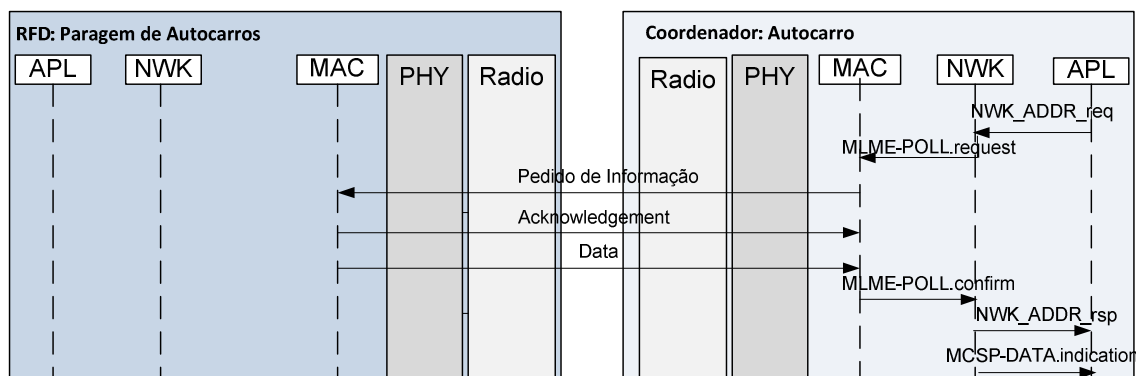


Figura 5.24 - Troca de Endereços de rede.

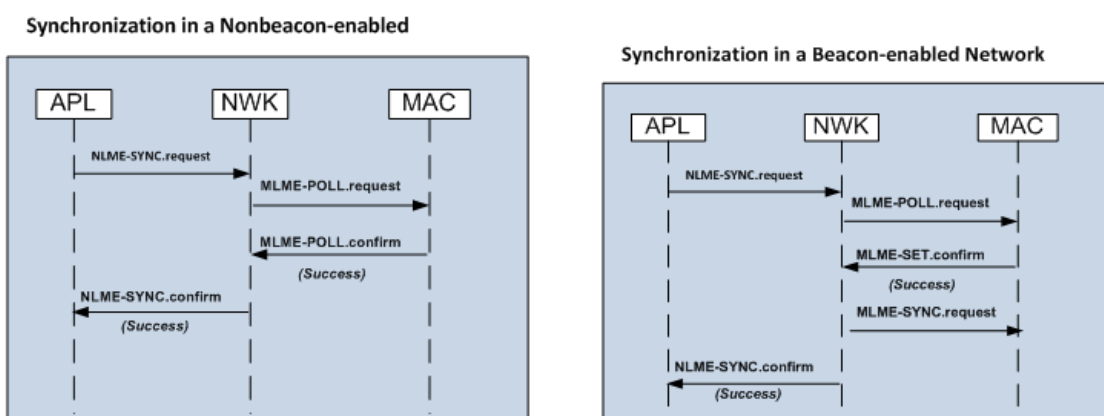


Figura 5.25 - Sincronização dos nós.

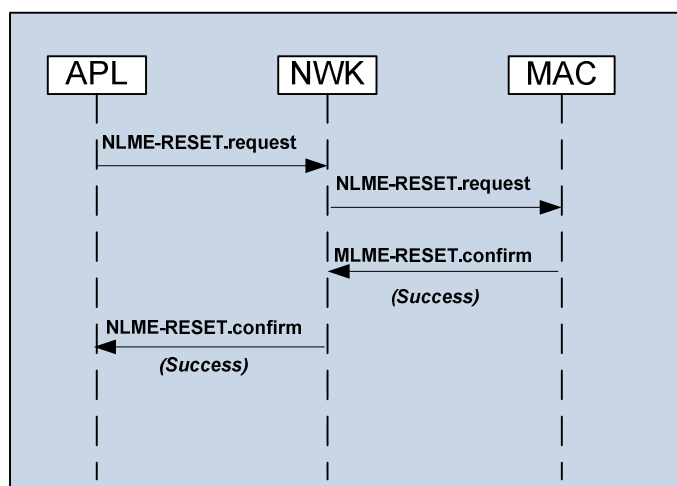


Figura 5.26 - Reset.

5.6 - Sumário

Neste capítulo apresentou-se a Arquitectura da Solução proposta para satisfazer os requisitos do Sistema de Monitorização de Qualidade do ar integrado na Infra-estrutura de

transportes. Da implementação resultou a construção de uma Estação de Monitorização do ar que monitoriza a temperatura e dióxido de carbono distribuídas pelas Paragens de Autocarro que periodicamente adquirem e armazenam a leitura dos sensores. Sempre que um Autocarro se aproxima destas Paragens estabelece-se conexão entre os pares da qual resulta uma identificação e um pedido de histórico e envio de configurações. As duas últimas vão depender do reconhecimento do Autocarro atribuído às Paragens: podem não ser uma estação de recolha ou simplesmente pode já ter havido recolha num curto período de tempo.

Capítulo 6

Validação da Solução

Neste capítulo descreve-se os principais testes aplicados ao sistema para averiguar o seu comportamento. Testou-se as principais funções das Redes *ZigBee* e funções ao nível da aplicação. Fez-se uma avaliação do comportamento do sistema para as seguintes situações: interferências e restrições de outras Redes *Wireless*, obstáculos à propagação, distância entre módulos, velocidades do autocarro e autonomia das baterias. No final apresenta-se um estudo de campo.

Para monitorizar a execução dos testes conectou-se um cabo RS-232 entre cada módulo e um PC e ainda, utilizou-se o “*sniffer*” e o software ZenaTM para monitorizar o tráfego da rede.

6.1 - Teste de inicialização de dispositivos ZigBee

Este teste tem como objectivo validar a inicialização dos dispositivos que inclui a configuração dos módulos ZigBee e a inicialização de uma Rede ZigBee.

Pretende-se que ao alimentar o módulo ZigBee *Coordinator* correspondente ao Autocarro este imprima a sua identificação, o seu endereço MAC e a sua “*Checklist* de Recolha”. De seguida, este deve iniciar uma PAN e permitir que se adicionem novos dispositivos na rede.

Por sua vez, ao alimentar o módulo ZigBee RFD correspondente a uma Paragem pretende-se que este imprima a sua identificação, o seu endereço MAC, o número de sensores, e a identificação dos respectivos sensores. De seguida este deve rastrear a existência de uma PAN à qual se possa associar, encontrar PAN existente, associar-se a essa PAN e verificar se tem mensagens pendentes. A figura [6.1](#) apresenta uma *checklist* com os aspectos que se pretende verificar com este teste.

No	Teste	Controlo	Resultado
1	Configuração de dispositivos	O módulo <i>ZigBee Coordinator</i> imprime identificação do Autocarro?	☒
		O módulo <i>ZigBee Coordinator</i> imprime o seu endereço MAC?	☒
		O módulo <i>ZigBee Coordinator</i> imprime <i>Checklist</i> de Recolha?	☒
		O módulo <i>ZigBee RFD</i> imprime identificação da Paragem?	☒
		O módulo <i>ZigBee RFD</i> imprime o seu endereço MAC?	☒
		O módulo <i>ZigBee RFD</i> imprime Número e Tipo de Sensores?	☒
2	Inicialização de rede ZigBee	O módulo <i>ZigBee Coordinator</i> consegue iniciar PAN?	☒
		A rede iniciada tem identificador PAN ID atribuído?	☒
		O módulo <i>ZigBee Coordinator</i> permite juntar novos módulos?	☒
		O módulo <i>ZigBee RFD</i> rastreia a existência de PAN?	☒
		O módulo <i>ZigBee RFD</i> consegue encontrar PAN?	☒
		O módulo <i>ZigBee RFD</i> consegue associar-se a PAN?	☒
		Periodicamente o módulo ZigBee verifica se possui mensagens pendentes?	☒
		Se não encontrar mensagens pendentes entra em modo de poupança de energia?	☒

Figura 6.1 - Checklist de teste de inicialização de dispositivos.

6.2 - Troca de Endereços de Rede

Este teste tem como objectivo confirmar que quando um novo módulo é adicionado à Rede *ZigBee* o *ZigBee Coordinator* envia imediatamente um pedido “*NWK_ADDR_req*” ao *ZigBee RFD* que responde com um “*NWK_ADDR_rsp*”. Esta etapa é importante pois para que os dispositivos possam trocar mensagens entre si é necessário conhecer o respectivo endereço de rede. Na figura [6.2](#) apresenta-se a *checklist* de acompanhamento deste teste.

No	Teste	Controlo	Resultado
3	Pedido de NWK_ADDR_req	O módulo <i>ZigBee Coordinator</i> imediatamente após adicionar <i>ZigBee RFD</i> na rede envia “NWK_ADDR_req”?	☒
		O módulo <i>ZigBee RFD</i> recebe pedido de “NWK_ADDR_req”?	☒
4	Envio de NWK_ADDR_rsp	O módulo <i>ZigBee RFD</i> envia o seu endereço de rede?	☒
		O módulo <i>ZigBee Coordinator</i> recebe “NWK_ADDR_rsp”?	☒

Figura 6.2 - Checklist de teste de troca de endereço de rede.

