

DM

# Sistema de Monitorização Ambiental Urbana com Redes de Sensores Sem Fios

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Beto André Fernandes da Silva**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES



UNIVERSIDADE da MADEIRA

*A Nossa Universidade*

[www.uma.pt](http://www.uma.pt)

janeiro | 2019

# Sistema de Monitorização Ambiental Urbana com Redes de Sensores Sem Fios

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Beto André Fernandes da Silva**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES

ORIENTADOR

Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo



**Universidade da Madeira Faculdade de Ciências Exatas e da  
Engenharia**

# **Sistema de monitorização ambiental urbana com redes de sensores sem fios**

Dissertação submetida à Universidade da Madeira para obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Eletrotécnica–Telecomunicações

Orientador: Professor Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

Beto André Fernandes da Silva

2019



## Resumo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um protótipo para monitorização ambiental urbana com recurso a uma rede de sensores sem fios (RSSF), para a monitorização de alguns poluentes que contribuem para a degradação da qualidade do ar quer em ambientes interiores quer exteriores.

Inicialmente efetuou-se um estudo acerca da rede de monitorização da qualidade do ar existente na ilha da Madeira, bem como a classificação desses mesmos poluentes. Fez-se, ainda, uma pesquisa de alguns sensores passíveis de serem utilizados no que diz respeito à monitorização da qualidade do ar.

O protótipo desenvolvido é constituído por dois tipos de nós sensores, nomeadamente nós móveis e nós fixos. O primeiro, como o nome indica, é móvel e pode ser transportado por peões ou em veículos e permite a monitorização de monóxido de carbono em zonas de tráfego rodoviário, no interior de parques túneis. O segundo permite monitorizar poluentes quer em ambiente interior quer exterior. No interior são medidos os poluentes dióxido de carbono e partículas inaláveis e no exterior são medidos o monóxido de carbono e os parâmetros meteorológicos de temperatura e humidade relativa.

Os dados recolhidos pelos nós sensores são encaminhados para uma estação base e estes podem ser visualizados através de uma aplicação *Web*. Através desta, é possível a visualização gráfica dos parâmetros medidos bem como a visualização espacial do monóxido de carbono através da ferramenta Google Earth.

**Palavras-chave:** Redes de sensores sem fios (RSSF), ZigBee, Monitorização ambiental, Monóxido de Carbono

## Abstract

The aim of this work was to develop a prototype for urban environmental monitoring with wireless sensor networks (WSNs) for the monitoring of some pollutants that contribute to the degradation of air quality in indoor and outdoor environments.

Initially, a study was carried out on the existing air quality monitoring network, as well, the classification of these same pollutants. A survey was also made for some sensors that could be used in air quality monitoring.

The developed prototype consists of two types of sensor nodes, namely portable nodes and fixed nodes. The first, as the name implies, is portable and can be transported by pedestrians and allows the monitoring of carbon monoxide in road traffic areas, parks or tunnels. The second allows you to monitor pollutants both indoors and outdoors environments. Inside, carbon dioxide and particulate pollutants are measured, and carbon monoxide, temperature and humidity parameters are measured outdoors.

Data collected by the sensor nodes is routed to a base station and it can be viewed through a web application. Through it, it is possible to graphically display the measured parameters as well as the spatial visualization of carbon monoxide through the Google Earth tool.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks (WSN), ZigBee, Environmental monitoring

# Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado, bem como todo o meu percurso académico não se teria tornado uma realidade sem o apoio, incentivo e cooperação de algumas pessoas, as quais estarei eternamente grato. A todos elas deixo aqui o meu sentido e profundo agradecimento.

Em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo, expresso o meu profundo agradecimento pela forma como orientou o meu trabalho, desde a atenção prestada, interesse no trabalho desenvolvido, às críticas construtivas para o enriquecimento do mesmo, à paciência prestada nas minhas fases menos boas, às suas sugestões e, acima de tudo, a total dedicação no decorrer do presente trabalho.

À Universidade da Madeira e a todos os meus professores que contribuíram para a valorização da minha formação e enriquecimento pessoal.

À toda a minha família, principalmente à minha mãe, pai e irmãs por todos os apoios e incentivos prestados no decorrer da minha formação académica e no decorrer deste trabalho.

À minha namorada Iracema, por ter caminhado ao meu lado, pelo interesse, cooperação, permanente apoio, estimulação e ajuda prestada principalmente nas minhas inquietações, desânimos, obstáculos, e dificuldades com toda a paciência e disponibilidade. Todas as palavras não seriam suficientes para expressar o meu agradecimento.

Ao Engenheiro Filipe Santos, por todo o apoio, ajuda, disponibilidade, sapiência e conselhos partilhados, que se tornaram importantes na conclusão deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas, em especial à Yasmina, Juan, Diogo e Jorge, que de uma forma directa ou indirecta, contribuíram ou auxiliaram na elaboração deste trabalho, pela ajuda, conhecimentos partilhados, pela paciência, atenção e força que prestaram em momentos menos fáceis e pelos bons momentos passados juntos.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os demais que me são mais próximos, amigos e colegas que ajudaram na conclusão deste trabalho, quer dando ideias e/ou críticas, quer pelo interesse mostrado e constante incentivo no decorrer do mesmo.

A todos eles, **MUITO OBRIGADO!**



# Índice

Índice de figuras.....	IX
Índice de tabelas.....	XII
Acrónimos.....	XIII
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização da dissertação.....	3
2. Monitorização ambiental com redes de sensores sem fios.....	5
2.1 Monitorização urbana.....	5
2.1.1 Redes de estações de monitorização tradicionais.....	5
2.1.2 Índice de qualidade do ar.....	6
2.1.3 Analisadores.....	7
2.1.4 Monitorização urbana na ilha da madeira.....	8
2.1.5 Qualidade do ar interior.....	12
2.2 Redes de sensores sem fios na monitorização ambiental.....	15
2.2.1 Rede de sensores sem fios.....	15
2.2.2 Sensores para monitorização ambiental.....	16
2.2.3 Sistemas de monitorização ambiental sem fios.....	18
3. Arquitetura e desenvolvimento do <i>hardware</i> .....	27
3.1 Requisitos do sistema e opções tomadas.....	27
3.2 Arquitetura da rede.....	28
3.3 Nós sensores móveis.....	30
3.3.1 Descrição funcional e constituição dos nós sensores móveis.....	30
3.3.2 Componentes utilizados.....	30
3.3.3 Arquitetura.....	40
3.4 Nós sensores fixos.....	42
3.4.1 Descrição funcional e constituição dos nós sensores Fixos.....	42
3.4.2 Componentes utilizados.....	42
3.4.3 Arquitetura.....	45
3.5 Módulo de calibração.....	47
3.5.1 Descrição funcional e constituição do módulo de calibração.....	47
3.5.2 Componentes utilizados.....	48
3.5.3 Arquitetura.....	52
4. <i>Software</i> e interfaces do sistema.....	53

4.1 Configuração da rede ZigBee.....	53
4.2 Armazenamento e tratamento de dados .....	54
4.3 Controlo embebido dos nós sensores .....	58
4.4 Plataforma de visualização geográfica .....	62
4.5 Página Web.....	65
5. RESULTADOS.....	69
5.1 Locais de teste.....	69
5.2 Testes e resultados obtidos .....	71
5.2.1 Monóxido de carbono .....	71
5.2.2 Sensor de temperatura e humidade.....	78
5.2.3 Sensor de dióxido de carbono .....	80
5.2.4 Sensores de partículas.....	81
5.2.5 Transmissão da informação dos nós sensores móveis .....	83
5.2.6 Análise financeira dos nós sensores .....	87
6. Conclusões e trabalhos futuros .....	89
6.1 Conclusões.....	89
6.2 Trabalhos futuros .....	90
7. Bibliografia.....	91
Anexo A – Poluentes atmosféricos.....	95
Anexo B - Analisadores - princípio de medição .....	96
Anexo C – Sensores de Gases.....	101
Anexo D – Esquemático do Arduino fio .....	102
Anexo E – Sensores eletroquímicos .....	103
Anexo F - Características do sensor TGS5042.....	105
Anexo G – Características e notas de utilização do XBee.....	106
Anexo H – Programação em linguagem C do nó sensor móvel com XBee .....	109
Anexo I – Programação em linguagem C do nó sensor móvel com Bluetooth .....	113
Anexo J – Programação em linguagem C do nó sensor fixo exterior .....	117
Anexo K – Programação em linguagem C do nó sensor fixo interior.....	119
Anexo L – Programação em linguagem C do módulo de calibração .....	122
Anexo M – Alterações feitas à aplicação Java .....	125
Anexo N – Código fonte PHP da página <i>Web</i> .....	126

# Índice de figuras

Figura 2.1 – Analisadores: a) Analisador de monóxido de carbono CO 12M Environment; b) Analisador de partículas MP 101 Environment. ....	8
Figura 2.2 – Aglomeração Funchal [9]. ....	9
Figura 2.3 – Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Autónoma da Madeira [9]. ....	10
Figura 2.4 – Concentrações máximas horárias de CO nas estações de tráfego de São João e Porto Santo em 2011. ....	11
Figura 2.5 – Médias horárias de CO registadas na estação de São João entre 18 e 19 de Novembro de 2015. ....	11
Figura 2.6 – Concentrações máximas horárias de partículas nas estações de tráfego de São João, Quinta Magnólia e Porto Santo em 2011. ....	12
Figura 2.7 – Analisadores de Qualidade do Ar Interior: a) TSI 7545; b) <i>GrayWolf</i> IAQ; c) HANDHELD 3016 IAQ. ....	14
Figura 2.8 – Variação temporal da concentração de CO <sub>2</sub> [15]. ....	14
Figura 2.9 – Arquitetura de uma rede de sensores sem fios. ....	15
Figura 2.10 – Arquitetura do sistema proposto [24]. ....	19
Figura 2.11 – Arquitetura da RSSF do projeto RESCATAME. ....	20
Figura 2.12 – Medição de CO por um nó sensor. ....	21
Figura 2.13 – Arquitetura e-Science do projeto MESSAGE [27]. ....	23
Figura 2.14 – Interface web do projeto MESSAGE [30]. ....	23
Figura 2.15 – Sistema de monitorização móvel desenvolvido pela Universidade de Cambridge [28].	24
Figura 2.16 – Variação das concentrações de NO (azul) e NO <sub>2</sub> (verde) ao longo de Cambridge [32].	24
Figura 2.17 – Nó sensor desenvolvido pela Universidade de Newcastle [29]. ....	25
Figura 2.18 – Medição do ruído em diferentes áreas [32]. ....	25
Figura 2.19 – Medições efetuadas pelo sensor num veículo ao longo da cidade de Londres [32].	26
Figura 3.1 – Arquitetura da rede de monitorização ambiental. ....	28
Figura 3.2 – Arquitetura geral de um nó sensor. ....	29
Figura 3.3 – Diagrama funcional dos nós sensores móveis de CO. ....	30
Figura 3.4 – Ilustração do Arduino Fio. ....	31
Figura 3.5 – Bateria de Lítio: a) Ilustração da bateria; b) Curva característica da descarga da bateria. ....	32
Figura 3.6 – Sensor TGS5042: a) Ilustração do sensor. b) Dados da calibração do sensor [36].	33
Figura 3.7 – Condicionamento de sinal do sensor TGS5042: a) Circuito elétrico; b) Módulo construído. ....	34
Figura 3.8 – Influência da temperatura na medição de CO. ....	35
Figura 3.9 – Esquema elétrico de ligação ao termistor. ....	36
Figura 3.10 – GPS MiniMod da Sparkfun [39]. ....	37
Figura 3.11 – Descrição dos pinos existentes no micro SD Card. ....	38
Figura 3.12 – Display PDC8544 da Phillips: a) Ilustração; b) Descrição do pinout. ....	38
Figura 3.13 – XBee. A) Antena whip; b) Conetor U.FL; c) Antena chip; d) Conetor RPSMA. ....	39
Figura 3.14 – Comunicação UART entre o microcontrolador e XBee. ....	39
Figura 3.15 – Módulo Bluetooth BTBee Pro e respetivo pinout. ....	40
Figura 3.16 – Arquitetura dos nós sensores móveis. ....	41
Figura 3.17 – Diagrama funcional dos nós sensores fixos: a) nó sensor fixo exterior; b) nó sensor fixo interior. ....	42
Figura 3.18 – Sensor de partículas PPD42 comercializado pela Shinyei [45]. ....	43
Figura 3.19 – Sensor de CO <sub>2</sub> Cozir-W20 [48]. ....	44
Figura 3.20 – Sensor SHT1x. a) Ilustração do sensor; b) Esquema elétrico da ligação do sensor com o microcontrolador. ....	45
Figura 3.21 – Arquitetura do nó sensor fixo interior. ....	46
Figura 3.22 – Arquitetura do nó sensor fixo exterior. ....	46
Figura 3.23 – Diagrama funcional do módulo de calibração de CO. ....	48