6.1 - Reconhecimento de Paragens e pedido de Histórico

O objectivo deste teste é verificar que logo após a troca de endereços de rede o Autocarro realiza o pedido de identificação da Paragem a que está associado. Também se pretende testar se, em função da identificação recebida, o Autocarro verifica a existência dessa identificação na sua “Checklist de Recolha” e como tal realiza o pedido de histórico. Se a recolha de histórico tiver sido correctamente recebida e armazenada o Autocarro actualiza a sua “Checklist de Recolha”. Na figura 6.3 apresenta-se o acompanhamento do teste.

No	Teste	Controlo	Resultado
5	Pedido de Identificação de Paragem de Autocarro	O Autocarro envia o pedido de identificação de Paragem logo após receber o NWK_ADDR_rsp?	☒
		A Paragem recebe o pedido de identificação?	☒
		A Paragem envia a sua identificação?	☒
		O Autocarro recebe a identificação da Paragem?	☒
6	Consulta de “Checklist de Recolha”	O Autocarro verifica se identificação de Paragem de Autocarro existe na sua “Checklist de Recolha”?	☒
		Se a Paragem actual for uma Estação de recolha o Autocarro verifica o respectivo Estado de Recolha?	☒
		O Autocarro realiza o pedido de histórico se o Estado de Recolha indicar que este pode ser pedido?	☒
7	Pedido de Historico	Autocarro faz o pedido de histórico?	☒
		Paragem de Autocarro recebe o pedido de histórico?	☒
		Paragem envia o seu histórico?	☒
		Autocarro recebe o histórico?	☒
		Autocarro armazena o histórico?	☒

Figura 6.3 - Checklist de interações para a recolha de históricos de leituras.

6.2 - Avaliação do comportamento do Sistema

Testou-se o comportamento do sistema submetendo-o às principais interferências e restrições que podem existir no desempenho das suas funções. São elas a interferência de outros protocolos de comunicação que partilham a mesma banda de frequência: Wi-Fi, Bluetooth; interferência da velocidade do veículo na recolha de históricos e a propagação das ondas electromagnéticas em diferentes meios: vidro, plástico, madeira, metal, cartão.

6.4.1- Coexistência de outras redes *Wireless*

O teste consistiu em submeter o funcionamento da rede *ZigBee* na proximidade de redes *Wireless Wi-Fi* com o objectivo de registar o seu comportamento.

Verificou-se que a coexistência com as redes *Wi-Fi*, em particular as que utilizam as normas IEEE 802.11g, afecta o comportamento do sistema nomeadamente durante a inicialização de uma PAN pelo *ZigBee Coordinator* e durante a associação de um *ZigBee RFD* a um PAN *Coordinator* existente.

Verificou-se que o *ZigBee Coordinator*, quando alimentado, demora mais tempo a inicializar uma PAN do que em situações fora de interferências de outras redes *Wireless*, após o que consegue. No caso da associação de um *ZigBee RFD* à PAN esta pode ser muito demorada (ou, em alguns casos, impossível. Uma forma de contornar a situação foi aproximar os módulos a cerca de 15 cm de distância. Contudo, este cenário é insuportável para os requisitos do sistema em estudo, pelo que se partiu para outras alternativas.

A tentativa que melhorou o comportamento dos sistemas nestas condições foi, utilizar uma opção da *Microchip Stack* que permite que os módulos rastreiem todos os canais disponíveis na banda de frequências de 2.4GHz no sentido de verificar qual o melhor canal para estabelecer conexões, ou seja, qual o canal com menor interferência. Esta opção, no entanto, consome mais tempo que a simples fixação de um canal para transmissão. Notou-se ainda uma ligeira melhoria ao fixar o *transceiver* sempre activo e não periodicamente activo. Porém, esta última, aumenta o consumo de energia dos módulos o que em Paragens sem alimentação própria seria pouco prático.

Estas interferências ocorrem devido à partilha da banda de frequência de 2.4GHz pelos dispositivos que operam segundo as normas IEEE 802.15.4 e segundo as normas IEEE 802.11 g. Estas últimas, utilizam todos os canais disponíveis para a difusão do sinal e, deste modo, interferem com o canal de comunicação da rede *ZigBee/IEEE 802.15.4*.

6.4.2- Obstáculos à propagação

O objectivo é testar o comportamento da rede *ZigBee* no desempenho das duas funções quando os módulos são envolvidos por interfaces de vidro, madeira, metal, plástico, cartão ou sem qualquer interface (ao ar). Realizou-se 20 ensaios nas seguintes condições:

- O *ZigBee Coordinator* e o *ZigBee RFD* distam entre si 2m: aproximadamente a distância entre a Paragem e o Autocarro quando estes estão muito próximos;

- Sequencialmente alterna-se o envolvimento dos módulos: pretende-se simular as diferentes barreiras que podem existir nas condições reais de funcionamento do sistema;
- Cada pilha de 9.0V encontrava-se carregada após um período de 8h de carregamento.
- A potência das antenas encontrava-se fixada no valor máximo disponível pela Microchip: 0.0dBm;

Os resultados registam-se na tabela [6.1](#).

Tabela 6.1 – Comparação de diferentes meios de propagação.

Material da Barreira	Número de Erros	%Sucesso	%Insucesso
Cartão	3	85%	15%
Plástico	2	90%	10%
Vidro	1	95%	5%
Metal	11	45%	55%
Madeira	2	9%	10%
Ar	1	95%	5%

Como esperado o meio em que ocorreu maior número de falhas foi o metal. Nestas circunstâncias, nas situações em que a rede *ZigBee* conseguiu estabelecer conexões, as comunicações desenrolaram-se de uma forma muito lenta e em alguns casos a *Stack* teve de repetir pedidos. De facto, o maior obstáculo das redes *Wireless* é a propagação de ondas electromagnéticas através dos metais. Nas restantes situações, Cartão, Plástico, Vidro, Madeira e ainda ao Ar, a taxa de sucesso foi elevada.

Este teste é uma aproximação académica aos ambientes a que o par Autocarro - Paragem podem estar condicionados.

6.4.3- Velocidade do Autocarro

O objectivo deste teste é verificar de que forma a velocidade do veículo pode influenciar as funcionalidades da rede e também verificar qual a velocidade máxima permitida para a correcta recolha de históricos.

Testou-se o comportamento do sistema para diferentes velocidades de um veículo automóvel realizando iterativamente um percurso de aproximadamente 240m. O teste foi realizado numa zona rural para evitar constrangimentos de trânsito nas estradas. O percurso encontra-se demarcado na figura [6.4](#), na freguesia de Guilhabreu, Vila do Conde. Iterativamente, o veículo partiu de uma posição geográfica assinalada “Inicio”, aproximava-se da “Paragem de Autocarro” e afastava-se até ao ponto geográfico assinalado como “Fim”. Durante o trajecto demarcado a azul aplicou-se ao automóvel velocidades aproximadamente constantes de 10Km/h, 20Km/h, 30Km/h, 40Km/h e 50km/h. O veículo simula o caso em que

um Autocarro se aproxima de uma Paragem que consta na sua “*Checklist de Recolha*” e, portanto, nela deve realizar recolha de histórico.

Os resultados deste teste são curiosos e merecem particular atenção. Em primeiro lugar verificou-se que a velocidade do autocarro não tem implicações na distância a partir da qual a Paragem encontra um Autocarro à qual se possa associar: entre 50 a 60 m de distância da Paragem. Quando se associam, sucede-se um diálogo entre o Autocarro e a Paragem: que começa pelo pedido de endereço de rede e termina com uma mensagem de configurações onde se inclui a confirmação de que o histórico fora correctamente recebido e como tal a Paragem pode libertar memória. Às velocidades de aproximadamente 10km/h e 20 km/h, respectivamente, este diálogo é concluído um pouco antes de o veículo conseguir chegar à Paragem (enquanto o Autocarro se está a aproximar da Paragem). Por sua vez, para velocidades de aproximadamente 30Km/h e 40Km/h o diálogo termina um pouco depois da Paragem (quando o Autocarro se encontra a afastar da Paragem). Para o patamar superior do teste (50 Km/h), de facto, o diálogo não foi concluído. Depois de várias tentativas infrutíferas verificou-se que a “falha de conexão” ocorria entre o envio do histórico e/ou envio das configurações. Em alguns casos o Autocarro nem chegou a realizar o pedido de histórico. Uma certeza porém, está-se a testar o sistema para uma situação em que o Autocarro se aproxima (sem parar) de uma Paragem que consta na sua “*Checklist de Recolha*” (onde deveria parar). Como este facto exige o pedido de histórico, o envio de histórico e o envio de configurações, o diálogo torna-se prolongado. No caso de a Paragem não constar na “*Checklist de Recolha*”, o diálogo é inferior pois após o pedido de identificação da Paragem a conexão é imediatamente encerrada.

Assim sendo, alterou-se a configuração da “*Checklist de Recolha*”, de forma a não incluir esta Paragem num ponto de paragem obrigatória e, efectivamente, o diálogo foi concluído com sucesso (um pouco após o Autocarro se distanciar da Paragem de Autocarro).



Figura 6.4 - Percurso de utilizado no teste de velocidade.

6.4.4- Distância entre módulos

Este teste pretende verificar qual a distância máxima entre dispositivos *ZigBee* possível para que estes possam trocar informação.

Procedeu-se em duas fases. Numa primeira fase testou-se num ambiente interior, livre de qualquer interferência de outras redes *Wireless* e sem qualquer tipo de obstáculos. Numa segunda fase testou-se num ambiente *outdoor*, nas condições que se pretende que o sistema funcione. O teste consiste em alimentar os dispositivos e aguardar que estes funcionem de acordo com a sua especificação.

Verificou-se que num ambiente interior a rede alcança 18 metros quando livre de interferências de outras redes *Wireless* (IEEE 802.11g), quando tal acontece a distância é muito curta: aproximadamente 3.0m e em alguns casos, a escassos centímetros.

Num ambiente *outdoor* registou-se cerca de 60m em ambiente rural e aproximadamente 20m em ambiente urbano.

Em todas estas situações não se registou um alcance em torno dos 100m como o protocolo *ZigBee* sugere. Tal, vai de encontro a uma das limitações de *hardware* do projecto, cuja antena *Wireless*, quer emissora quer receptora, são antenas impressas em PCB pelo que não é de todo expectável que apresentem o mesmo alcance e robustez que as antenas SMA muito utilizadas em Redes *Wireless*. Por conseguinte, no contexto da presente dissertação, tal limitação acarreta uma vantagem importante: a selectividade de Paragens durante o percurso do Autocarro. Por outras palavras, o Autocarro estabelece comunicação com Paragens que estejam realmente próximas (num raio inferior a, aproximadamente, 60m) eliminando-se as restantes.

6.3 - Autonomia da alimentação

O objectivo deste teste consiste em determinar a autonomia máxima dos módulos *ZigBee* quando alimentados por uma pilha recarregável de 9.0V.

Durante as principais fases de desenvolvimento do sistema utilizou-se dois tipos de alimentação dos módulos: através de fonte de sinal DC de 9.0V e através de pilhas recarregáveis de 9.0V. Para os módulos que serão alimentados a partir de fontes de alimentação das próprias Paragem, assume-se que se terá uma fonte ilimitada de energia, pelo que o teste de maior interesse resulta nas pilhas recarregáveis que poderão ser utilizadas nas Paragens sem fontes de alimentação.

O teste aplicado à pilha recarregável de 9.0V consiste em após carga de 8h consecutivas, a mesma alimenta continuamente um módulo no desempenho das suas funções.

Verificou-se que uma pilha recarregável de 9.0V completamente carregada a alimentar um módulo correspondente a uma Paragem dura cerca de um dia e meio. Note-se que se inclui a procura de rede e a aquisição e armazenamento dos dois sensores utilizados, sem modo de poupança de energia *sleep*. No caso de se incluir um modo de poupança de energia a duração da bateria ascende para dois dias. Ainda se verificou que quando a pilha apresenta

aos seus terminais um valor inferior a 6.5V o sistema fica sem alimentação suficiente para agir de acordo com a especificação.

Estes resultados são uma expectativa de pior caso para as situações em que as Paragens tenham de ser alimentadas por baterias de 9.0V.

Este teste, apesar de muito simples revelou-se um pouco custoso em termos de cronometração e reserva de recursos. Utilizou-se os leds das plataformas para sinalizarem quando estas estão a ser alimentadas. Quando os leds se apagam, presumivelmente, os módulos deixam de ser alimentados.

6.4 - Estudo de Campo

Para concluir o projecto de um sistema de monitorização da qualidade do ar utilizando redes sem fios oportunistas procedeu-se a um estudo de campo. Neste estudo, relaciona-se uma situação prática do dia-a-dia da infra-estrutura de transportes com o sistema de monitorização projectado.

A figura [6.5](#) apresenta uma imagem retirada do *Google Earth* que corresponde à Rua Roberto Frias, Porto, frente à FEUP. A mesma possui duas Paragens de interesse para este estudo. São elas a “Faculdade de Economia” e a “Faculdade de Engenharia” que distam cerca de 410m. Esta distância é muito para além do alcance de uma antena que implementa o IEEE 802.15.4 para redes ZigBee pelo que não irão interferir entre si. Por outro lado, em situações normais de trânsito, o percurso entre ambas as Paragens dura em média 1.05 minutos.

Seleccionou-se dois Autocarros que se aproximam destas Paragens. Um dos Autocarros realiza paragem em ambas as Paragens de Autocarro e o outro apenas realiza paragem na “Faculdade de Engenharia”.

Serve este estudo de campo para verificar o cumprimento dos seguintes requisitos:

- Capacidade do *ZigBee Coordinator* iniciar PAN;
- Capacidade do *ZigBee RFD* rastrear e encontrar PAN;
- Capacidade do *ZigBee RFD* se associar a PAN encontrada;
- Capacidade de *ZigBee Coordinator* enviar pedidos de ID_Estacao com sucesso;
- Capacidade de *ZigBee RFD* receber pedido de ID_Estacao e responder com sucesso;
- Capacidade de *ZigBee Coordinator* estudar o ID_Estacao recebido e responder em conformidade: pedir histórico ou terminar a conexão.
- Capacidade de *ZigBee Coordinator* enviar pedido de histórico com sucesso;
- Capacidade do *ZigBee RFD* receber pedido de histórico e enviar o mesmo com sucesso;
- Capacidade de *ZigBee Coordinator* receber e armazenar o histórico com sucesso;
- Capacidade de enviar mensagens de configuração;

- Capacidade de se realizar as comunicações em tempo útil: tendo em conta a aproximação e afastamento dos Autocarros das Paragens;
- Capacidade de adquirir e armazenar históricos periodicamente.

Pretende-se averiguar o cumprimento dos requisitos supra indicados nas condições do percurso demarcado. As situações de trânsito são aleatórias: podendo haver a necessidade de acelerar ou abrandar o veículo e mesmo parar prolongadamente em fila de trânsito.

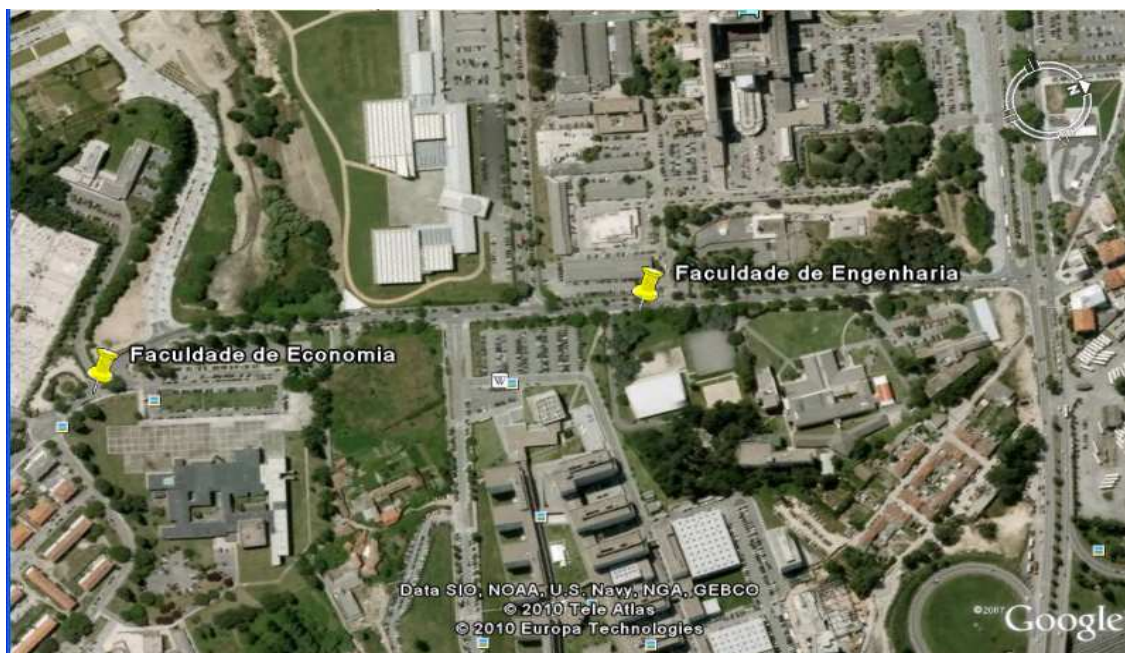


Figura 6.5 - Disposição geográfica das Paragens.

6.6.1- Preparação

A elaboração deste estudo de campo envolve um planeamento em três áreas:

- Infra-Estrutura de Transporte públicos;
- Sistema de Monitorização da Qualidade do Ar;
- Recursos Humanos

No que respeita à infra-estrutura de transportes, configurou-se os módulos com as informações das tabelas [6.2](#) e [6.3](#) as quais são distribuídas pelos respectivos espaços geográficos. Seleccionados dois Autocarros de interesse no estudo, averiguou-se que o tempo de espera entre autocarros nas Paragens varia entre os 10 e os 25 minutos e que o tempo médio de percurso entre as Paragens, como já referido 1.05 minutos.

Tabela 6.2 – Identificação de Paragens.

Paragem (ID_Estacao)	Localização Geográfica
75	Faculdade de Engenharia
78	Faculdade de Economia

Tabela 6.3 – Identificação de Autocarros.

Autocarro (ID_BUS)	Fragmento de Itinerário de Recolha (ID_Estacao)
60	...75, 78...
70	...75...

Relativamente ao Sistema de Monitorização de Qualidade do ar foi definido um tempo de espera entre aquisições e armazenamento de 3 minutos. Pretende-se evitar aquisições muito repetitivas mas ao mesmo tempo proporcionar um histórico com, no mínimo, três instantes temporais em cada Paragem. Como as Paragens em causa não têm alimentação própria são utilizadas pilhas recarregáveis de 9V para a alimentação dos módulos.