Figura 3.24 – Sensor CO-B4.....	48
Figura 3.25 – ISB: a) Face inferior da ISB. b) Pinout da ISB.....	49
Figura 3.26 – Display NHD: a) Ilustração do display; b) Esquema de ligação ao microcontrolador; ....	51
Figura 3.27 – RTC Breakout - DS3234: a) Face superior; b) Face inferior. ....	51
Figura 3.28 – Arquitetura do sensor de calibração.....	52
Figura 4.1 – Placa de desenvolvimento da DIGI. ....	53
Figura 4.2 – Exemplo de uma rede ZigBee. ....	54
Figura 4.3 – Formato da trama ZigBee. ....	55
Figura 4.4 – Definição do formato dos dados na trama dos nós sensores móveis. ....	56
Figura 4.5 – Novo formato de dados identificado pelo caractere “*”.....	57
Figura 4.6 – Ficheiro batch para correr a aplicação Java.....	58
Figura 4.7 – Ecrã da linha de comandos da aplicação Java. ....	58
Figura 4.8 – Fluxograma do programa de controlo do nó sensor móvel com XBee. ....	59
Figura 4.9 – Fluxograma do programa de controlo do nó sensor móvel com Bluetooth.....	60
Figura 4.10 – Fluxograma do programa de controlo do nó fixo exterior.....	60
Figura 4.11 – Fluxograma do programa de controlo do nó fixo interior.....	61
Figura 4.12 – Fluxograma do programa de controlo do módulo de calibração.....	61
Figura 4.13 – Exemplo de como utilizar o serviço Google Maps. ....	63
Figura 4.14 – Representação de um percurso com coordenadas inválidas. ....	64
Figura 4.15 – Representação de um percurso com interpolação de coordenadas inválidas. ....	65
Figura 4.16 – Diagrama de fluxo de dados da página Web. ....	66
Figura 4.17 – Página Web desenvolvida.....	67
Figura 5.1 – Localização da estação de monitorização ambiental urbana e locais de teste. ....	69
Figura 5.2 – Nós sensores móveis e módulo de calibração. ....	70
Figura 5.3 – Nós sensores fixos: a) Exterior. b) Interior.....	70
Figura 5.4 – Medição do CO dentro de um túnel. ....	71
Figura 5.5 – Medição de CO junto à passagem de tráfego. ....	72
Figura 5.6 – Localização dos sensores CO-B4 e TGS5042.....	73
Figura 5.7 – Concentração de CO a 3 m e 7 m do tráfego.....	73
Figura 5.8 – Médias horárias registadas junto à estação de monitorização da qualidade do ar em São João. ....	74
Figura 5.9 – Nível de CO no exterior.....	75
Figura 5.10 – Nível de CO no exterior.....	75
Figura 5.11 – Nível de CO no durante um percurso. ....	76
Figura 5.12 – Concentração de CO durante um percurso.....	76
Figura 5.13 – Nível de CO dentro de um parque. ....	77
Figura 5.14 – Concentração de CO dentro de um parque.....	77
Figura 5.15 – Aplicação Bluetooth Terminal. a) Configuração da aplicação. b) Exemplo dos parâmetros mostrados no ecrã do telemóvel. ....	78
Figura 5.16 – Comparação dos resultados da temperatura do ar.....	79
Figura 5.17 – Comparação dos resultados da humidade do ar. ....	79
Figura 5.18 – Dados meteorológicos: a) Temperatura; b) Humidade.....	80
Figura 5.19 – Nível de CO <sub>2</sub> dentro de uma sala de aula. ....	80
Figura 5.20 – Concentração de CO <sub>2</sub> no interior do laboratório. ....	81
Figura 5.21 – Nível de partículas medidas dentro de uma sala. ....	82
Figura 5.22 – Nível de PM <sub>10</sub> no interior.....	83
Figura 5.23 – Transmissão de dados via XBee.....	84
Figura 5.24 – Transmissão de dados via Bluetooth.....	85
Figura 5.25 – Envio de dados armazenados nos nós sensores através da página Web. ....	86
Figura 5.26 – Informação apresentada ao utilizador aquando da inserção dos dados na base de dados. ....	86
Figura 5.27 – Informação apresentada ao utilizador aquando da conclusão da inserção dos dados na base de dados. ....	86

Figura B.1 – Esquema do sistema de medição de um analisador de ozono com um tubo ótico. ....	96
Figura B.2 – Esquema do princípio de funcionamento do analisador de óxidos de azoto.....	97
Figura B.3 – Esquema do sistema de medição de um analisador de dióxido de enxofre [5]. ....	98
Figura B.4 – Sistema de medição de um analisador de monóxido de carbono [5].....	99
Figura B.5 – Esquema do sistema de medição de partículas em suspensão por radiação $\beta$ . ....	100
Figura D.1 – Esquemático do Arduino Fio [33].....	102
Figura E.1 – Esquema de um sensor eletroquímico de 4 elétrodos. Adaptado de [50] ALPHASENSE, 2013 <sup>a</sup> .....	103
Figura F.1 - Dependência do sensor à temperatura. a) Curva apresentada pela Fígaro [35]; b) Equação polinomial da dependência do sensor à temperatura. ....	105
Figura F.2 - Sensibilidade do sensor TGS5042 ao CO e a outros gases [35]. ....	106
Figura G.1 – Configuração dos pinos do rádio XBee.....	106
Figura G.2 – Estrutura da trama no modo API. ....	107
Figura G.3 – Resumo da estrutura API do XBee. ....	108
Figura M.1 – Aplicação do time stamp nos parâmetros dos nós sensores móveis na base de dados. .....	125

# Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Classificação do Índice de Qualidade do Ar para Portugal em 2014 em $\mu\text{gm}^3$ [7].	7
Tabela 2.2 – Princípio de medição e respetivo analisador das estações para cada poluente [6].	8
Tabela 2.3 – Caraterísticas técnicas dos analisadores [6].	8
Tabela 2.4 – Estações da rede de monitorização da qualidade do ar da RAM.	10
Tabela 2.5 – Dados válidos obtidos nas estações de qualidade do ar na RAM em 2009 [10].	12
Tabela 2.6 – Concentrações máximas de poluentes de acordo com o RSECE.	13
Tabela 2.7 – Sensores de monóxido de carbono.	16
Tabela 2.8 – Sensores $\text{CO}_2$ .	17
Tabela 2.9 – Sensores de partículas.	18
Tabela 2.10 – Módulos de comunicação sem fios utilizados nos Waspnotes.	21
Tabela 3.1 – Caraterísticas do Arduino Fio.	31
Tabela 3.2 – Caraterísticas do sensor TGS5041.	33
Tabela 3.3 – Tipos de mensagens recebidas.	37
Tabela 3.4 – Caraterísticas da série 1 e série 2 do XBee.	39
Tabela 3.5 – Estimativa do consumo dos nós sensores móveis.	41
Tabela 3.6 – Caraterísticas dos sensores PPD42 [45].	43
Tabela 3.7 – Caraterísticas do sensor de $\text{CO}_2$ Cozir-W20.	44
Tabela 3.8 – Estimativa do consumo dos nós sensores fixos.	47
Tabela 3.9 – Caraterísticas do sensor CO-B4 da Alphasense.	48
Tabela 3.10 – Sensibilidade do sensor CO-B4 a outros gases [50].	49
Tabela 3.11 – Caraterísticas elétricas da ISB.	50
Tabela 3.12 – Estimativa do consumo do módulo de calibração.	52
Tabela 4.1 – Firmware e respetivos parâmetros configurados para cada tipo de nó.	54
Tabela 5.1 – Transmissão de dados via XBee.	84
Tabela 5.2 – Transmissão de dados via <i>Bluetooth</i> .	85
Tabela 5.3 - Análise financeira dos nós sensores móveis e módulo de calibração.	87
Tabela 5.4 - Análise financeira dos nós sensores fixos exterior e interior.	87
Tabela A.1 – Descrição dos poluentes e consequências para a saúde humana.	95
Tabela C.1 – Sensores de dióxido de azoto.	101
Tabela C.2 – Sensores de ozono.	101
Tabela C.3 – Sensores de dióxido de enxofre. ME3-SO2.	101

## Acrónimos

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
API	<i>Application Programming Interface</i>
ATMIS	<i>Atmospheric and Meteorological Instrumentation System</i>
CO	Monóxido de Carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DN	Diário de Notícias
DRA	Direções Regionais do Ambiente das Regiões Autónomas
DRAmb	Direção Regional do Ambiente
DUVAS	<i>Differential Ultraviolet Absorption Spectroscopy</i>
EPSRC	<i>Engineering and Physical Sciences Research Council</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
ISB	<i>Individual Sensor Board</i>
LPO	<i>Low Pulse Ocupancy</i>
MESSAGE	<i>Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments</i>
NO <sub>x</sub>	Óxidos De Azoto
NTC	<i>Negative Temperature Coeficient</i>
O <sub>3</sub>	Ozono
PM <sub>10</sub>	Partículas Em Suspensão
PPB	Parte Por Bilião
PTC	<i>Positive Temperature Coeficient</i>
PPM	Parte Por Milhão
QAI	Qualidade do Ar Interior
RAM	Região Autónoma da Madeira
RESCATAME	<i>Red Extensa de Sensores de Calidad del Aire para una Admnistración del Tráfico urbano Amigable con el Médio Ambiente</i>
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
RSSF	Redes de Sensores Sem Fios
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SO <sub>2</sub>	Dióxido De Enxofre
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TTFF	<i>Time To First Fix</i>



# 1. Introdução

Atualmente, numa sociedade sustentada pela queima de combustíveis fósseis, a existência de concentrações elevadas de poluentes no ar constitui um alerta constante, que se torna cada vez mais predominante na consciencialização da população em geral, no que concerne à qualidade do ar que se respira e às doenças que daí advêm devido à exposição desses poluentes.

O impacto nocivo da poluição na saúde humana e nos ecossistemas impõe uma necessidade primordial em controlar tais poluentes, identificando-os e quantificando-os através da monitorização da qualidade do ar. Esta, por sua vez, assume uma grande importância para garantir um desenvolvimento socioeconómico sustentável, levando a um combate e redução de emissões poluentes.

Nesta linha, as redes de sensores sem fios (RSSF) introduzem novas possibilidades de interação com este fenómeno, levando a uma melhor monitorização do mesmo.

Neste capítulo, pretende-se apresentar os principais fundamentos para a realização deste projeto, nomeadamente: a motivação, os objetivos a alcançar, e a estrutura deste relatório.

## 1.1 Motivação

As questões ambientais têm vindo a ganhar notoriedade nos últimos anos, dado que existem situações suscetíveis de provocar danos ambientais e, por sua vez, de destruição dos recursos naturais, assim como de bens materiais. Contudo, tais situações ainda não se encontram totalmente controladas, apesar dos progressos consideráveis nesta área. Perante tal cenário, as populações mostram-se cada vez mais sensibilizadas para os riscos associados à degradação do ambiente em geral e têm exigido a adoção de medidas de proteção ambiental mais eficazes e um melhor sistema de informação ao público.

Os setores da indústria, energia e transportes destacam-se como os principais responsáveis pela poluição atmosférica, uma vez que estão diretamente associados à perda da qualidade do ar, em especial nos centros urbanos. Por esse motivo, a poluição do ar revela ser um grave problema no contexto ambiental. Como tal, a qualidade do ar ambiente surge como uma matéria que requer especial atenção tendo em conta os problemas e os riscos que lhe são associados na sociedade moderna.

A existência de concentrações de poluentes elevadas no ar exterior afetam adversamente o ambiente interior, sobretudo em áreas urbanas. As pessoas passam a maioria do seu tempo em ambientes fechados (escritório, loja, fábrica, ou qualquer outra infraestrutura) tornando-se preocupante os efeitos poluentes na saúde humana, que se traduzem no aparecimento ou agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares, particularmente em faixas etárias sensíveis tais como crianças,

idosos e indivíduos com problemas respiratórios. É, pois, fulcral reduzir a exposição da população à poluição do ar, de modo a minimizar os impactos na saúde pública.

A qualidade do ar é avaliada através da monitorização com recurso a estações fixas e/ou móveis. O surgimento de novos métodos de monitorização de menor custo relativamente aos métodos de referência permitirá uma nova estratégia para a monitorização do ar, próxima da população e em tempo real. Possibilitará também a deteção rápida de situações críticas, fundamental para alertar a população com maior eficácia e assim tomar medidas rápidas de prevenção de modo a minimizar os efeitos nefastos na saúde da população exposta.

As RSSF são uma tecnologia direcionada para a recolha de parâmetros do meio físico. Estão direcionadas para monitorizar as condições ambientais e físicas de modo a ser possível atuar sobre um determinado fenómeno ou acontecimento.

Na atualidade, o custo de implementação de uma estação de monitorização ambiental requer um investimento elevado, dado que necessita de uma infraestrutura complexa. Com o desenvolvimento tecnológico, utilizando as RSSF é possível construir uma rede de monitorização com consumo baixo, baixa complexidade de implementação e baixo custo.

Torna-se importante aprofundar conhecimentos e avaliar a aplicabilidade das RSSF de baixo custo como alternativa ou complemento das tecnologias de monitorização da qualidade do ar existentes que permita impulsionar uma maior cobertura a nível espacial e em micro escala.

Uma das principais vantagens dos métodos de monitorização de menor custo é a possibilidade de serem usados numa rede que cobre uma grande área espacial e permitem monitorizar e verificar as condições da qualidade do ar em tempo real.

Assim, a utilização destes sistemas de monitorização de qualidade do ar tem a possibilidade de estar mais ao alcance das pessoas e, aliado à tecnologia que estas já utilizam - telemóvel, é de enorme interesse.

## **1.2 Objetivos**

A introdução das RSSF na interação com o meio físico permitiu uma melhor monitorização de parâmetros de interesse e em tempo real. Desse modo, pretendeu-se com este trabalho desenvolver um protótipo de uma rede de sensores sem fios para a monitorização da qualidade do ar.

Assim, o primeiro objetivo deste trabalho consistiu na realização de um estudo de sistemas existentes e dos parâmetros de monitorização da qualidade do ar interior e exterior, com a finalidade de selecionar os sensores mais apropriados.

Para o desenvolvimento e implementação do protótipo definiu-se que deveriam ser monitorizados os parâmetros de monóxido de carbono, de partículas PM10, de dióxido de carbono, de temperatura e de humidade. Para tal, os objetivos a desenvolver foram:

- Módulos de medição móveis de monóxido de carbono e de temperatura;

- Módulo de medição fixo em ambiente exterior de monóxido de carbono, de temperatura e de humidade;
- Módulo de medição fixo em ambiente interior de partículas e de dióxido de carbono;
- Módulo de calibração de monóxido de carbono.

Os dados provenientes das RSSF deverão ser enviados para uma estação base, onde serão processados e disponibilizados numa aplicação *Web*. Através desta, será feita a visualização gráfica dos dados e visualização espacial do monóxido de carbono através da ferramenta Google Earth.

### **1.3 Organização da dissertação**

O presente trabalho é constituído por seis capítulos, onde serão descritos os processos na construção e desenvolvimento do protótipo do sistema de monitorização ambiental.

O capítulo 1 tem como propósito a apresentação das motivações que levaram à realização do trabalho, bem como os objetivos a serem alcançados.