Cada Paragem possui uma Estação de Monitorização do Ar diferente, tais registam-se na tabela [6.4](#).

Tabela 6.4 – Configuração das Estações de Qualidade do Ar.

Estação de Qualidade do Ar (ID_Estacao)	Número de Sensores n	Identificação do Sensor (ID_SENSORn)
75	2	1, 2
78	2	1, 3

Como referido, visto as Paragens não possuírem alimentação própria, nos termos deste estudo, coloca-se um *sleep mode* de meio minuto. Este registo visa garantir que a Paragem não perca o Autocarro caso este se encontre nas imediações.

Por fim, uma vez que os módulos existentes nas Paragens permanecem em locais de acesso público, para evitar situações desagradáveis foi necessários meios humanos que garantam a integridade e segurança dos equipamentos. Para tal contou-se com a colaboração de duas pessoas a marcar presença nas Paragens. Pelas mesmas razões, uma terceira pessoa faz-se acompanhar de outro módulo no interior do veículo.

A única interferência que os três recursos humanos têm com o sistema desenvolvido é o de ligar os módulos no “início da contagem dos tempos”.

6.6.2- Comportamento do Sistema

Começou-se por estudar o comportamento do Autocarro com identificação 60 o qual deve realizar paragem para recolha de passageiros em ambas as Paragens e como tal, recolher os históricos de ambas as Estações de Monitorização do Ar. Durante o percurso o veículo não manteve a sua velocidade constante mas também, como já haveria sido testado, a velocidade do Autocarro não influencia a distância a partir da qual o par Autocarro e Paragem conseguem se associar. Assim sendo, ao aproximar-se da primeira paragem “Faculdade de Economia” a Paragem associou-se ao Autocarro, e realizou-se a recolha do histórico. No final, o Autocarro enviou a confirmação de recepção de histórico com sucesso e encerrou-se a comunicação. O veículo prosseguiu a sua marcha até a Paragem seguinte “Faculdade de Engenharia” onde, tal como na paragem anterior, realizou a troca de mensagens com sucesso.

De seguida, estudou-se o comportamento do Autocarro com identificação 70 cujo comportamento foi em tudo idêntico ao caso anterior com a diferença de a primeira Paragem do percurso não ser uma paragem de recolha. As comunicações foram bem sucedidas, e a troca de mensagens correctamente executada.

Conseguiu-se assim validar a ideia conceptual desta dissertação: à medida que o veículo se aproxima das estações, recolhe e armazena os dados que nela estão contidos, com vista a um futuro processamento dessa informação. Consequentemente, validou-se a utilização da tecnologia *ZigBee* na implementação deste sistema. Na figura [6.6](#), apresenta-se a interface gráfica disponível pelo software ZenaTM com o auxílio do *sniffer* conectado a um computador portátil que acompanhou o estudo no interior do veículo. A mesma exemplifica o caso em que o Autocarro 60 se aproxima da Paragem 75, de cor azul, e dela recolhe dados.

Tendo em conta o ambiente urbano em que este estudo de campo se submeteu, não se registaram diferenças significativas comparativamente ao funcionamento no ambiente rural registado no teste para diferentes velocidades. As comunicações e a troca de mensagens foram bem sucedidas.

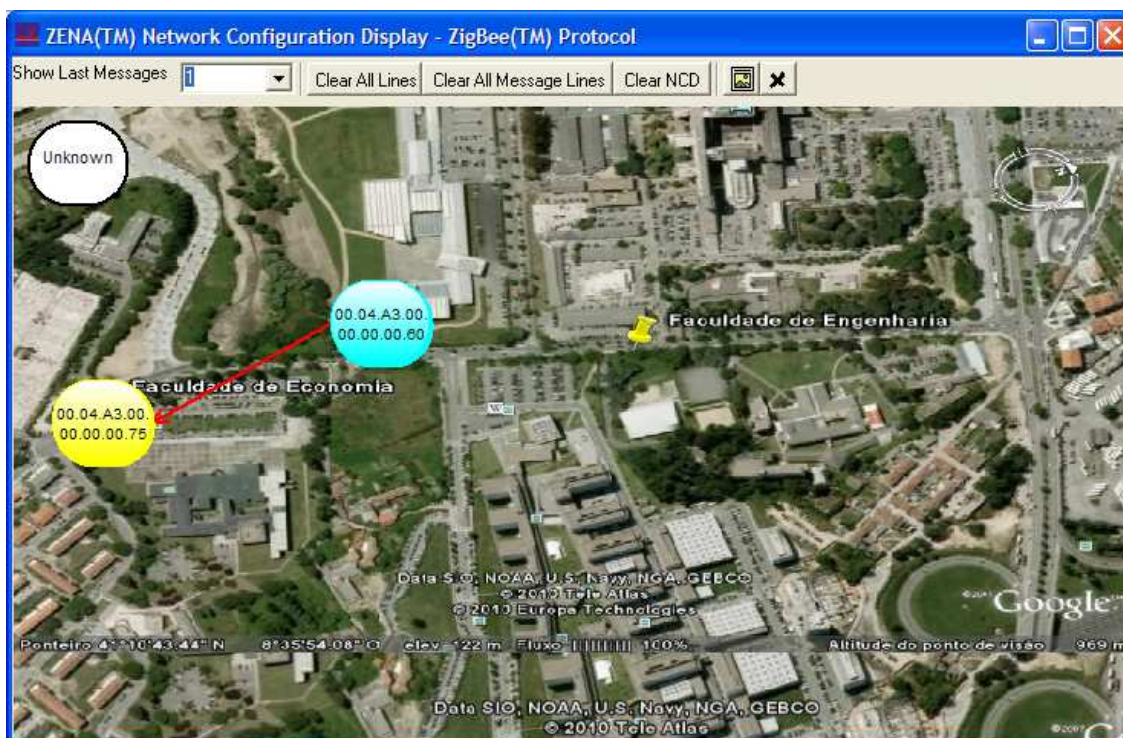


Figura 6.6 - Estudo de Campo: conexão Autocarro - Paragem de Autocarro.

Segue-se os principais pacotes captados na situação da figura 6.6, durante o percurso de teste.

Ao aproximar da Paragem “Faculdade de Engenharia” o sniffer começa a captar as notificações de dispositivo órfão (ZigBee RFD) que se quer associar a uma rede (ZigBee Coordinator), figura 6.7. Na figura 6.8, verifica-se a inicialização de uma PAN com o endereço 0x291E à qual o módulo ZigBee RFD com o endereço 0x7973 associa.

De seguida, o ZigBee Coordinator pede o endereço de rede do seu módulo após o que o recebe, ficando assim em condições de com ele trocar mensagens, figura 6.9. Como tal, o Autocarro pede a identificação da Paragem ao que esta última responde, figura 6.10. Nesta fase o Autocarro avalia se deve recolher dados e em resultado dessa avaliação pede o histórico de dados, após o que o recebe, figura 6.11. Por fim, o Autocarro envia configurações no sentido de por um lado informar que recolheu e armazenou o histórico (algo que se não tivesse ocorrido, esta trama jamais seria enviada) e por outro, que este pode libertar memória para armazenar novas aquisições, figura 6.12.

Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control	Seq Num	Dest PAN	Dest Addr	Source PAN	Source Address	Orphan Notification	FCS
00046	+2650800 =72538976	20	Type Sec Pend ACK IPAN CMD N N N N	0x35	0xFFFF	0xFFFF	0xFFFF	0x0004A30000000075	Orphan Notification	RSSI Corr CRC -05 0x6B OK
00047	+2711312 =75250288	20	Type Sec Pend ACK IPAN CMD N N N N	0x36	0xFFFF	0xFFFF	0xFFFF	0x0004A30000000075	Orphan Notification	RSSI Corr CRC -03 0x69 OK
00048	+2649968 =77900256	20	Type Sec Pend ACK IPAN CMD N N N N	0x37	0xFFFF	0xFFFF	0xFFFF	0x0004A30000000075	Orphan Notification	RSSI Corr CRC -08 0x69 OK

Figura 6.7 - Notificações de nó órfão.

Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq	Dest	Dest	Beacon	FCS					
00049	+1305040 =79205296	10	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Num	PAN	Addr	Request	RSSI	Corr	CRC			
			CMD	N	N	N	N	0x96	0xFFFF	0xFFFF		+10	0x68	OK			
Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq	Dest	Dest	Source	Source Address	Orphan	FCS			
00050	+1345808 =80551104	20	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Num	PAN	Addr	PAN		Notification	RSSI	Corr	CRC	
			CMD	N	N	N	N	0x38	0xFFFF	0xFFFF	0xFFFF	0x0004A30000000075		-09	0x68	OK	
Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq	Dest	Destination Address		Source	Source Address	Coordinator Realignment			
00051	+12080 =80563184	33	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Num	PAN	Addr		PAN			PANID	ParentAddr	Ch
			CMD	N	N	Y	N	0x97	0xFFFF	0x0004A30000000075		0x291E	0x0004A30000000060	0x291E 0x0000			
Channel	ShortAddr	FCS															
0x11	0x7973	+09 0x68 OK															
Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq	FCS								
00052	+1936 =80565120	5	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Num	RSSI	Corr	CRC						
			ACK	N	N	N	N	0x97	-09	0x6A	OK						
Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq	Dest	Dest	Source	Data Request	FCS				
00053	+27120 =80592240	12	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Num	PAN	Addr	Addr		RSSI	Corr	CRC		
			CMD	N	N	Y	Y	0x39	0x291E	0x0000	0x7973		-09	0x68	OK		
Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq	FCS								
00054	+848 =80593088	5	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Num	RSSI	Corr	CRC						
			ACK	N	Y	N	N	0x39	+08	0x69	OK						

Figura 6.8 - Associação de ZigBee RFD à rede.

Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq	Dest	Dest	Source	NWK Frame Control				Dest	Source	Radius	Seq																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
00059	+8080 =80637568	38	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Num	PAN	Addr	0x0000	Type	Ver	Route	Sec	Addr	Addr	0x0000	0x0A	0x8C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
			DATA	N	N	Y	Y	0x9B	0x291E	0x7973	0x0000	DAT	0x1	EN	N	0xFFFF	0x0000	0x0A	0x8C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
APS Frame Control			Type	Deliv	Mode	Sec	ACK	Dest	Cluster	Profile	Source	AF Header	Transaction 1	Data 1				FCS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			DAT	BRD	N/A	N	N	0x00	0x00	0x0000	0x00	Cnt	Type	SN	Length	0x75	0x00	0x00	0x00	0x00																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
																0x01	MSG	0x00	0x0A	0xA3	0x04	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0

Figura 6.9 - Troca de endereço de rede.

Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq	Dest	Dest	Source	NWK Frame Control				Dest	Source	Radius	Seq
00074	+20416 =81522240	34	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Num	PAN	Addr	Addr	Type	Ver	Route	Sec	Addr	Addr	0x0A	0xB9
			DATA	N	N	Y	Y	0x3F	0x291E	0x0000	0x7973	DAT	0x1	EN	N	0x0000	0x7973	0x0A	0xB9

APS Frame Control			Dest	Cluster	Profile	Source	AF Header	Transaction 1				Error 1	Data 1	FCS					
Type	Deliv	Mode	Sec	ACK	EP	ID	EP	Cnt	Type	SN	Cmd	Type	Attrib		0x02	0x37	RSSI	Corr	CRC
DAT	UNI	N/A	N	N	0x09	0x20	0xFFFF	0x03	0x01	KVP	0x01	GetRsp	CString	0x0001	Success	0x38	-09	0x6A	OK

Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq	Dest	Dest	Source	NWK Frame Control				Dest	Source	Radius	Seq
00078	+7712 =83425328	30	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Num	PAN	Addr	Addr	Type	Ver	Route	Sec	Addr	Addr	0x0A	0x8F
			DATA	N	N	Y	Y	0x9F	0x291E	0x7973	0x0000	DAT	0x1	EN	N	0x7973	0x0000	0x0A	0x8F

APS Frame Control			Dest	Cluster	Profile	Source	AF Header	Transaction 1				FCS							
Type	Deliv	Mode	Sec	ACK	EP	ID	EP	Cnt	Type	SN	Cmd	Type	Attrib				RSSI	Corr	CRC
DAT	UNI	N/A	N	N	0x03	0x20	0xFFFF	0x09	0x01	KVP	0x02	GetAck	CString	0x0000			+12	0x66	OK

Figura 6.10 - Pedido de Identificação de Paragem de Autocarro e resposta ao pedido.

Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq Num	Dest PAN	Dest Addr	Source Addr	NWK Frame Control				Dest Addr	Source Addr	Radius	Seq Num
00078	+7712 =83425328	30	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Seq Num 0x9F	Dest PAN 0x291E	Dest Addr 0x7973	Source Addr 0x0000	Type	Ver	Route	Sec	Dest Addr 0x7973	Source Addr 0x0000	Radius 0x0A	Seq Num 0x8F
			DATA	N	N	Y	Y					DAT	0x1	EN	N				
APS Frame Control					Dest EP	Cluster ID	Profile ID	Source EP	AF Header Cnt	Transaction 1				FCS					
Type	Deliv	Mode	Sec	ACK	EP	ID	ID	EP	Type	SN	Cmd	Type	Attrib	RSSI	Corr	CRC			
DAT	UNI	N/A	N	N	0x03	0x20	0xFFFF	0x09	0x01	KVP	0x02	GetAck	CString	0x0000	+12	0x66	OK		

Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq Num	Dest PAN	Dest Addr	Source Addr	NWK Frame Control				Dest Addr	Source Addr	Radius	Seq Num		
00083	+22000 =83531296	68	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Seq Num 0x42	Dest PAN 0x291E	Dest Addr 0x0000	Source Addr 0x7973	Type	Ver	Route	Sec	Dest Addr 0x0000	Source Addr 0x7973	Radius 0x0A	Seq Num 0xBA		
			DATA	N	N	Y	Y					DAT	0x1	EN	N						
APS Frame Control					Dest EP	Cluster ID	Profile ID	Source EP	AF Header Cnt	Transaction 1				Error 1							
Type	Deliv	Mode	Sec	ACK	EP	ID	ID	EP	Type	SN	Cmd	Type	Attrib								
DAT	UNI	N/A	N	N	0x09	0x20	0xFFFF	0x03	0x01	KVP	0x02	GetRsp	CString	0x0000	Success						
Data 1																	FCS				
0x24	0x37	0x38	0x20	0x31	0x20	0x32	0x38	0x32	0x38	0x20	0x33	0x36	0x37	0x34	0x20	0x31	0x7C	0x33	RSSI	Corr	CRC
0x36	0x37	0x38	0x20	0x30	0x20	0x33	0x20	0x30	0x7C	0x31	0x20	0x30	0x20	0x33	0x20	0x30	0x7C	-10	0x69	OK	

Figura 6.11 - Pedido de histórico de leituras e respectiva recolha.

Frame	Time(us)	Len	MAC Frame Control					Seq	Dest	Dest Addr	Source Addr	NWK Frame Control				Dest Addr	Source Addr	Radius	Seq Num
00087	+8192 =85435104	36	Type	Sec	Pend	ACK	IPAN	Num	PAN	Addr	Addr	Type	Ver	Route	Sec	Addr	Addr	0x0A	0x90
			DATA	N	N	Y	Y	0xA1	0x291E	0x7973	0x0000	DAT	0x1	EN	N	0x7973	0x0000	0x0A	0x90
APS Frame Control			Dest EP	Cluster ID	Profile ID	Source EP	AF Header Cnt	Transaction 1				Error 1		Data 1		FCS			
Type	Deliv	Mode	Sec	ACK			Type	SN	Cmd	Type	Attrib								
DAT	UNI	N/A	N	N	0x03	0x20	0xFFFF	0x09	0x01	KVP	0x03	GetRsp	CString	0x0002	Success	0x04 0x37 0x38	RSSI 0x69 OK		
																0x20 0x31	+12 0x69 OK		

Figura 6.12 - Envio de configurações

Na figura 6.13 sumariza-se o resultado dos principais requisitos deste estudo.

No	Teste	Controlo	Resultado
8	Estudo de Campo	Capacidade do ZigBee <i>Coordinator</i> iniciar PAN	☒
		Capacidade do ZigBee <i>RFD</i> rastrear e encontrar PAN	☒
		Capacidade do ZigBee <i>RFD</i> se associar a PAN encontrada	☒
		Capacidade de ZigBee <i>Coordinator</i> enviar pedidos de ID_Estacao com sucesso	☒
		Capacidade de ZigBee <i>RFD</i> receber pedido de ID_Estacao e responder com sucesso	☒
		Capacidade de ZigBee <i>Coordinator</i> estudar o ID_Estacao recebido e responder em conformidade: pedir histórico ou terminar a conexão	☒
		Capacidade de ZigBee <i>Coordinator</i> enviar pedido de histórico com sucesso	☒
		Capacidade do ZigBee <i>RFD</i> receber pedido de histórico e enviar o mesmo com sucesso	☒
		Capacidade de ZigBee <i>Coordinator</i> receber e armazenar o histórico com sucesso	☒
		Capacidade de ZigBee <i>Coordinator</i> enviar mensagens de configuração	☒
		Capacidade de se realizar as comunicações em tempo útil: tendo em conta a aproximação e afastamento dos Autocarros das Paragens	☒
		Capacidade de adquirir e armazenar históricos periodicamente	☒

Figura 6.13 - Checklist de acompanhamento do estudo de campo.

6.6.3- Dificuldades Encontradas

A principal dificuldade encontrada neste estudo de campo foi a realização do mesmo num meio urbano. De facto, o trânsito das estradas num meio urbano é um pouco injusto, tendo em conta que não é possível ser muito criativo nos testes a realizar sem que não se ponha em causa a segurança dos restantes utilizadores da estrada. Por outro lado, o veículo utilizado no teste corresponde a um veículo ligeiro de passageiros e não a um veículo colectivo de passageiros, por este motivo, na rua em questão, não foi possível realizar paragem junto às Paragens para simular a recolha de passageiros e consequentemente de dados. Ainda assim, foi possível executar uma marcha a uma velocidade relativamente reduzida (20Km/h), junto às Paragens, obtendo-se os resultados esperados.

6.7. Sumário

Neste capítulo documentou-se um conjunto de testes a que o sistema desenvolvido foi submetido no sentido de validar a presente solução. De um modo geral, obteve-se os resultados esperados salvo algumas surpresas ao nível dos testes de velocidade e das eventuais interferências do sistema.