O capítulo 2 introduz a contextualização sobre a monitorização ambiental atualmente existente, os equipamentos que permitem efetuar essa monitorização e como se classifica a qualidade do ar em ambientes exteriores e interiores. Será feita uma breve descrição das redes de sensores sem fios e do protocolo de comunicação Zigbee com o padrão 802.15.4. Por último, será feito um levantamento de sistemas de monitorização ambiental com redes de sensores sem fios.

O capítulo 3 apresenta a arquitetura do sistema de monitorização nomeadamente os requisitos do sistema, e de todo o *hardware*, nomeadamente os dispositivos e componentes que constituem o protótipo.

O capítulo 4 apresenta a abordagem efetuada quanto ao desenvolvimento de todo o *software* dos dispositivos e da plataforma de processamento e de visualização dos dados do protótipo.

No capítulo 5 são expostos os testes e resultados obtidos no decorrer deste trabalho.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões acerca do sistema de monitorização ambiental desenvolvido e melhoramentos futuros.

Por último, neste trabalho consta uma secção de anexos, onde se apresentam várias informações relevantes na realização do protótipo.



## 2. Monitorização ambiental com redes de sensores sem fios

Este capítulo encontra-se dividido em duas partes: inicialmente é apresentada uma introdução à rede de monitorização da qualidade do ar, especificando-se a rede de monitorização presente na ilha da Madeira. São ainda descritos os vários poluentes que contribuem para a degradação do ar em ambientes urbanos e ambientes interiores. Na segunda parte é apresentado um estudo sobre RSSF aplicados à monitorização ambiental. Apresentam-se também sensores de baixo custo que podem ser utilizados na monitorização do ar.

### 2.1 Monitorização urbana

Uma rede de monitorização urbana consiste na utilização de vários analisadores para a medição de agentes poluidores, verificando de forma contínua a qualidade do ar. A monitorização é feita por analisadores em abrigos e os dados são recolhidos remotamente para um computador, sendo armazenados para uma posterior análise. De entre as diversas substâncias poluentes presentes na atmosfera, nas estações de monitorização da qualidade do ar são medidos poluentes para os quais a regulamentação nacional e comunitária define níveis de concentração que não devem ser excedidos, nomeadamente: monóxido de carbono (CO); óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>); dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>); ozono (O<sub>3</sub>) e partículas em suspensão de diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 µm (PM<sub>10</sub>). Para além da medição destes poluentes, estas estações podem medir parâmetros meteorológicos, como velocidade do vento, temperatura, humidade relativa, precipitação e radiação solar [1] [2] [3].

#### 2.1.1 Redes de estações de monitorização tradicionais

A qualidade do ar em Portugal é garantida pela Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) e Direções Regionais do Ambiente das Regiões Autónomas (DRA), assegurando a recolha e acompanhamento, bem como a garantia da qualidade das medições efetuadas e a divulgação dos dados resultantes das medições diárias dos vários poluentes atmosféricos. Estas entidades estabelecem o número de estações, a sua localização e disponibilizam a informação ao público, segundo o decreto-lei nº. 102/2010, de 23 de Setembro [4] [5].

As estações de monitorização são instaladas em diferentes tipos de zonas (urbana/rural) e apresentam diferentes tipologias que são dependentes das emissões dos poluentes dominantes nas zonas onde se encontram instaladas. Estas estações podem ser classificadas como estações de tráfego, estações de fundo ou estações industriais, representando diferentes tipos de exposição da população à poluição presente no ar ambiente [1]:

- **Estações de tráfego:** situam-se em zonas de tráfego rodoviário intenso e permitem avaliar o risco máximo de exposição da população às emissões

poluentes originadas pelo tráfego rodoviário. Esta exposição é, normalmente, de curta duração, no entanto os níveis de poluição medidos são habitualmente elevados.

- **Estações de fundo:** não se encontram sob a influência direta do tráfego rodoviário ou de outras fontes poluidoras próximas. Permite conhecer a exposição da população, nomeadamente aos fenómenos de poluição de fundo.
- **Estações industriais:** situam-se próximo de zonas industriais e dão a conhecer as concentrações máximas de determinados poluentes de origem industrial aos quais a população eventualmente pode estar exposta.

O ar exterior da estação é amostrado e, através de um dispositivo, é levado até aos diferentes analisadores de poluentes, onde são medidas as concentrações de cada poluente no ar ambiente. Essas concentrações são medidas com base nas características óticas ou nas propriedades físicas dos poluentes presentes na atmosfera (fotometria infravermelha para o monóxido de carbono, fluorescência de ultravioleta para o dióxido de enxofre, por exemplo) [1].

Os analisadores emitem um sinal elétrico equivalente à concentração do poluente medido, sendo os valores instantâneos obtidos agregados em médias de 15 minutos que são guardados temporariamente no equipamento. Os dados recolhidos são enviados a cada hora, através da rede de banda larga móvel (GPRS) ou linha telefónica, para um servidor localizado nas CCDR que centralizam, numa base de dados, toda a informação das estações de medição.

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA), com base nos dados obtidos das estações de medição, divulga diariamente sob a forma de índice de qualidade do ar através do portal [qualar.apambiente.pt](http://qualar.apambiente.pt) e disponibiliza históricos diários, mensais e anuais do estado da qualidade do ar por zona/aglomeração. Esta plataforma centraliza todos os dados de qualidade do ar medidos em Portugal e disponibiliza a informação à população sobre a qualidade do mesmo [6] [7]. Dependendo dos dados obtidos e divulgados, são elaborados e implementados planos de ação que levam a uma melhoria da qualidade do ar, tendo em conta as diretrizes legais.

### 2.1.2 Índice de qualidade do ar

O Índice de Qualidade do Ar (IQA) é um indicador padronizado do nível de poluição do ar numa determinada zona ou aglomeração e que resulta de uma média aritmética calculada para cada um dos poluentes medidos por todas as estações da rede de medição dessa mesma área. O IQA consiste em classificar o estado da qualidade do ar de uma maneira simples e compreensível. Permite, também, um fácil acesso do público à informação sobre a qualidade do ar, através da consulta direta através do portal da APA ou através dos órgãos de Comunicação Social [7].

O índice de qualidade do ar é calculado a partir de valores médios da concentração dos seguintes poluentes:

- Dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>) – médias horárias

- Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) – médias horárias
- Ozono (O<sub>3</sub>) – médias horárias
- Monóxido de carbono (CO) – médias de 8 horas consecutivas
- Partículas inaláveis (PM<sub>10</sub>) – média diária

Os valores dos índices de qualidade variam consoante o poluente, sendo associados a uma escala de cores e classificados desde Muito Bom a Mau de acordo com a tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação do Índice de Qualidade do Ar para Portugal em 2014 em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  [7].

Poluente/ Classificação	CO		NO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>		PM <sub>10</sub>		SO <sub>2</sub>	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Mau	10000	-----	400	-----	240	-----	120	-----	500	-----
Fraco	8500	9999	200	399	180	239	50	119	350	499
Médio	7000	8499	140	199	120	179	35	49	210	349
Bom	5000	6999	100	139	60	119	20	34	140	209
Muito Bom	0	4999	0	99	0	59	0	19	0	139

O IQA de cada poluente é comparado com as gamas de valores presentes na tabela 2.1 e a classificação global de uma determinada área é determinada pela pior classificação verificada entre os diferentes poluentes [7]. Todos os cálculos relacionados com o índice de qualidade do ar por todas as entidades gestoras da qualidade do ar ambiente são efetuados através do *software* ATMIS (*Atmospheric and Meteorological Instrumentation System*). No Anexo A apresenta-se uma descrição e as consequências para a saúde humana dos principais poluentes presentes no ar ambiente.

Os requisitos mínimos para se estabelecer um índice de qualidade do ar por estação são:

- Deve existir, pelo menos, um monitor para os poluentes NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e PM<sub>10</sub> na zona ou aglomeração para a qual se pretende calcular o índice. Não é obrigatória a medição de CO e SO<sub>2</sub> para o cálculo do índice, mas caso exista, as concentrações são utilizadas para o cálculo.
- Para cada poluente deve existir, pelo menos, 75% de dados válidos relativos a um dado dia.

O índice provisório calculado para o próprio dia reporta-se a um período de dados medidos entre as 00h00 e as 15h00, estando disponível a partir das 18h00. O índice definitivo pode ser consultado a partir das 14h00 do dia seguinte em [qualar.apambiente.pt](http://qualar.apambiente.pt) [7].

### 2.1.3 Analisadores

Como referido anteriormente, a qualidade do ar é medida por analisadores, onde são determinadas as concentrações de cada poluente no ar ambiente. Dada a precisão e complexidades destes instrumentos, o seu custo é elevado. A figura 2.1 ilustra os analisadores de CO e PM<sub>10</sub> utilizados nas estações de monitorização [8].

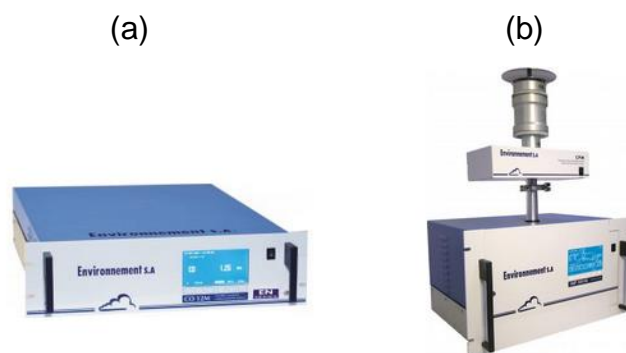


Figura 2.1 – Analisadores: a) Analisador de monóxido de carbono CO 12M Environment; b) Analisador de partículas MP 101 Environment.

As concentrações são determinadas com base nas características óticas ou nas propriedades físicas dos poluentes presentes na atmosfera. Os métodos de medição do ar, bem como os princípios de funcionamento, estão apresentados no Anexo B e seguem os princípios estabelecidos na Norma EN 14212:2005, no Anexo VI da Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho e no Anexo XI do Decreto-Lei 111/2002, de 16 de Abril. A tabela 2.2 mostra o princípio de medição e o respetivo analisador associado a esse poluente nas estações de monitorização [6].

Tabela 2.2 – Princípio de medição e respetivo analisador das estações para cada poluente [6].

Poluente	Método usado	Analisador
Monóxido de Carbono - CO	Fotometria Infravermelhos	CO 12M Environment
Dióxido de enxofre - SO <sub>2</sub>	Fluorescência em UV	AF 22M Environment
Óxidos de azoto - NO <sub>x</sub>	Quimiluminescência	AC 32M Environment
Ozono - O <sub>3</sub>	Absorção UV	O3 41M Environment
Partículas - PM <sub>10</sub>	Radiação Beta	MP 101 Environment

Para além disso, os analisadores devem cumprir certas especificações técnicas, nomeadamente no que diz respeito à gama de medição, expresso em ppm (parte por milhão) ou em ppb (parte por bilião) consoante o tipo de analisador, limite de deteção e instabilidade do zero [6]. Na tabela 2.3 são apresentadas as especificações para estes analisadores.

Tabela 2.3 – Características técnicas dos analisadores [6].

Analisador	Gama de Medida	Limite de Deteção	Instabilidade do Zero
CO 12M Environment	0 – 100 ppm	≤ 0,1 ppm	0,2 ppm/dia
AF 22M Environment	0 – 1000 ppb	≤ 1 ppb	2 ppb/semana
AC 32M Environment	0 – 1000 ppb	≤ 1 ppb	1 ppb/semana
O3 41M Environment	0 – 1000 ppb	≤ 1 ppb	2 ppb/semana

#### 2.1.4 Monitorização urbana na ilha da madeira

Para a Região Autónoma da Madeira (RAM) houve a necessidade de criar uma unidade territorial de gestão da qualidade do ar, a qual se designa por Aglomeração Funchal, sendo composta pelo Concelho do Funchal e pelas freguesias do Caniço, de

Câmara de Lobos e do Estreito de Câmara de Lobos. A figura 2.2 representa a delimitação da Aglomeração Funchal.

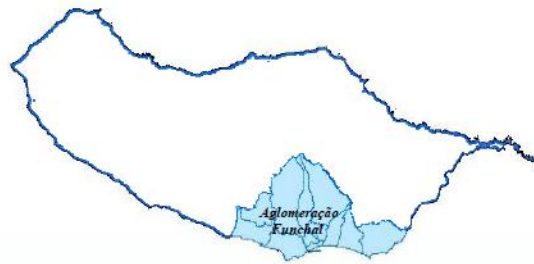


Figura 2.2 – Aglomeração Funchal [9].

Para a prevenção dos efeitos nocivos sobre a saúde humana e o ambiente, a Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Autónoma da Madeira tem como objetivos:

- Avaliar a qualidade do ar, com base em métodos e critérios de medição comuns a todo o território nacional;
- Obter informação adequada;
- Disponibilizar a informação ao público.

A rede de monitorização da qualidade do ar instalada na RAM é composta por quatro estações fixas. Três delas pertencem à Aglomeração Funchal, nomeadamente a estação de São João, que permite avaliar a qualidade do ar em função do tráfego rodoviário, e as estações de São Gonçalo e da Quinta Magnólia, sendo mais abrangentes em termos de áreas de monitorização. A quarta estação encontra-se localizada na ilha do Porto Santo e está vocacionada para a avaliação da qualidade do ar em função do tráfego automóvel. As estações pertencentes à Aglomeração Funchal juntamente com a estação do Porto Santo compõem a Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Autónoma da Madeira. Para além destas 4 estações de monitorização existe ainda a estação móvel de monitorização da qualidade do ar [9] [10]. Desde 2011 a 2014 a rede de monitorização da qualidade do ar na RAM encontrou-se inoperacional, de acordo com a ausência de dados publicados pela Agência Portuguesa do Ambiente em [qualar.apambiente.pt](http://qualar.apambiente.pt). Conforme notícia o Diário de Notícias (DN) de 8/10/2015 a rede de monitorização foi reativada, com um custo de manutenção da rede de 30.000 €/ano, tendo sido implementada uma estação de monitorização em Santana, e desativadas as estações presentes na Quinta Magnólia e no Porto Santo.

A figura 2.3 apresenta a localização e tipo de estações que compõem a Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Autónoma da Madeira.



Figura 2.3 – Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Autónoma da Madeira [9].

As estações instaladas na Região Autónoma da Madeira destinadas a medir os poluentes monóxido de carbono, óxidos de azoto, dióxido de enxofre e partículas em suspensão no ar ambiente, foram instaladas de modo a fornecerem dados em áreas onde provavelmente a população possa estar direta ou indiretamente exposta aos níveis mais elevados durante um período significativo e em áreas onde as concentrações obtidas sejam representativas da exposição da população em geral à poluição [9].

Na tabela 2.4 está representada o tipo e a configuração das estações que compõem a Rede de Monitorização da Qualidade do Ar da Região Autónoma da Madeira [9] [10].

Tabela 2.4 – Estações da rede de monitorização da qualidade do ar da RAM.

Estações	Tipo	Estado	Poluentes					Dados Meteorológicos					
			CO	NO2	SO2	O3	PM10	DV	VV	HR	IR	T	P
Quinta Magnólia	Fundo	Desativada		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
São Gonçalo	Fundo	Ativa		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
São João	Tráfego	Ativa	√	√			√	√	√	√	√	√	√
Porto Santo	Tráfego	Desativada	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√
Santana	Fundo	Ativa		√		√	√	√	√	√	√	√	√

**DV** – Direção do Vento; **VV** – Velocidade do Vento; **HR** – Humidade Relativa; **IR** – Intensidade de Radiação; **T** – Temperatura; **P** – Precipitação;

As estações que compõem a rede de monitorização da qualidade do ar na RAM estão equipadas com analisadores automáticos que monitorizam os vários poluentes. Estes equipamentos têm também a capacidade de calcular e armazenar as concentrações medidas em médias de 15 minutos, sendo posteriormente recolhidas por um computador existente na Direção Regional do Ambiente (DRAmb), através de linhas telefónicas instaladas nas estações utilizando o *software* ATMIS [10].

De seguida, apresentam-se os dados recolhidos pelas estações de São João, Porto Santo e Quinta Magnólia, obtidos em [qualar.apambiente.pt](http://qualar.apambiente.pt). Os dados referem-se ao período compreendido entre janeiro e julho de 2011, período este em que se encontravam ainda ativas as estações de monitorização. Na figura 2.4 são apresentadas as concentrações máximas horárias registadas em cada mês pelas estações de São João e Porto Santo.

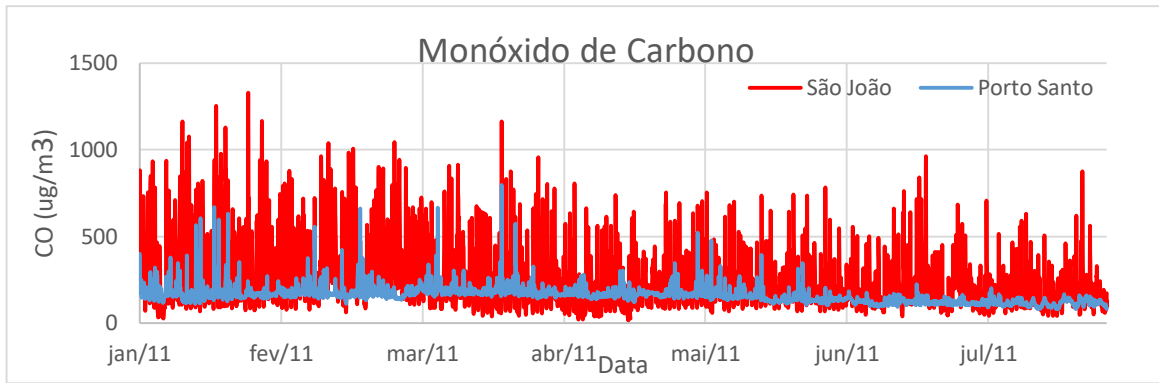


Figura 2.4 – Concentrações máximas horárias de CO nas estações de tráfego de São João e Porto Santo em 2011.

É possível observar na figura 2.4 que o nível de CO medido na estação de São João encontra-se em níveis mais elevados, comparativamente à estação do Porto Santo, devido ao maior fluxo de tráfego automóvel verificado junto à estação de São João.

A figura 2.5 ilustra a concentração horária do CO medido pela estação presente em São João no período compreendido entre 18 e 19 de Novembro de 2015.

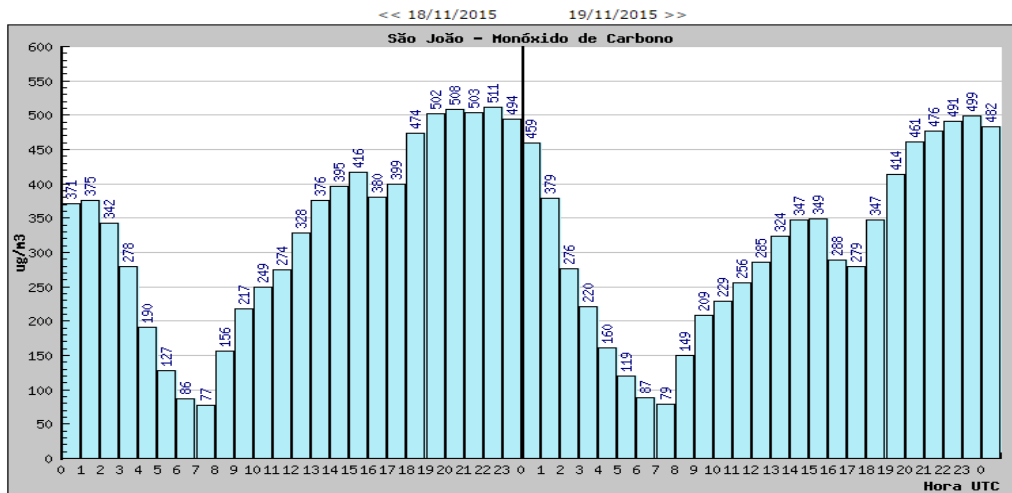


Figura 2.5 – Médias horárias de CO registadas na estação de São João entre 18 e 19 de Novembro de 2015.

Através da figura 2.5 é possível observar a variação do CO durante estes dois dias. Verifica-se que entre o período compreendido entre as 8 e 22 horas o nível de CO aumenta devido ao fluxo de tráfego automóvel verificado neste período.

Na figura 2.6 são apresentadas as concentrações máximas horárias de partículas PM10 registadas nas três estações no mesmo período de 2011. É possível observar também a ausência de alguns dados entre o período de Fevereiro e Abril.

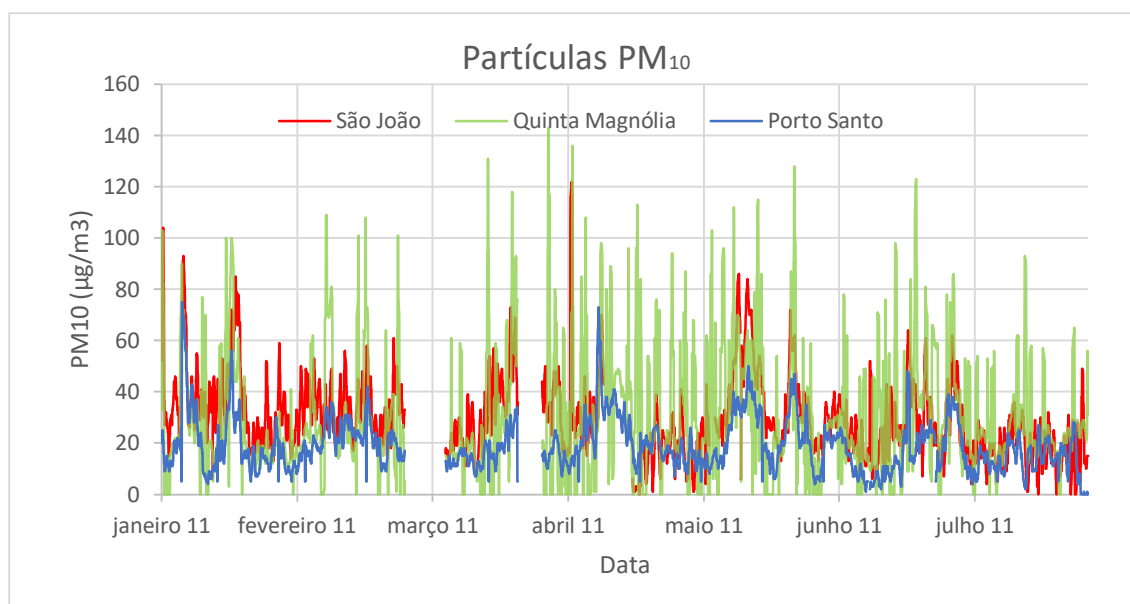


Figura 2.6 – Concentrações máximas horárias de partículas nas estações de tráfego de São João, Quinta Magnólia e Porto Santo em 2011.

Da figura 2.6 verifica-se que a estação do Porto Santo foi a que mediu menores concentrações de partículas. Na estação de São João e Quinta Magnólia verificaram-se maiores níveis de partículas em suspensão. Nalguns períodos verificaram-se níveis acima de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Na tabela 2.5 resume-se a percentagem de dados válidos por parte das estações de medição, verificando-se que em 2009 houve o cumprimento integral da percentagem mínima (90%) de dados válidos para todas as estações da rede de monitorização da RAM [10].

Tabela 2.5 – Dados válidos obtidos nas estações de qualidade do ar na RAM em 2009 [10].

Estações	CO (%)	O <sub>3</sub> (%)	NO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>2</sub> (%)	PM <sub>10</sub> (%)
Porto Santo	100	-	100	100	94,6
Quinta Magnólia	-	99,5	99,5	99,5	98,1
São Gonçalo	-	100	100	100	96,4
São João	98,1	-	98,1	98,1	96,2

### 2.1.5 Qualidade do ar interior

Os problemas de saúde e sintomas, associados ao ar interior dos edifícios, são fatores importantes que justificam inspeções e análises de forma a aferir os índices da qualidade do ar que respiramos no interior dos edifícios. O controlo dos poluentes é a maneira mais efetiva de manter a qualidade do ar interior.

Entretanto, o controlo de todas as fontes, ou pelo menos a diminuição das suas emissões, nem sempre é possível ou praticável. Faz parte de um consenso que uma má qualidade do ar interior pode afetar negativamente o desempenho dos ocupantes, a sua saúde e a sua produtividade. Tal como já foi referido anteriormente, as pessoas passam cerca de 90% do seu tempo em ambientes fechados, passando todo o seu

dia de trabalho dentro de um escritório, loja, fábrica, ou qualquer outra infraestrutura [11].

Em alguns ambientes interiores, a má qualidade do ar tem sido apontada como a causa por sintomas físicos e queixas tais como dores de cabeça, irritação dos olhos, tonturas, fadiga, náuseas, tosse e problema respiratório. Estes sintomas e queixas podem afetar a saúde, o conforto, a satisfação no trabalho e o desempenho profissional. Alguns edifícios já começam a ser classificados de “doentes”, devido à má qualidade do ar do seu interior, tendo sido criada a expressão “Síndrome dos Edifícios Doentes”, caracterizada por um estado doentio transitório das pessoas, já que os sintomas normalmente desaparecem quando as pessoas afetadas deixam o edifício. É, portanto, importante a manutenção de bons parâmetros de qualidade do ar [11] [12].

No âmbito do RSECE (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios), as novas exigências em termos dos requisitos da QAI (Qualidade do Ar Interior) vão desde a imposição, para edifícios novos, de valores mínimos de renovação de ar por espaço, em função da sua utilização, à limitação de valores máximos de concentração de poluentes (CO, CO<sub>2</sub>, COV (Compostos Orgânicos Voláteis), partículas, etc) até à obrigação de todos os sistemas energéticos construídos ou existentes serem mantidos em condições de higiene por forma a garantir a qualidade do ar interior [13].

Para manter uma boa QAI num edifício é recomendado o controlo dos seguintes parâmetros químicos, físicos e biológicos [14]:

- **Parâmetros físicos:**

Temperatura;

Humidade;

Velocidade do vento (à saída dos difusores de ar e/ou ao nível dos ocupantes);

Caudal mínimo de ar novo.

- **Parâmetros químicos:** As concentrações das substâncias apresentadas na tabela 2.6 não devem ultrapassar os limites máximos impostos, e que correspondem a média de 8 horas.

Tabela 2.6 – Concentrações máximas de poluentes de acordo com o RSECE.

Poluente	Limite Máximo (mg/m <sup>3</sup> )
Partículas - PM <sub>10</sub>	0,05
Dióxido de Carbono - CO <sub>2</sub>	1800
Monóxido de Carbono - CO	10
Formaldeído - HCHO	0,1
Compostos Orgânicos Voláteis - COV	0,6

- **Parâmetros biológicos:**

Bactérias;

Fungos;

*Legionella*.

Na figura 2.7 são apresentados três sistemas tipo para a monitorização da qualidade do ar interior. O TSI 7545 e o *GrayWolf* IAQ permite medir CO, CO<sub>2</sub>, temperatura e humidade, sendo que este último permite medir também compostos orgânicos voláteis. O HANDHELD 3016 IAQ permite medir partículas entre 0,3 a 10 µm.



Figura 2.7 – Analisadores de Qualidade do Ar Interior: a) TSI 7545; b) *GrayWolf* IAQ; c) HANDHELD 3016 IAQ.

O preço destes equipamentos é relativamente elevado, na ordem dos 2000€. O custo destes equipamentos deve-se à resolução e precisão dos poluentes medidos e *softwares* embutidos. Estes equipamentos permitem também a visualização, em tempo real, das medições e armazenamento das mesmas, de modo a serem visualizados em forma de gráficos.

O gráfico apresentado na figura 2.8 ilustra o resultado da monitorização do CO<sub>2</sub> descrita em [15] no interior de três ginásios ao longo de 6 dias.