Relativamente ao estudo de campo, este também foi bem sucedido mas não representou nenhuma surpresa visto os testes anteriores terem sido exaustivos ao ponto de simular todas as eventuais situações e o par Autocarro e Paragem poderiam sofrer na prática.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

No presente capítulo sumariza-se as principais conclusões e melhorias do sistema projectado. Também se apresenta trabalhos futuros no âmbito desta dissertação.

7.1 Conclusões

O objectivo desta dissertação foi de desenvolvimento de parte de um sistema de monitorização da qualidade do ar utilizando redes sem fios oportunistas com um requisito fundamental: a utilização da infra-estrutura de transportes públicos de uma cidade.

Após um estudo atento do funcionamento da infra-estrutura de transportes públicos concluiu-se que esse objectivo é plausível tendo em conta que as Paragens se dispersam pela planta de uma cidade e que existem vários Autocarros a atravessar os vários pontos dessa dispersão. Os Autocarros não realizam, propriamente, trajectórias aleatórias pela cidade, mas sim, o percurso correspondente a um itinerário que no fundo é um conjunto de Paragens a visitar. Basta distribuir pelas Paragens, Estações de Monitorização da Qualidade do Ar, que periodicamente adquirem e armazenam as leituras dos seus sensores até que um Autocarro as solicite.

Este conceito levou a um estudo exaustivo de várias hipóteses e situações que poderiam comprometer o correcto funcionamento do sistema. Propôs-se uma arquitectura que demonstrou responder aos requisitos analisados a qual demonstrou robustez no estudo de campo efectuado.

Em termos de Redes Wireless ZigBee concluiu-se que é possível, com uma rede de baixo custo e de consumo reduzido, implementar sistemas de monitorização simples a operarem em ambientes agressivos. De facto foi possível constatar que a rede implementada comportou-se com robustez nos vários testes realizados, perdendo a sua performance perante

interferências de dispositivos com a norma IEEE 802.11g e na propagação de sinal quando os módulos se encontravam envolvidos com interfaces metálicas.

Ao nível da aplicação, os testes realizados demonstraram ser possível a monitorização da qualidade do ar utilizando redes sem-fios oportunistas. Através de um módulo móvel (Autocarro) que varia constantemente a sua posição geográfica ao longo do seu percurso pela cidade e, conseqüentemente, a topologia da rede, foi possível convidar Paragens para a recolha de informação no final das quais são convidadas a sair. Utiliza-se assim, oportunistamente as Paragens.

Nos testes realizados à velocidade desse veículo móvel, conclui-se que apenas para velocidades superiores a 40Km/h se verificam falhas ao nível da finalização do diálogo entre os módulos ZigBee, mas apenas no caso em que o diálogo é, por definição, mais prolongado.

Ao nível da gestão de energia dos módulos, esta depende de cada Paragem de Autocarro e da importância estratégica que esta tem para a infra-estrutura de transportes, isto é a frequência de Paragem para a recolha de passageiros que é útil para que o Autocarro tenha tempo para a realização da recolha de históricos e completar o diálogo iniciado com a Paragem. Mas também se concluiu que para velocidades reduzidas, até 40 Km/h sem paragem é possível a recolha de históricos. Portanto, a alimentação dos módulos e sensores de cada Paragem e a utilização do modo *sleep* vai depender da racionalização desses aspectos.

Em suma, esta dissertação permitiu validar o conceito de utilização de um veículo móvel para a recolha de dados armazenados numa área geográfica alargada através do projecto de redes ZigBee de baixo custo (cada plataforma sem-fios custa cerca de 90€), baixo consumo (cerca de 1mW), baixa taxa de transmissão de dados (250 Kbps) e de curto alcance (entre 30 a 70 metros). A integração na infra-estrutura de transportes públicos permitiu alargar a área de cobertura geográfica.

7.2 Melhoramentos

O sistema projectado de monitorização da qualidade do ar integrado na infra-estrutura de transportes, no geral, mostrou-se robusto apesar das limitações do hardware disponibilizado. Contudo, talvez a adopção de outro tipo de antena que não uma embebida em PCB, torna-se o sistema mais imune ao ruído e com maior alcance geográfico.

No que à infra-estrutura de transportes públicos diz respeito, por exemplo a infra-estrutura dos STCP, muitas das Paragens não possuem alimentação própria nem um contador decrescente de tempo de espera para o próximo veículo. É certo que no caso dos STCP é mais difícil prever com exactidão os minutos que faltam para a chegada de um veículo devido às situações de trânsito no interior de uma cidade. Contudo, configurando as Paragens com o horário de passagem prevista dos Autocarros iria permitir, no sistema proposto desta dissertação, que os módulos permanecessem adormecidos até à hora prevista de passagem de

autocarros. Assim, em torno da hora prevista, os módulos das Paragens acordariam e ficariam à espera do Autocarro. Com isto, minimizava-se tentativas infrutíferas de pesquisa de Autocarros e diminuía-se desperdícios de energia.

7.3 Trabalhos Futuros

Nesta dissertação desenvolveu-se parte de um sistema de monitorização da qualidade do ar de uma cidade que integra oportunamente a sua infra-estrutura de transportes públicos nomeadamente as Paragens e os Autocarros. As Paragens são locais onde se armazenam dados de qualidade do ar e os Autocarros procedem à recolha desses dados à medida que realizam o seu percurso pela cidade. Contudo, o desenvolvimento de unidades de processamento dos dados recolhidos pelos Autocarros não era um objectivo desta dissertação.

Deste modo, para desenvolver a totalidade deste sistema de monitorização da qualidade do ar resta implementar a Estação de Processamento Central para realizar o tratamento dos dados recolhidos pelos Autocarros ao longo dos seus percursos. Ao mesmo tempo, o resultado do processamento dessa informação poderá ser disponibilizado numa interface gráfica *online* para consulta dos utilizadores. Com isto seria possível adaptar o sistema numa determinada cidade usufruindo da sua geografia e infra-estrutura de transportes públicos.

Também se sugere a configuração dos módulos existentes nas Paragens com um horário de aproximação prevista dos Autocarros com vista a que estes cumpram a sua especificação em torno da hora prevista de chegada de um veículo.

De um modo geral, nesta dissertação utiliza-se o conceito de um veículo capaz de recolher e transportar informação entre pontos geograficamente distantes. A velocidade de transmissão entre esses pontos geográficos é condicionada pela velocidade dos veículos pelo que o conceito é válido quando a natureza dos dados a serem transportados não apresenta requisitos de tempo real críticos. Assim, é possível imaginar a utilização deste conceito noutras aplicações como por exemplo: a recolha e transporte de informação em locais de difícil acesso para Humanos (percursos de longas distâncias, terrenos irregulares, ...) através da utilização oportunista de veículos (aéreos ou terrestres), robots ou plataformas móveis (elevadores, tapetes rolantes, ...); ou a recolha e transporte de informação afastada no tempo (por exemplo, a recolha mensal de leitura do contador de gás para efeitos de facturação).

Anexos

Funções da Aplicação

Neste anexo descreve-se as principais funções implementadas nas plataformas dos Autocarros e das Paragens.

A.1 Autocarro

Autocarro			
Função	input	output	Descrição
Setup_Bus()	Itinerário: <i>ID_Estacao</i> e <i>Estado_Recolha</i> <i>ID_BUS</i>	TRUE	Esta função configura o Autocarro com um ID_BUS que o identifique e com um itinerário que consiste na lista de ID_Estacoes destinadas a recolha de históricos. Inerente a cada ID_Estacao existe um Estado_Recolha (0 enquanto ainda não houve recolha, quando já terá existido recolha). Objectivo: Implementação de checklist de percurso.
Ask_ID_Estacao()	-	ID_Estacao_Actual	Cada estação possui um ID_Estacao único. O autocarro quando conectado a uma estação pergunta qual o seu ID_Estacao. A resposta da estação irá actualizar a variável interna do autocarro ID_Estacao_Actual. Objectivo: O autocarro ter conhecimento da estação de que encontra próximo, em cada momento.
Verify_ID_Estacao()	ID_Estacao_Actual	TRUE or FALSE	O autocarro verifica se no seu itinerário a estação ID_Estacao_Actual é uma das que terá de realizar recolha e se nela já terá realizado recolha. Se a ID_Estacao_Actual não for encontrada na lista de pesquisa esta função retorna imediatamente FALSE. O mesmo acontece no caso de a ID_Estacao_Actual já possuir uma indicação de recolha. No caso de a ID_Estacao_Actual existir e nela não existir indicação de recolha, esta função retorna TRUE.