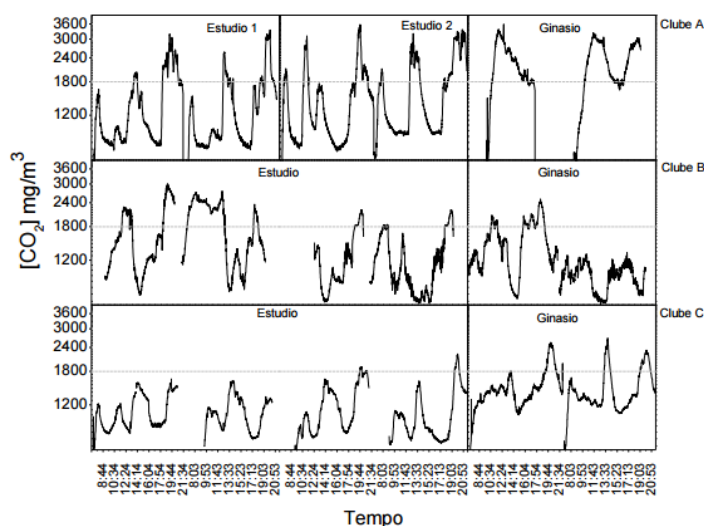


Figura 2.8 – Variação temporal da concentração de CO<sub>2</sub> [15].

A linha a tracejado representa o limite máximo imposto para o CO<sub>2</sub> (1800 mg/m<sup>3</sup>). É possível verificar a existência de picos cujos valores ultrapassam o limite imposto, que coincidem com a existência de aulas nos ginásios.

## 2.2 Redes de sensores sem fios na monitorização ambiental

Neste ponto faz-se uma breve descrição das redes de sensores sem fios e do protocolo de comunicação ZigBee com o padrão 802.15.4. É feito um levantamento de alguns sensores que podem ser utilizados para monitorização ambiental. Por último, será feito um levantamento de sistemas de monitorização ambiental com RSSF.

### 2.2.1 Rede de sensores sem fios

Uma RSSF apresenta uma topologia e um tamanho dinâmico e variável, sendo composta por pequenos sistemas autónomos, com ligação sem fios, dispersos entre si numa área geográfica, chamados de nós sensores e que cooperam entre si. Hoje são aplicadas nas mais diversas áreas, nomeadamente na agricultura, monitorização ambiental, aplicações militares, linhas de montagem, etc. [16] [17].

Numa RSSF, normalmente, os nós sensores encontram-se espalhados numa área geográfica a ser monitorizada. Cada nó sensor tem a capacidade para a recolha e o encaminhamento da informação até um nó de recolha de dados (*gateway* ou *sink node*). Os dados recolhidos pelos nós sensores são reencaminhados até ao nó *gateway* através de uma comunicação *multihop*, como é ilustrado pela figura 2.9. A *gateway* pode comunicar com o gestor da tarefa ligado diretamente a um computador ou via internet. O gestor da tarefa trata-se de um *software* instalado no computador do utilizador [18].

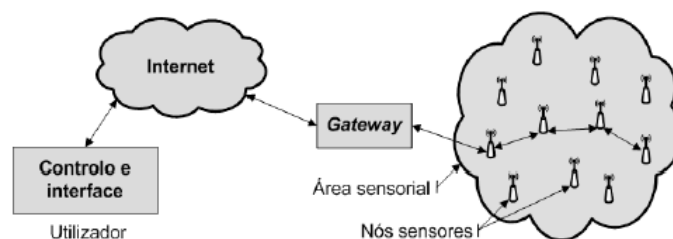


Figura 2.9 – Arquitetura de uma rede de sensores sem fios.

Cada nó sensor tipicamente é constituído por um microcontrolador, uma interface RF, pela fonte de energia e um ou mais sensores. O tamanho e o custo de cada nó varia proporcionalmente consoante a complexidade requerida, dependendo dos requisitos de memória, velocidade de processamento, sensores e fonte de energia.

Os nós sensores nas RSSF estão normalmente estruturados em três tipos de topologias de rede: topologia em estrela, árvore e malha. A topologia em malha é aquela que apresenta maior fiabilidade e maior tolerância a falhas de nós individuais ou caminhos, pois apresenta múltiplos caminhos de reencaminhamento entre os nós até à *gateway*. Uma outra vantagem é que, embora todos os nós tenham as mesmas características de *hardware*, certos nós podem ter funções adicionais para a gestão

da rede, podendo substituir um nó caso este falhe. Esta topologia é a mais apropriada para redes de sensores sem fios de grande escala [19] [20].

O ZigBee é um protocolo de redes sem fios orientado para o controlo remoto, monitorização e para aplicações sensoriais onde o baixo custo e o baixo consumo são indispensáveis. É adequado para operações em ambientes rádio hostis e para localizações isoladas. Este protocolo é construído sobre a norma 802.15.4 e esta tem como objetivo o baixo consumo, permitindo que dispositivos que operam a baterias funcionem por longos períodos de tempo sem intervenção humana [21].

No protocolo ZigBee existem diferentes tipos de dispositivos de rede e são denominados por *Coordenador ZigBee (ZC)*, *ZigBee Router (ZR)* e de *ZigBee End Device (ZED)* [22].



O protocolo ZigBee implementa dois modos de operação: modo *beacon* e o modo *non-beacon*. No modo *beacon*, os *ZigBee Routers* transmitem periodicamente “*beacons*” de modo a confirmar aos outros nós a sua presença na rede. Entre os “*beacons*” os nós podem entrar no modo adormecido, diminuindo o seu consumo e maximizando a carga útil da fonte de alimentação. No modo *non-beacon*, os *ZigBee Routers* têm os seus recetores constantemente ativos, necessitando de uma fonte de alimentação mais robusta [23].



## 2.2.2 Sensores para monitorização ambiental

Os sensores são componentes que permitem o controlo e a leitura de várias grandezas do mundo físico. Existem inúmeros tipos de sensores que podem ser facilmente aplicados nos nós, tais como sensores de humidade, de temperatura, de precipitação, de luminosidade, de som, de imagem, de movimento, de vibração, de pressão, de radioatividade, etc. Em aplicações de redes de sensores sem fios, estes devem ser de pequena dimensão, baixo consumo e baixo custo.

Na tabela 2.7 apresentam-se exemplos de alguns sensores disponíveis no mercado que permitem monitorizar o monóxido de carbono.

Tabela 2.7 – Sensores de monóxido de carbono.



Sensor/ Marca	Fabricante	Princípio de operação	Sensibilidade	Intervalo de medição
 CO-B4	Alphasense	Eletroquímico	420 a 650 nA/ppm	0 -1000 ppm
 TGS5042	Figaro	Eletroquímico	1,2 a 2,4 nA/ppm	0 - 10000 ppm
 Eco-Sure (2e)	City Technology	Eletroquímico	30 a 60 nA/ppm	0 - 500 ppm

 CO MF-1000	Membrapor	Eletroquímico	35-65 nA/ppm	0 - 1000 ppm
 MQ-7	Hanwei Electronic	Semicondutor	-0,38 a -3,38 $\Omega$ /ppm	20 - 2000ppm

Dos sensores de CO apresentados, verifica-se que nem todos abrangem a gama de medição pretendida. Para o sensor MQ-7, a gama de medição inicia-se em 20 ppm, sendo este valor muito acima do pretendido. Os sensores eletroquímicos mostram ser mais adequados para a aplicação pretendida, necessitando de pouca ou nenhuma energia para o seu funcionamento, dado que estes geram uma corrente mensurável proporcional ao poluente medido. Já o sensor semicondutor MQ-7 necessita de resistências de aquecimento para o seu funcionamento, aumentando assim o seu consumo (350 mW). De entre os sensores, o CO-B4 da Alphasense e o CO MF-1000 apresentam ser dos mais caros, com um custo superior a uma centena de euros. No entanto, a sensibilidade destes é superior face aos restantes sensores. Já os restantes sensores são de mais baixo custo, na ordem de poucas dezenas de euros. De entre estes, o TGS5042 é dos mais baratos, no entanto é aquele que apresenta menor sensibilidade.

Na tabela 2.8 apresentam-se dois de módulos que permitem a monitorização de CO<sub>2</sub>.




Tabela 2.8 – Sensores CO<sub>2</sub>.

Sensor/ Marca	Fabricante	Princípio de operação	Intervalo de medição	Consumo
 CDM4161A	Figaro	<i>Solid State Electrolyte</i>	400 - 4000 ppm	300 mW
 Cozir-W20-X	AirTest	NDIR ( <i>Nondispersive Infrared Sensor</i> )	0 – 20000 ppm	3,5 mW

O CDM4161A e o Cozir-W20-X são pequenos módulos que permitem a medição do nível de CO<sub>2</sub>. O CDM4161A, após ser ligado, necessita de duas horas para aquecer o sensor. Já o Cozir-W20-X necessita de 10 segundos de aquecimento após ser ligado. Para além disso, o consumo do CDM4161A é muito superior face o Cozir-W20-X. Embora o preço dos módulos seja semelhante, a utilização do Cozir-W20-X mostra ser a mais adequada.

Na tabela 2.9 apresenta-se uma amostra de vários tipos de sensores de partículas existentes no mercado.

Tabela 2.9 – Sensores de partículas.

Sensor/ Marca	Fabricante	Princípio de operação	Saída	Consumo
 GP2Y1010AU0F	<i>Sharp</i>	Infravermelho	Tensão	100 mW
 DN7C3CA006	<i>Sharp</i>	Infravermelho	Tensão	100 mW
 PPD42NS	Shinyei	Infravermelho	PWM	450 mW
 SM-PWM-01A	<i>Amphenol Advanced Sensor</i>	Infravermelho	PWM	100 mW

Os sensores de partículas apresentados são compactos e de baixo custo, de poucas dezenas de euros. O consumo destes sensores é considerável, sendo que o PPD42NS é aquele que apresenta maior consumo.

Da pesquisa e do estudo dos sensores passíveis de serem utilizados nas RSSF verificou-se como características principais a compactação e o baixo custo e consumo. Para além disso, podem existir sensores que não permitem a medição na gama pretendida, sendo este também um fator importante na escolha do mesmo.

No Anexo C é possível observar também algumas amostras de sensores para os restantes poluentes, nomeadamente o dióxido de azoto, ozono e dióxido de enxofre.

### 2.2.3 Sistemas de monitorização ambiental sem fios

Atualmente as RSSF são uma área de pesquisa muito ativa, oferecendo variadas soluções para as mais diversas aplicações nomeadamente aplicações ambientais, monitorização de *habitats*, saúde ou aplicações militares.

A integração de um sistema de monitorização da poluição do ar com as RSSF permite reduzir os custos de instalação e torna a tarefa de monitorização menos complexa e a um baixo custo.

Encontram-se a decorrer, ou decorreram recentemente, vários projetos de investigação/aplicação que utilizam sensores de baixo custo para monitorização de qualidade do ar.

### 2.2.3.1 Monitorização da qualidade do ar utilizando redes sem fios oportunistas

Em [24] é apresentado uma proposta de um sistema de monitorização da qualidade do ar de uma cidade utilizando a infraestrutura de transportes públicos, neste caso na cidade do Porto. A transferência de dados entre os vários elementos da infraestrutura é feita através de redes sem fios nomeadamente a rede ZigBee. A figura 2.10 ilustra a arquitetura do sistema de monitorização proposto.

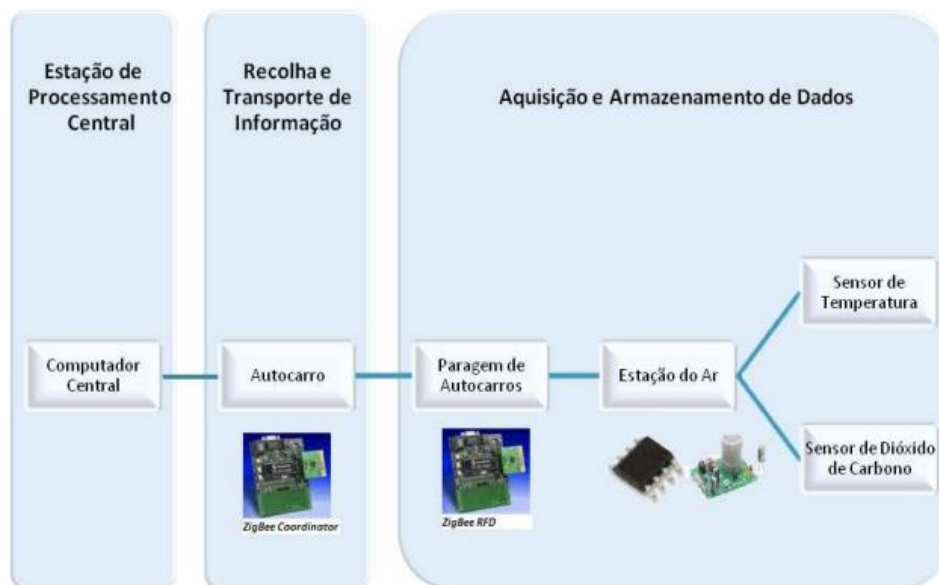


Figura 2.10 – Arquitetura do sistema proposto [24].

As estações de monitorização do ar estão localizadas nas paragens de autocarro onde periodicamente medem os valores de CO<sub>2</sub> (sensor CDM4161) e a temperatura e armazenam o resultado das medições. A recolha e o respetivo transporte da informação dos dados ficam a cargo dos autocarros. Estes autocarros estão equipados com dispositivos que permitem a recolha da informação presente nas estações de monitorização. A transferência de informação entre a estação de monitorização e o autocarro é suportada por uma rede *ZigBee*. Mais tarde, esta informação é depositada numa estação de processamento central, podendo estar localizada no terminal dos autocarros, através da rede *ZigBee*. É na estação de processamento central onde é feita a recolha e o tratamento da informação para uma posterior análise. No entanto, o foco do desenvolvimento do sistema apresentado incidiu nas estações de monitorização e na recolha e transporte dos dados.

### 2.2.3.2 RESCATAME

O projeto RESCATAME (*Red Extensa de Sensores de Calidad del Aire para una Admnistración del Tráfico urbano Amigable con el Médio Ambiente*) [25] ocorreu na cidade de Salamanca e o seu principal objetivo consistiu no desenvolvimento de uma ferramenta de gestão sustentável do tráfego nessa cidade.