			Objectivo: Verificar se a estação consta na checklist de recolha.
<i>Ask_Historic()</i>	-	<i>askHistoricByBus</i>	O autocarro pede à <i>ID_Estacao_Actual</i> o envio do respectivo historic através da activação da variável interna <i>askHistoricByBus</i>. Esta variável quando activada informa toda a aplicação que o autocarro terá pedido e aguarda histórico da <i>ID_Estacao_Actual</i>. Noutras situações, esta variável estará desactivada (ie. FALSE). Objectivo: Pedido de envio de histórico da estação actual e indicação do estado de espera da respectiva resposta.
<i>Receive_Historic()</i>	 historic 	<i>rechHistoricByStation</i> <i>ID_Estacao</i> historic <i>timeOfCollectionByBus</i>	O autocarro recebe a trama correspondente ao historic da <i>ID_Estacao</i> e regista o <i>timeOfCollectionByBus</i> após chamar a função <i>GetTimeOfCollection()</i>. Armazena este agrupamento de dados na memória e no final activa a variável <i>rechHistoricByStation</i> 1, indicando que terá recebido e armazenado o histórico de dados correspondente com sucesso. Objectivo: Armazenar na memória do autocarro os dados recolhidos em cada estação (<i>ID_Estacao</i>, <i>historic</i> e <i>timeOfCollectionByBus</i>).
<i>GetTimeOfCollection()</i>	-	<i>timeOfCollectionByBus</i>	O autocarro regista o instante <i>timeOfCollectionByBus</i> em que termina de recolher dados em cada estação. Objectivo: Estimação os instantes temporais de aquisição da leitura dos sensores constantes no histórico de cada estação. (A realizar na estação de processamento central e sabendo que são periódicos).
<i>Check_Station()</i>	<i>rechHistoricByStation</i> <i>ID_Estacao_Actual</i>	<i>Estado_Recolha</i> (da <i>ID_Estacao_Actual</i>)	Quando <i>rechHistoricByStation</i> está activo, o que significa que o autocarro terá recolhido e armazenado o historic de uma <i>ID_Estacao_Actual</i>, esta função vai permitir actualizar o respectivo <i>Estado_Recolha</i>. (Estaria a 0 e passará a estar a 1) Objectivo: Acompanhar o itinerário de recolha ao autocarro para garantir que este não recolha históricos de estações que não lhe estejam destinadas nem que o façam mais do

			que uma vez (por itinerário).
<i>Check_Connection()</i>	<i>askHistoricByBus</i>	<i>Connection_Ok</i> or <i>Connection_Failed</i>	Esta função permite monitorizar o estado da conexão enquanto existe troca de mensagens e históricos. Enquanto <i>askHistoricByBus</i> está activo, o que significa que o Bus enviou pedido de histórico e aguarda resposta e se não houver falha de conexão esta função retorna <i>Connection_OK</i>. Em caso de falha de comunicação enquanto <i>askHistoricByBus</i> se encontra activo a função retorna <i>Connection_Failed</i> e leva a aplicação para um estado seguro: “abortar missão”². Objectivo: Garantir que em caso de falha de comunicação aquando da transmissão de dados “críticos” (historic) a aplicação volte a tentar nova conexão, armazene históricos danificados e envie mensagens falsas.
<i>Abort_Communication()</i>	<i>ID_Estacao_Actual</i>		Basicamente vai impedir que o autocarro chame a função <i>Ask_Historic()</i> para o mesmo <i>ID_Estacao_Actual</i> . 2
<i>Config_Station()</i>	<i>ID_Estacao_Actual</i> <i>timeAquisition</i> <i>deleteLastHistoric</i>		Esta função permitirá configurar a <i>ID_Estacao_Actual</i> no que respeita ao período entre aquisições <i>timeAquisition</i> e apagar o histórico memorizado na estação com vista a libertar a memória ocupada para o armazenamento de novos dados. Objectivo: Reconfigurar cada <i>ID_Estacao</i> após uma recolha de histórica bem sucedida.

A.2 Paragens

Paragens			
Função	input	output	Descrição
<i>Setup_Station()</i>	<i>ID_Estacao</i> <i>N_Sensor</i> <i>ID_Sensor</i> <i>timeAquisition</i> <i>timeRequestingData</i>	TRUE	Esta função configura a paragem com um <i>ID_Estacao</i> que a identifica das restantes. Configura o número <i>N_Sensor</i> e tipo <i>ID_Sensor</i> que existe nessa estação e ainda o intervalo entre aquisições <i>timeAquisition</i>.

			É também definido o período de tempo em que a estação rastreia a existência de um autocarro com o qual tentará estabelecer conexão e/ou pedidos de informação. Objectivo: Configuração inicial da Estação de Monitorização do ar.
<i>send_ID_Estacao()</i>	-	<i>ID_Estacao</i>	Esta função permite o envio do <i>ID_Estacao</i> para o autocarro. Objectivo: A estação de paragem apresenta-se ao autocarro.
<i>Read_Historic()</i>	-	<i>*ptr_firstposition</i> <i>*ptr_lastposition</i> <i>count_aquisitions</i> <i>historic</i> 	Esta função essencialmente delimita as posições de memória que representam informação válida referente ao historico de leituras. Objectivo: Construir a trama de históricos a enviar ao autocarro
<i>send_Historic()</i>	 <i>historic</i> 	<i>sendHistoric</i>	A <i>ID_Estacao</i> responde ao pedido de envio do seu historico para o autocarro. O envio do historico para o autocarro é sinalizado através da variável <i>sendHistoric</i> que informa a aplicação que corre na paragem de que esta se encontra a transmitir dados. <i>sendHistoric</i> também impede a aquisição e armazenamento da leitura de sensores enquanto se esta a ler e transmitir um historico. Objectivo: Envio do historico para o autocarro
<i>Read_Sensor()</i>	<i>N_Sensor</i> <i>ID_Sensor</i> <i>ChannelAdc</i> <i>timeAquisition</i>	<i>(ID_Sensor</i> <i>Data_ID_Sensor)</i> <i>xN_Sensor</i>	<i>Read_Sensor()</i> periodicamente, <i>timeAquisition</i>, realiza a leitura dos sensores de monitorização de qualidade do ar. Começa pelo <i>ID_Sensor</i> mais baixo e chama a função <i>Read_ADC()</i> para ler o canal <i>channelADC</i> correspondente. A saída varia consoante o número de sensores da estação de monitorização.
<i>Read_ADC()</i>	<i>ID_Sensor</i> <i>ChannelADC</i>	<i>ID_Sensor</i> <i>Data_ID_Sensor</i>	

		or	ID_Estacao Data_ID_Sensor ID_Estacao ... Objectivo: Construção de histórico de leituras
<i>Check_Connection()</i>	<i>sendHistoric</i>	<i>Connection_Ok</i> or <i>Connection_Failed</i>	Esta função permite monitorizar o estado da conexão enquanto existe troca de mensagens e históricos. Enquanto <i>sendHistoric</i> está activo, o que significa que a paragem recebeu um pedido de envio do seu histórico para o bus, testa-se se a estação consegue comunicar com o autocarro. Se tudo estiver bem, a função retorna <i>Connection_Ok</i> . Em caso de falha de comunicação a função retorna <i>Connection_Failed</i> e leva a aplicação para um estado seguro: “abortar missão” ² . Objectivo: Garantir que em a estação de monitorização mantenha o seu histórico no caso de falha no envio de dados.
<i>Abort_Communication()</i>	-	<i>sendHistoric</i> <i>historic</i>	Cancela a comunicação com o autocarro e destrói a trama <i>historic</i> construída como resposta ao pedido. Desactiva <i>sendHistoric</i> , continua ciclo de aquisição/armazenamento.
<i>recConfig_ByBus()</i>	<i>ID_Estacao</i> <i>timeAquisition</i> <i>deleteLastHistoric</i>	-	A estação recebe um comando de configuração após o envio/recebimento com sucesso de um histórico de leituras. Esse comando contém um <i>timeAquisition</i> que pode ser “default” e a estação continua com o <i>timeAquisition</i> configurado em <i>SetupStation()</i> ou um qualquer outro valor válido. <i>DeleteLastHistoric</i> basicamente vai permitir que a <i>ID_Estacao</i> desocupe a memória ocupada até ao momento com vista a memorizar nova informação. Objectivo: Reconfigurar cada <i>ID_Estacao</i> após uma recolha de histórica bem sucedida.
<i>Abort_Communication()</i>	<i>ID_Estacao_Actual</i>		Basicamente vai impedir que o autocarro chame a função <i>Ask_Historic()</i> para o mesmo <i>ID_Estacao_Actual</i> . 2
<i>Config_Station()</i>	<i>ID_Estacao_Actual</i>		Esta função permitirá configurar a <i>ID_Estacao_Actual</i> no que respeita ao

	<i>timeAquisition</i> <i>deleteLastHistoric</i>		período entre aquisições <i>timeAquisition</i> e apagar o histórico memorizado na estação com vista a libertar a memória ocupada para o armazenamento de novos dados. Objectivo: Reconfigurar cada <i>ID_Estacao</i> após uma recolha de histórica bem sucedida.
--	--	--	--

A.3 Microchip Stack for ZigBee Protocol

Microchip Stack Source Files. Directório ZigBeeStack	
File Name	Descrição
SymbolTime .c, .h	Configura funções temporais para a Microchip Stack for ZigBee Protocol
zAPL .h	Interface com o nível de da Aplicação
zAPS .c, .h	Camada APS do protocolo ZigBee
zigBee .h	Constantes genéricas do Protocol ZigBee
ZigBeeTasks .c , .h	Evolução do programa ao longo da stack
zMAC .h	IEEE 802.15.4 MAC
zMAC_MRF24J40 .c, .h	IEEE 802.15.4 MAC para o transceiver MRF24J40
zNVM .c, .h	Configura a memória não volátil
zNWK .c, .h	Camada NWK do protocolo ZigBee
zPHY .c .h	IEEE 802.15.4 PHY
zPHY_MRF24J40 .c .h	IEEE 802.15.4 PHY para o transceiver MRF24J40
zSecurity .h	Camada de segurança do protocolo ZigBee
zSecurity_MRF24J40 .c, .h	IEEE 802.15.4 MAC para o transceiver MRF24J40
zZDO .c, .h	Camada ZDO do protocolo ZigBee

A.4 Primitivas da Máquina de Estados ZigBee

Forming and Joinig Network		
Dispositivo Lógico	Primitiva	Descrição
FFD	NLME_NETWORK_FORMATION_request	Tentativa de formação da rede
Router or RFD	NLME_JOIN_request. RejoinNetwork == TRUE	Caso o dispositivo determine que já fizera parte da rede tenta adicionar-se como um órfão

Router or RFD	NLME_NETWORK_DISCOVERY_request primitive	Em caso de falha ou no caso de o dispositivo determinar que não fizera parte da rede, tenta adicionar-se como um novo nó após verificar se existe alguma rede disponível.
Router or RFD	NLME_JOIN_request. RejoinNetwork == FALSE	Tenta adicionar-se à rede como um novo nó

Receive Message		
Dispositivo Lógico	Primitiva/função	Descrição
FFD, RFD	APSDE_DATA_indication	Contem informação sobre a mensagem indicando que esta se encontra armazenada no buffer.
FFD, RFD	APLGet()	Extraí cada byte da mensagem do buffer.
FFD, RFD	APLDiscard()	Descarta a mensagem existente no buffer.

Send Message		
Dispositivo Lógico	Primitiva/função	Descrição
FFD, RFD	ZigBeeReady()	Verifica se existe alguma mensagem a ser encaminhada. O protocolo ZigBee trata apenas de uma mensagem em cada momento. Se a função retornar TRUE confirma-se que não existe qualquer outra mensagem a ser encaminhada.
FFD, RFD	ZigBeeBlockTx()	Bloqueia o sistema colocando ZigBeeReady() a FALSE o que indica que se está a tratar uma mensagem.
FFD, RFD	TxBuffer TxData	Carrega-se a informação a enviar no array TxBuffer, usando TxData para indexar o array. Quando termina, TxData deve apontar para a primeira posição depois da mensagem, o que equivale a dizer que TxData corresponde ao comprimento da mensagem a ser enviada.
FFD, RFD	APSDE_DATA_request currentPrimitive = APSDE_DATA_request ZigBeeTasks()	Actualiza-se os parâmetros da primitiva APSDE_DATA_request, actualiza-se o estado actual e chama-se a função ZigBeeTasks()

FFD, RFD	APLGetTransID()	Para obter o indicador único de transição da frame APS.
FFD, RFD	destinationEndpoint	Endpoint de destino é determinado e apresentado nesta variável. (16-bit address)
FFD, RFD	APSDE_DATA_confirm primitive	Retorna o estado do envio da mensagem

Referências

- [1] Castro, M., Kummer, R., Hozer, A., Mocito, J., Vessaz, F., Kliot, G., Rochat, D., 2008, Scalable Communication Protocols in *Mobile Networks*, INESC-ID, Lisbon, Portugal. Disponível em http://www.minema.di.fc.ul.pt/mobility/FinalReport_PhDW_6.pdf. Acesso em 12/Março/2010
- [2] Leszek, L., Kamal, Z., Gupta, A., Bhuse, V., Yang, Z., 2006, *Opportunistic Networks: The Concept and Research Challenges in Privacy and Security*, Department of Computer Science, Western Michigan University, Kalamazo, USA, Disponível em http://www.cs.wmich.edu/wsn/Lilien+Kamal+Bhuse+Gupta---Opppnets-Challenges_in_Priv_Sec.pdf, Acesso em 12/Março/2010.
- [3] Leszek, L., Kamal, Z., Gupta, A., Bhuse, V., Yang, Z., 2006, *Opportunistic Networks*, Department of Computer Science, Western Michigan University, Kalamazo, USA
- [4] Loureiro, A., Nogueira, J., Ruiz, L., Mini, R., Nakamura, E., Figueiredo, C., *Redes de Sensores Sem Fios*, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Disponível em <http://homepages.dcc.ufmg.br/~loureiro/cm/docs/sbr03.pdf>, Acesso em 12/Março/2010.
- [5] Charles E. Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic Destination-Sequenced Distance Vector routing (DSDV) for *Mobile* computers. In SIGCOMM '94: Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications, pages 234-244. ACM Press, 1994, Disponível em <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=190336> , Acesso em 12/ Março/2010.
- [6] Hannes Frey. Scalable Geographic Routing Algorithms for *Wireless Ad-Hoc Networks* *IEEE Network*. Special Issue on *Ad Hoc* Net-working: Data Communications and Topology Control, 18(4):18-20, 2004, Disponível em <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1316756&userType=inst> Acesso em 12/Março, 2010.

- [7] Rudiger Schollmeier. A Definition of *Peer-to-Peer Networking* for the Classification of *Peer-to-Peer Architectures and Applications*. In 1st International Conference on *Peer-to-Peer Computing (P2P 2001)*, 27- 29 August 2001, Linköping, Sweden, pages 101-102. IEEE Computer Society, 2001, <http://www.computer.org/portal/web/csdl/doi/10.1109/P2P.2001.990434>, Acesso em 12/Março/2010.
- [8] Anwitaman Datta. *MobiGrid: Peer-to-Peer Overlay and Mobile Ad-Hoc Network Rendezvous - a Data Management Perspective*. In CAiSE 2003 Doctoral Symposium, in conjunction with the 15th Conference On Advanced Information Systems Engineering. Springer, 2003, Disponível em <http://www.mics.org/getDoc.php?docid=518&docnum=1>, Acesso em 12/Março/2010.
- [9] Bo Xu, Aris Oukse, and Ouri Wolfson. *Opportunistic Resource Exchange in Inter-Vehicle Ad-Hoc Networks*. In 2004 IEEE International Conference on *Mobile Data Management (MDM'04)*, pages 4-12. IEEE Computer Society, 2004.
- [10] IEEE. *IEEE 802.11 Wireless Specification*, ISO/IEC 8802-11 [on-line]. 1999. Disponível em: <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>, Acesso em 12/Março/2010.
- [11] *Bluetooth SIG Inc. The Official Bluetooth Membership Site* [online]. 2003. Disponível em: <http://www.Bluetooth.org>, Acesso em 12/Março/2010.
- [12] Anwitaman Datta, Silvia Quarteroni, and Karl Aberer. *Autonomous Gossiping: A Self-Organizing Epidemic Algorithm for Selective Information Dissemination in Wireless Mobile Ad-Hoc Networks*. *Lecture Notes in Computer Science*, 3226:126-143, 2004, Disponível em <http://www.springerlink.com/content/rt1jlbvd1x98xj74/> , Acesso em 12/Março/2010.
- [13] Anwitaman Datta, Silvia Quarteroni, and Karl Aberer. *Autonomous Gossiping: A Self-Organizing Epidemic Algorithm for Selective Information Dissemination in Wireless Mobile Ad-Hoc Networks*. *Lecture Notes in Computer Science*, 3226:126 - 143, 2004, Disponível em <http://www.springerlink.com/content/rt1jlbvd1x98xj74/>, Acesso em 12/Março/2010.
- [14] Carcelle, X., Dang, T., Devic, C., 2006, in *International Federation for Information Processing (IFIP)*, Volume 212, *Ad-Hoc Networking*, ed. Al Agha, K., (Boston: Springer), pp.141-156.
- [15] Girião, P., Enache, A., 2007, in 2ª Conferência Nacional, *Wireless Sensor Networks*. State of the Art and Future Trends, Instituto de Telecomunicações/Instituto Superior Técnico, Disponível em http://www.spmet.pt/II_conferencia/Wireless_Sensor_PSGirao_et_al.pdf , Acesso em 12/Março/2010.
- [16] Koubaa, A., Tovar, E., 2 Time Sensitive *IEEE 802.15.4* Protocol, Polytecnic Institute of Porto, pp. 19-49.

- [17] Meng-Shiuan, P., Yu-Chee, T., *ZigBee and Their Applications*, Department of Computer Science, National Chiao University, pp. 349-368.
- [18] “Understanding RF4CE”. Disponível em http://www.ZigBee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?contentID=16212. Acesso em 5/Março/2010.
- [19] http://farm4.static.flickr.com/3234/2813781606_af9d2c6315.jpg, Acesso em 6/Abril/2010.
- [20] <http://img121.imageshack.us/i/p1040905.jpg> , Acesso em 6/Abril/2010.
- [21] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00965c.pdf> , Acesso em 7/Abril/2010.
- [22] <http://www.qualar.org/?page=2>, Acesso em 15/Junho/2010.
- [23] <http://www.shammas.eng.br/acad/sitesalunos0606/wireless/tecnologias.html>, Acesso em 16/Junho/2010
- [24] http://www.hitachi.com/rd/research/sdl/07/soc_02.html, Acesso em 16/Junho/2010
- [25] http://www.vorratsdatenspeicherung.de/CD/preview_2.0/batman.html, Acesso em 16/Junho /2010
- [26] <http://www.transportes-xxi.net/fotografia/foto/1325>, Acesso em 24/Junho/2010
- [27] Microchip Stack for ZigBee Protocol.
Disponível <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00965a.pdf>. Acesso em 24/Junho/2010
- [28] Zena Network Analyser. Disponível em:
http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en520682. Acesso em 24/Junho/2010
- [29] Lee, J., Su, Y., Shen, C., *A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi*, Information & Communications Research Labs, Industrial Technology Research Institute (ITRI), Hsinchu, Taiwan.