Os dois elementos chave deste projeto consistem na utilização de RSSF de baixo custo de monitorização da qualidade do ar e de modelos de previsão da qualidade do ar, servindo de apoio às autoridades locais no cumprimento das medidas legislativas ao nível da qualidade do ar e reduzir os níveis de poluição, principalmente relacionados a emissões do tráfego rodoviário.

Esta RSSF foi implementada com base nos componentes produzidos pela empresa *Libelium* e cada nó sensor tem capacidade de medir 7 parâmetros, nomeadamente: temperatura; humidade relativa; CO, NO<sub>2</sub>; O<sub>3</sub>; partículas e nível de ruído. Os dados obtidos pelos nós sensores são transmitidos para uma *gateway*, que por sua vez retransmite os dados para um servidor onde armazena os dados. Os nós podem reagir a limiares pré-definidos dos parâmetros medidos. Se um limiar for ultrapassado, um sinal é enviado à *gateway* sendo depois emitido um aviso. A arquitetura da RSSF do projeto RESCATAME é ilustrada pela figura 2.11.

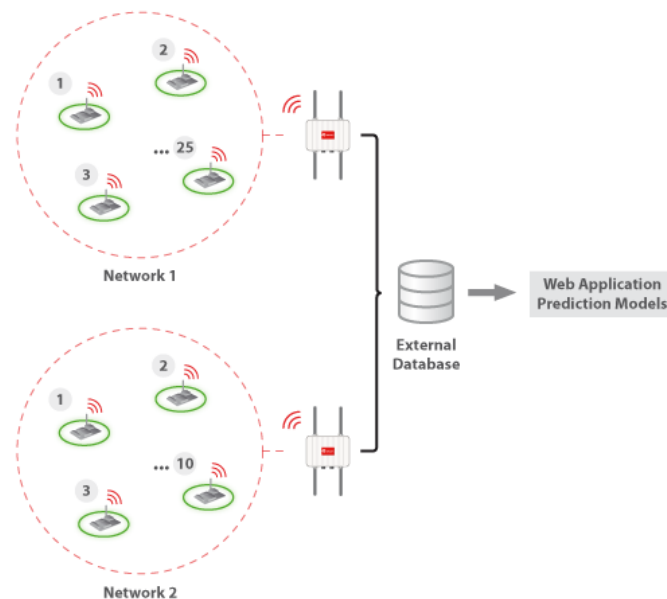


Figura 2.11 – Arquitetura da RSSF do projeto RESCATAME [26].

A RSSF consiste em 35 nós sensores *Waspnotes* divididos em dois grupos e duas *gateways Meshliums* [26], como ilustra a figura 2.11. As principais características dos nós sensores *Waspnotes* utilizados são o seu baixo consumo (sendo de 9 mA no modo ativo, 62  $\mu$ A em modo adormecido e 0,7  $\mu$ A em hibernação) e a utilização de painéis solares e baterias recarregáveis, tornando estes nós sensores autónomos. Na maior parte do tempo, os *Waspnotes* estão em modo adormecido, entrando em modo ativo com uma periodicidade de alguns minutos, onde fazem a leitura dos sensores e efetuam a transmissão dos dados, entrando novamente em modo adormecido. Cada

Waspote integra também um módulo de posicionamento (GPS) e um módulo de ligação sem fios, podendo ser utilizados os módulos de comunicação apresentados na tabela 2.10 [25].

Tabela 2.10 – Módulos de comunicação sem fios utilizados nos Waspotes.

Modelo	Protocolo	Frequência	Potência transmissão	Sensibilidade
XBee-802.15.4	802.15.4	2,4 GHz	1 mW	-92 dBm
XBee-802.15.4-Pro	802.15.4	2,4 GHz	3 mW	-100 dBm
XBee-ZiBee	Zigbee-Pro	2,4 GHz	2 mW	-96 dBm
XBee-ZiBee-Pro	Zigbee-Pro	2,4 GHz	50 mW	-102 dBm
XBee-868	RF	868 MHz	315 mW	-112 dBm
XBee-900	RF	900 MHz	50 mW	-100 dBm
XBee-XSC	RF	900 MHz	100 mW	-106 dBm

As *gateways Meshlium* usadas para a recolha dos dados dos diversos nós sensores têm a capacidade de integrar 5 interfaces rádio, nomeadamente *WiFi* 2.4GHz, *WiFi* 5GHz, 3G/GPRS, *Bluetooth* e *ZigBee*. Estas, posteriormente, transmitem os dados via *WiFi* para um servidor que armazena os dados recolhidos [26].

Os sensores utilizados foram calibrados em laboratórios certificados de modo a que os vários poluentes fossem medidos de forma precisa, tendo sido depois sujeitos a diversos testes. Após validação, os sensores foram colocados em duas ruas da cidade de Salamanca. A figura 2.12 ilustra o resultado da medição de CO por um nó sensor.

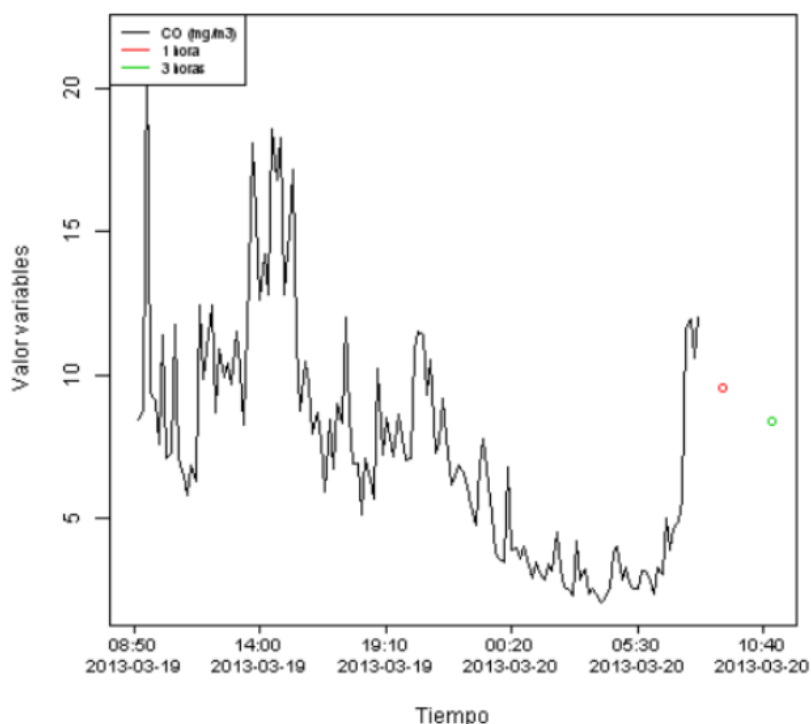


Figura 2.12 – Medição de CO por um nó sensor.

É possível verificar, através da figura 2.12, episódios de elevada poluição. Os pontos vermelho e verde correspondem à previsão de CO dentro de uma hora e três horas, respetivamente [25].

### **2.2.3.3 MESSAGE**

O sistema de monitorização MESSAGE (*Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments*) foi um projeto de pesquisa de três anos, compreendido entre outubro de 2006 a setembro de 2009, e financiado pela *Engineering and Physical Sciences Research Council* (EPSRC) e pelo departamento de transportes do Reino Unido, consistindo numa multi-parceria entre grupos de pesquisa académica (Universidades de Cambridge, Leeds, Newcastle, Southampton e Imperial College London), empresas do setor privado e agências governamentais.

O sistema MESSAGE foi concebido para explorar as potencialidades oferecidas por uma nova geração de sistemas de sensores móveis de baixo custo e o seu potencial para integrar numa rede de monitorização da qualidade do ar, com o objetivo de recolher dados, de modo a reduzir os impactos provocados pelos transportes, quer através do planeamento, gestão ou controlo do tráfego automóvel.

Um outro objetivo deste projeto consistiu na criação de uma infraestrutura *e-Science* de uma rede flexível, escalonável e reutilizável, baseada na infraestrutura, de modo a permitir a transferência e processamento dos diferentes dados recolhidos pelas redes de sensores sem fios e suportar um vasto leque de aplicações científicas ou comerciais [27]. Na figura 2.13 é ilustrada a arquitetura *e-Science* do sistema MESSAGE, onde podem ser vistas as camadas dos sensores, dados e aplicação.

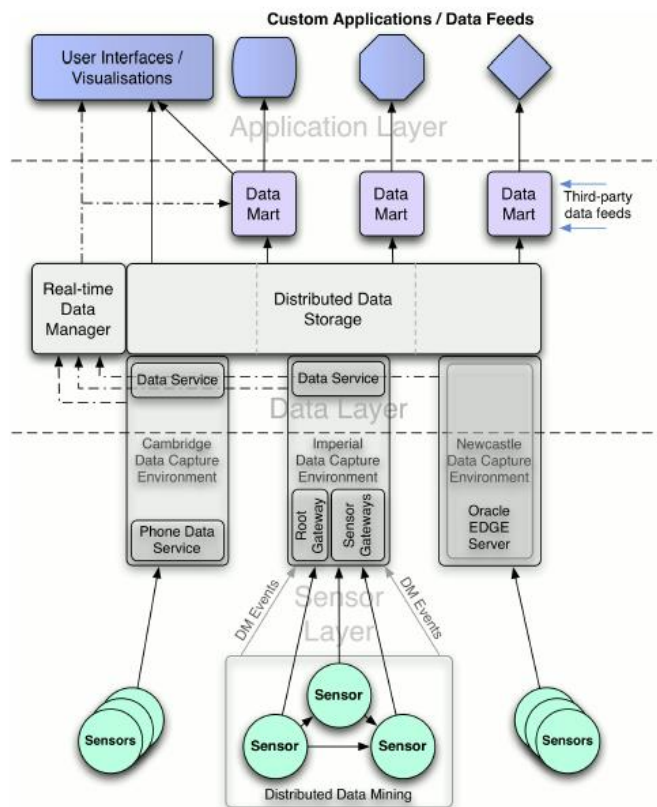


Figura 2.13 – Arquitetura e-Science do projeto MESSAGE [27].

A visualização dos dados é feita através de uma interface web ilustrada pela figura 2.14 e permite a visualização dos dados em tempo real ou históricos.

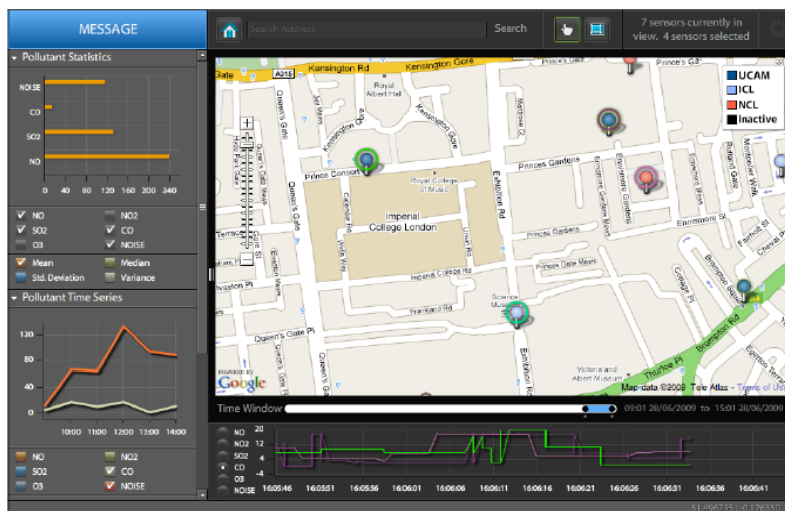


Figura 2.14 – Interface web do projeto MESSAGE [30].

A interface é construída com base no *Adobe Flex* e contém uma janela do *Google Maps* onde se sobrepõe a informação recolhida pelos sensores.

A Universidade de Cambridge investigou o potencial de dispositivos pessoais (telemóveis) para integrar um sistema de sensoriamento [28], como ilustra a figura 2.15.



Figura 2.15 – Sistema de monitorização móvel desenvolvido pela Universidade de Cambridge [28].

O *design* destes dispositivos foi otimizado no que diz respeito à portabilidade, de modo a permitir a utilização em massa por parte de pedestres e ciclistas como sondas móveis de monitorização. Estas unidades incorporam sensores eletroquímicos (CO, NO e NO<sub>2</sub>), sensor de temperatura e humidade relativa, e módulo GPS e GPRS [29] [30]. A figura 2.16 ilustra as concentrações de NO e NO<sub>2</sub> em volta de Cambridge, sendo utilizados para as medições cerca de 40 sensores transportados por pedestres, ciclistas, veículos e alguns sensores fixos [31] [32].



Figura 2.16 – Variação das concentrações de NO (azul) e NO<sub>2</sub> (verde) ao longo de Cambridge [32].

Foram desenvolvidos nós sensores utilizando sensores eletroquímicos (CO, NO<sub>2</sub> e ruído) para montagem em estruturas urbanas (figura 2.17). Estes dispositivos são alimentados por baterias, facilitando a sua instalação, sendo equipados com um sistema de posicionamento (GPS) e um sistema ZigBee para a comunicação, estando os nós tipicamente afastados até 80 metros. Os dados são transmitidos até uma *gateway* que, por sua vez, retransmite até um servidor remoto via GPRS [29] [30] [32].



Figura 2.17 – Nó sensor desenvolvido pela Universidade de Newcastle [29].

A figura 2.18 ilustra o nível de ruído obtido pelo sistema, mostrando que os níveis de ruído mudam substancialmente consoante o tipo de área.

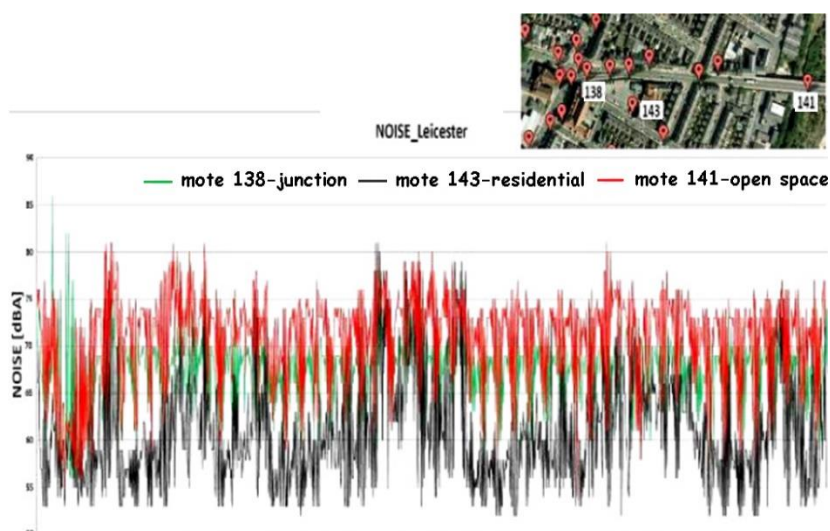


Figura 2.18 – Medição do ruído em diferentes áreas [32].

A rede utiliza as tecnologias Wi-Fi (IEEE 802.11g) e WiMAX (IEEE 802.16) para a comunicação e posicionamento, juntamente com um conjunto de sensores móveis a serem montados em veículos ou transportados por pedestres. Os sensores desenvolvidos consistem numa variante da tecnologia DUVAS (*Differential Ultraviolet Absorption Spectroscopy*) que utiliza a luz ultravioleta para detetar vários poluentes na atmosfera, de modo a complementar os sensores eletroquímicos de baixo custo desenvolvidos por Cambridge e Newcastle. Estes sensores permitem efetuar medições de alta resolução em tempo real de vários poluentes, nomeadamente  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{O}_3$  [27] [32].

A figura 2.19 ilustra o resultado das medições do sistema colocado num veículo em Londres, demonstrando o potencial da utilização do sistema móvel em trajetórias longas e na identificação de zonas problemáticas com elevados índices de poluição [32].

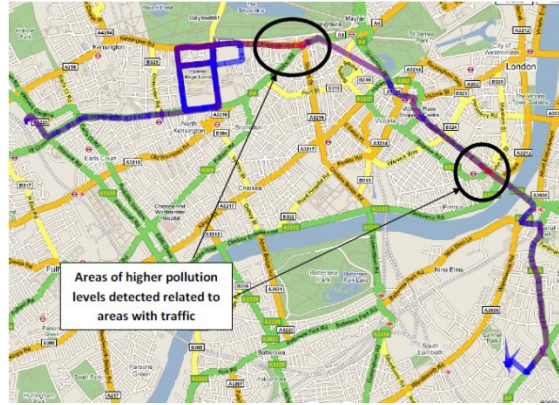


Figura 2.19 – Medições efetuadas pelo sensor num veículo ao longo da cidade de Londres [32].

### 3. Arquitetura e desenvolvimento do *hardware*

Neste capítulo apresentam-se os requisitos necessários para a elaboração do sistema de monitorização ambiental. Como tal, será descrita a arquitetura da rede sobre a qual o sistema opera. O sistema apresenta dois tipos de sensores móveis onde integra duas tecnologias sem fios: ZigBee e *Bluetooth*, oferecendo agilidade de interfaces com o utilizador. Apresenta, ainda, dois módulos dedicados para a monitorização de poluentes em ambientes interiores e em ambientes exteriores e um módulo de calibração dos sensores de CO.

#### 3.1 Requisitos do sistema e opções tomadas

Os principais requisitos para o sistema de monitorização a desenvolver são:

- O sistema deverá ser composto por dois nós sensores móveis e dois nós sensores fixos, permitindo a monitorização de poluentes da qualidade do ar em ambiente interior e exterior.
- Os nós sensores móveis:
  - Deverão fazer a monitorização do poluente CO e da temperatura. Convém que sejam de pequenas dimensões de forma a facilitar a sua portabilidade, tendo em conta que poderão ser transportados por peões;
  - Deverão ser dotados de um visor para visualização das medições efetuadas, de um cartão de memória para armazenar as mesmas e de GPS para marcação do trajeto;
  - Deverão utilizar uma de duas tecnologias diferentes para a entrega dos dados recolhidos, nomeadamente o ZigBee e o *Bluetooth*.
- Os nós sensores fixos:
  - Destinam-se à monitorização do ar exterior e interior. O nó sensor fixo colocado em ambiente interior deverá monitorizar os poluentes CO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub>. O sensor fixo colocado em ambiente exterior deverá monitorizar o poluente CO, temperatura e humidade.
- Os dados obtidos pelos diversos nós sensores deverão tratados numa aplicação dedicada para o efeito, armazenados numa base de dados e disponibilizados numa página Web. Relativamente ao CO, os dados obtidos serão também apresentados num mapa.
- O sistema deverá ser escalonável, de modo a permitir a entrada de outros módulos na rede.

A disponibilidade de rádios no laboratório e os resultados já obtidos em trabalhos anteriores determinaram a eleição do XBee como módulo base para o desenvolvimento do sistema de monitorização ambiental urbana, sendo utilizado o protocolo ZigBee. A topologia utilizada para formar a rede poderá ser em árvore, estrela ou em malha. Contudo, na topologia em árvore, as mensagens provenientes

dos nós sensores têm apenas um caminho até atingir o coordenador, sendo que, na falha de um nó, os restantes nós deixam de ter acesso à rede ZigBee.

Atendendo às características de mobilidade dos nós móveis, estes podem ficar incomunicáveis com a rede. Assim, optou-se pela utilização de um cartão de memória para armazenamento dos dados recolhidos. A marcação do percurso realizado pelos mesmos, bem como o acesso à data e hora de aquisição dos dados, é feita através de GPS. Optou-se também pela utilização da tecnologia *Bluetooth* de modo a oferecer ao protótipo uma alternativa ao Xbee no que diz respeito à transmissão da informação armazenada no sensor móvel para a estação de monitorização.

A integração de várias tecnologias no sistema, nomeadamente o *Bluetooth* e Internet maximizam o acesso à informação, tendo em conta a elevada disponibilidade de equipamentos que incorporam estas tecnologias, nomeadamente o telemóvel.

### 3.2 Arquitetura da rede

Na Figura 3.1 apresenta-se a configuração da rede proposta para o sistema de monitorização ambiental.

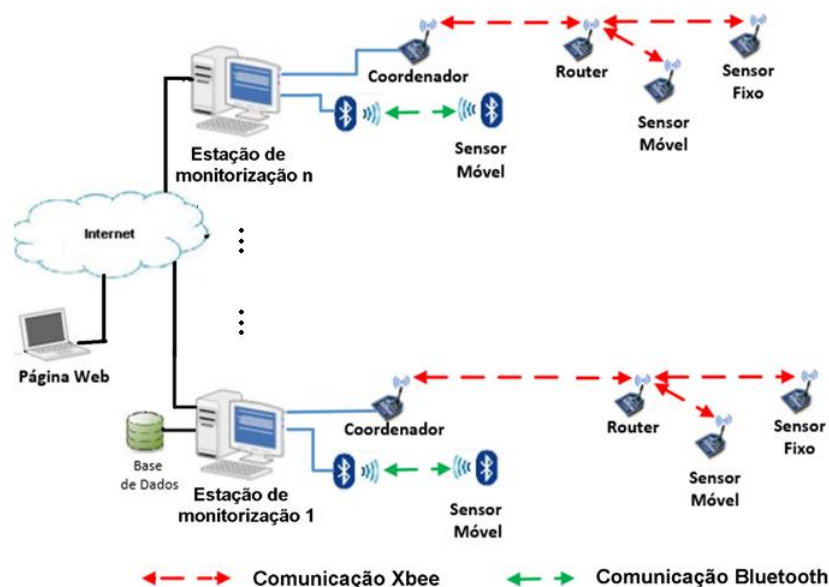


Figura 3.1 – Arquitetura da rede de monitorização ambiental.

A partir da figura 3.1 verifica-se a existência de várias estações de monitorização. É na estação de monitorização 1 onde reside o sistema de monitorização ambiental proposto. A estação de monitorização consiste num computador ligado a uma base de dados existente no laboratório de telecomunicações da UMA, sendo que a este encontram-se ligados através de portas série um coordenador ZigBee e um rádio *Bluetooth*. Na mesma estação, uma aplicação em Java recolhe, trata os dados e insere-os numa base de dados MySQL. Nesta, existe também um servidor de páginas *Web* que aloja uma aplicação onde é possível a visualização gráfica dos dados. Já nas restantes estações de monitorização o

princípio é o mesmo, mas os dados recolhidos convergem para a base de dados presente na estação de monitorização 1.

O sistema funciona da seguinte forma:

- Todas as mensagens dos nós de monitorização fixos são reencaminhadas através da rede ZigBee para a respetiva estação de monitorização.
- Os dados armazenados pelos nós sensores móveis são transmitidos para a estação de monitorização ao fim de um certo período, quer através da rede ZigBee ou através de *Bluetooth*.
- Existe ainda a possibilidade de entregar os dados armazenados no cartão de memória localmente ou remotamente através da página *Web* do sistema criada.

O sistema proposto tem por base a tecnologia de rede de sensores sem fios ZigBee, sendo composto por três tipos de nós:

- Coordenador – Nó composto por um rádio ZigBee e interface USB ligado ao computador. Este nó coordena a rede ZigBee e serve de *gateway* para toda a informação da rede.
- Nós Sensores Móveis – Estes nós monitorizam o poluente CO e temperatura e têm como característica a sua mobilidade.
- Nós Sensores Fixos – Estes nós monitorizam poluentes em ambientes interiores e exteriores. O nó fixo colocado em ambiente exterior monitoriza o poluente CO, temperatura e humidade. O nó sensor fixo colocado em ambiente interior monitoriza os poluentes CO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub>.

A estes, acrescenta-se ainda o nó sensor móvel equipado com *Bluetooth* e que permite também a monitorização do poluente CO.

Cada nó sensor é fundamentalmente composto por quatro partes, nomeadamente: alimentação, microcontrolador, comunicação e sensor(es), como ilustrado pela figura 3.2.

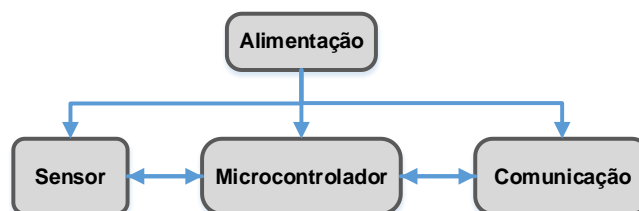


Figura 3.2 – Arquitetura geral de um nó sensor.

Os nós sensores desenvolvidos incorporam ainda outros módulos que não estão incluídos na arquitetura apresentada na figura 3.2, como por exemplo: o sistema de posicionamento global (GPS); relógio em tempo real (RTC); ou cartão micro SD, sendo estes apresentados e descritos nas secções seguintes.

### 3.3 Nós sensores móveis

A monitorização ambiental com nós sensores móveis é realizada por módulos dedicados para o efeito e têm como característica a sua mobilidade. Destinam-se à medição do poluente CO, sendo utilizado para o efeito sensores de CO de baixo custo.

No sistema proposto identificam-se dois tipos de nós sensores móveis, onde a diferença entre eles reside no tipo de tecnologia de comunicação utilizada para a entrega da informação, neste caso XBee ou *Bluetooth*.

#### 3.3.1 Descrição funcional e constituição dos nós sensores móveis

Na figura 3.3 apresenta-se o diagrama funcional dos nós sensores móveis.

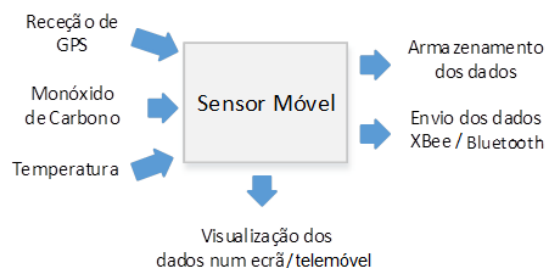


Figura 3.3 – Diagrama funcional dos nós sensores móveis de CO.

O funcionamento destes consiste em obter os dados do GPS, sendo de seguida amostrados os valores de CO e de temperatura. Estes dados são apresentados num visor ou telemóvel e são armazenados num cartão de memória. Posteriormente, são transmitidos pela rede ZigBee ou *Bluetooth*, sendo introduzidos numa base de dados para a sua visualização gráfica.

#### 3.3.2 Componentes utilizados

De seguida, descrevem-se os componentes utilizados nos nós sensores. Na escolha dos componentes foi tido em conta as suas dimensões, baixo consumo e custo.

##### 3.3.2.1 Microcontrolador

O controlo do nó é feito através do microcontrolador ATmega328P presente na plataforma de prototipagem Arduino Fio. Na figura 3.4 é ilustrado o Arduino Fio.

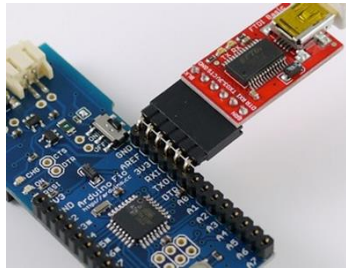


Figura 3.4 – Ilustração do Arduino Fio.

Da figura 3.4 é possível também observar o FTDI que permite carregar o programa para o microcontrolador. O Arduino Fio foi o escolhido para o controlo de todos os nós presentes na rede, destacando-se pelas seguintes características:

- Baixo custo;
- Baixo consumo energético;
- Capacidade de processamento;
- Programação em linguagem C através do Arduino IDE;
- *Socket* para o XBee.

Na tabela 3.1 apresenta-se as características do Arduino Fio.

Tabela 3.1 – Características do Arduino Fio.

Microcontrolador	Tensão Nominal	Corrente por pino I/O	Memória Flash	SRAM	EEPROM	Clock	Peso
ATmega328P	3,3 V	40 mA	32 kB	2 kB	1024 B	8 MHz	9 g

O Arduino Fio apresenta 14 pinos digitais, dos quais 6 podem ser utilizados como saídas PWM e 2 como interrupções externas. Apresenta, também, 8 entradas analógicas com uma resolução de 10 bits. Possui uma ligação para uma bateria de lítio e um circuito de carregamento através de uma ligação USB. Destaca-se a utilização dos pinos digitais D9, D10 e D11 para o protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*) e os pinos analógicos A4 e A5 para o protocolo I<sup>2</sup>C [33]. No Anexo D é possível consultar o esquemático do Arduino Fio.

### 3.3.2.2 Bateria

Um aspeto essencial nos nós sensores consiste na alimentação. Pode ser feita por baterias, fontes renováveis ou diretamente da rede de energia elétrica.

A fonte de energia utilizada para alimentar os nós sensores foi a bateria de lítio recarregável, com uma tensão nominal de 3,7 V e capacidade de 2000 mAh. Na figura 3.5 apresenta-se a bateria e a curva de descarga da mesma.

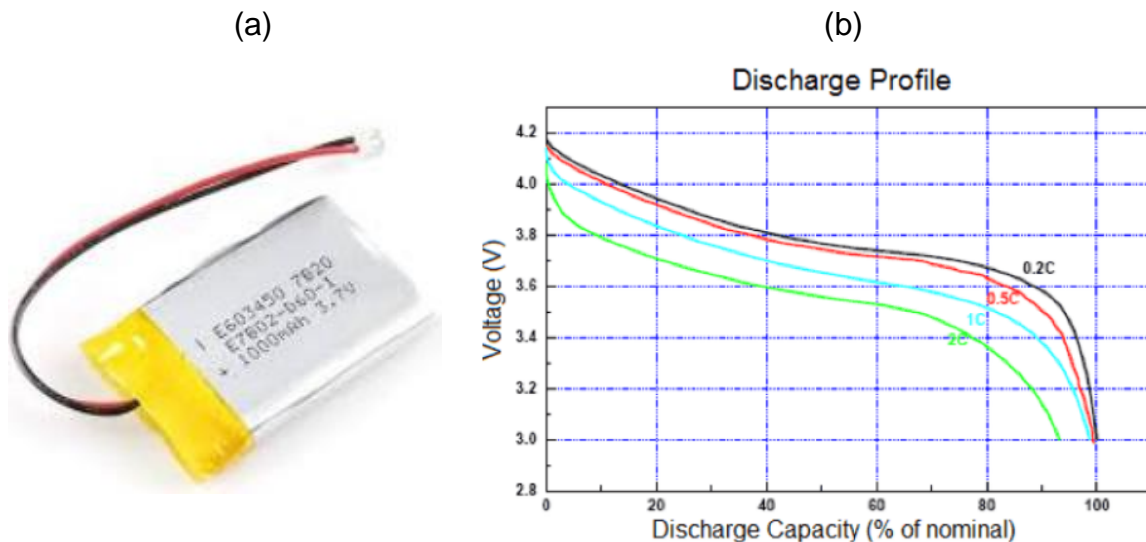


Figura 3.5 – Bateria de Lítio: a) Ilustração da bateria; b) Curva característica da descarga da bateria.

Estas baterias possuem um circuito de proteção incluído, garantindo que a bateria não carregue acima dos 4,2 V e não descarregue abaixo dos 3,0 V. Caso contrário estas são facilmente danificadas.

### 3.3.2.3 Sensor de CO - TGS5042

No mercado existem diversos tipos de sensores de monóxido de carbono. Os sensores eletroquímicos são constituídos por células contendo um eletrólito e elétrodos e o seu funcionamento é descrito mais detalhadamente em Anexo E. Os sensores eletroquímicos requerem pouca ou nenhuma energia para o seu funcionamento e apresentam à sua saída uma corrente proporcional ao gás medido. Verifica-se que os sensores eletroquímicos são mais viáveis quando o consumo dos dispositivos é relevante [34].

Neste tipo de sensores, o valor obtido é normalmente expresso em ppm. No entanto, é útil expressar esse valor em  $\text{mg}/\text{m}^3$ . A equação de conversão, assumindo uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$  é dada por

$$\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = \frac{(\text{ppm}) \times 12,187 \times M}{298,15} = 1,145 \times (\text{ppm}) \quad (3.1)$$

onde  $M = 28,01$  é a massa molar do monóxido de carbono. É assumida uma pressão de 1 atmosfera.

O sensor TGS5042 comercializado pela Fígaro e representado na figura 3.6 é um sensor eletroquímico de baixo custo, composto por dois elétrodos (elétrodo de trabalho e contra elétrodo), que fornece uma saída em corrente que varia linearmente, consoante a concentração de CO presente no ar [35]. Pela tabela 2.7, em comparação com outros sensores verifica-se que este sensor tem pouca sensibilidade. No entanto,

apresenta um custo muito mais baixo, tendo sido um objetivo neste trabalho avaliar o desempenho deste sensor na medição de monóxido de carbono próximo das fontes poluidoras, nomeadamente justo a vias rodoviárias e em parques de estacionamento.

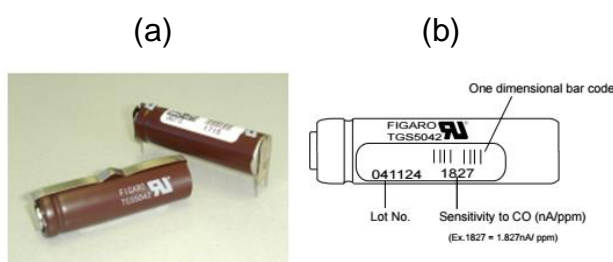


Figura 3.6 – Sensor TGS5042: a) Ilustração do sensor. b) Dados da calibração do sensor [36].

O seu formato é semelhante ao de uma bateria de tamanho padrão AA. A utilização do TGS5042 é ideal para dispositivos que operam a baterias, sendo utilizado em aplicações residenciais, comerciais e industriais. É disponibilizado pelo fabricante diversa informação, nomeadamente o desenho de modelos de circuitos típicos para a medição de CO [36] [37]. A seguinte tabela 3.2 apresenta as principais características do sensor.

Tabela 3.2 – Características do sensor TGS5041.

Gama de medição	Sensibilidade	Tempo de resposta (T90)	Temperatura de operação	Peso
0 – 10000 ppm	1,2 – 2,4 nA/ppm	Inferior a 90 s	-40°C a +70°C	12 g

O sensor tem como demais características a dependência com a temperatura, à pouca sensibilidade a outros gases que não o gás alvo, a elevada repetibilidade e sensibilidade ao CO, calibração simples, exatidão e não apresenta risco de derrame do eletrólito [35]. No anexo F são apresentadas as curvas de dependência do sensor à temperatura e da influência de outros gases.

A nota informativa da Fígaro [36] recomenda não aplicar uma tensão ao sensor superior a  $\pm 10$  mV de modo a não o danificar. Recomenda também curto circuitar os seus terminais quando este não se encontra ligado ao circuito de medição devido à polarização que ocorre nos elétrodos, caso contrário é necessário um longo período para estabilizar a saída do sensor.

A calibração do sensor de CO TGS5042 consiste na utilização da sensibilidade do sensor impressa na lateral do mesmo.

Em [36] são apresentados pela Fígaro circuitos de condicionamento de sinal que permitem converter a corrente fornecida pelo sensor TGS5042 em tensão, por forma a ser medida por um microcontrolador. O circuito de condicionamento de sinal utilizado é apresentado na figura 3.7.

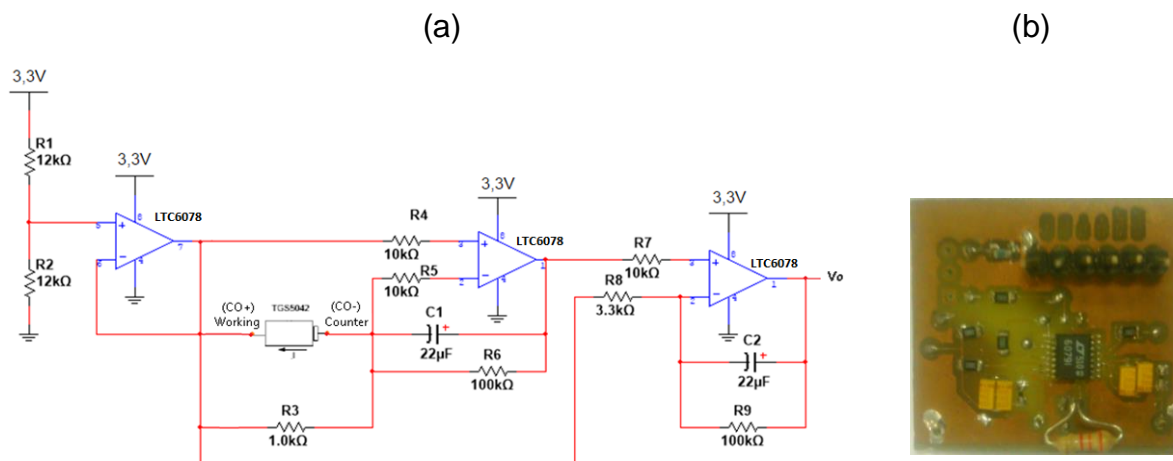


Figura 3.7 – Condicionamento de sinal do sensor TGS5042: a) Circuito elétrico; b) Módulo construído.

O circuito é composto por um *buffer* que à saída apresenta uma tensão de referência imposta pelo divisor resistivo. Esta tensão de referência permite aos dois andares de amplificação seguintes funcionarem fora da sua região não linear. A corrente do sensor é convertida numa tensão proporcional à concentração de CO através dos seguintes dois andares de amplificação. Na figura 3.7b é possível observar o módulo do circuito de condicionamento criado e o consumo medido foi de 0,523 mA. De referir a utilização do AmpOp LTC6079 com entradas de elevada impedância e *rail-to-rail*.

O circuito de condicionamento de sinal na figura 3.7 converte a corrente produzida pelo sensor, segundo a seguinte equação

$$[CO](\text{ppm}) = (V_{\text{medido}} - V_{\text{referência}}) / 3,13 / \frac{\alpha}{10^{-9}} \quad (3.2)$$

onde  $V_{\text{medido}}$  corresponde à tensão (em mV) à saída do circuito,  $V_{\text{referência}}$  é a tensão (em mV) à saída do circuito de medição num ambiente livre de CO a uma temperatura de 20°C e  $\alpha$  a sensibilidade do sensor (em nA/ppm).

No último estágio de aquisição do valor de CO tem-se um ADC de 10 bits que limita a resolução deste valor. Considerando o circuito de condicionamento de sinal do sensor de CO descrito pela equação (3.2) e uma resolução do ADC de 3,22 mV, para o caso de um sensor com uma sensibilidade de 1,518 nA/ppm é possível distinguir no mínimo concentrações de 0,68 ppm. Com foco a aumentar a sensibilidade a concentrações menores, reduziu-se a tensão de referência do ADC do microcontrolador de 3,3 V para 1,1 V. Assim, é possível registar concentrações a partir de 0,23 ppm.

Foi avaliado a influência da temperatura no desempenho do sensor TGS5042. Para tal, primeiramente foi medido o valor à saída do circuito de condicionamento de sinal à temperatura ambiente de 25°C e livre de CO. Após ligar os componentes, deixou-se o sistema estabilizar durante algum tempo, tendo-se depois registado a tensão de referência  $V_{\text{referência}}$  à saída do circuito de condicionamento e registado valores entre 125 e 130 mV.

De modo a avaliar a influência da temperatura no sensor, este foi colocado conjuntamente com um termístor numa caixa estanque de modo a não ser influenciado pelo CO. Depois, colocou-se a caixa no interior de uma viatura, sob a influência do sol durante duas horas e meia, sendo depois retirada e colocada à sombra de modo a diminuir a temperatura no interior da caixa durante duas horas. Na figura 3.8 apresentam-se os dados obtidos.

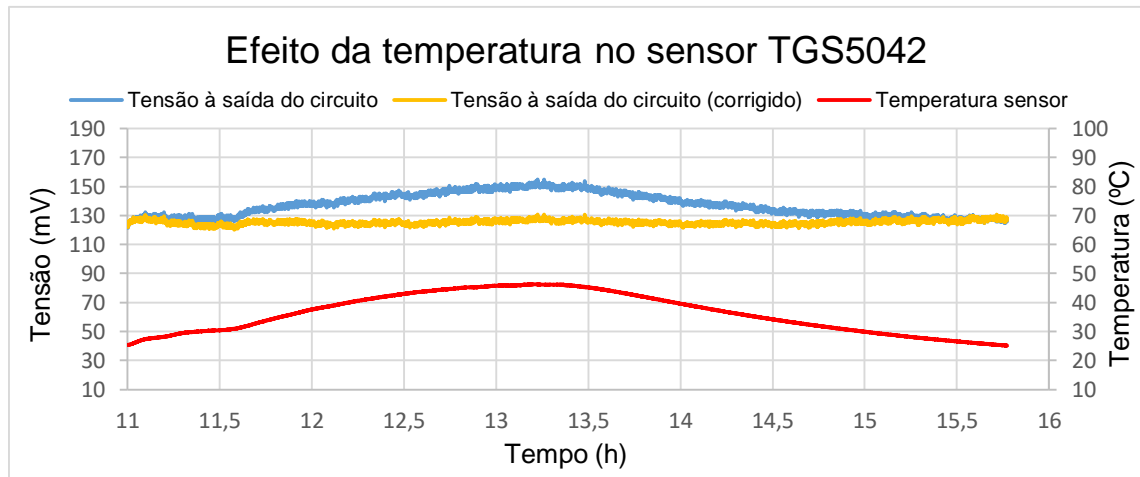


Figura 3.8 – Influência da temperatura na medição de CO.

Tratando-se de um sensor eletroquímico, o TGS5042 é afetado pela temperatura, que altera os resultados das medições. Da figura 3.8 extraiu-se a equação de compensação de temperatura para o sensor dada por.

$$correção = \frac{1,124 \times T_{sensor} + 95,03}{125} \quad (3.3)$$

com  $T_{sensor}$  a temperatura do sensor medida pelo sensor de temperatura.

À equação (3.2) é aplicada a compensação sendo dada por

$$[CO](ppm) = \left( \frac{V_{medido}}{correção} - V_{referência} \right) / 3,13 / \frac{\alpha}{10^{-9}} \quad (3.4)$$

Sem compensação é possível verificar que sem a presença de CO a tensão à saída do circuito de medição aumentou para 150 mV. Pela equação (3.1) e, na ausência de CO, o erro cometido para uma temperatura de aproximadamente 50°C é de aproximadamente de 4,6 ppm.

### 3.3.2.4 Sensor de temperatura

A monitorização da temperatura é realizada por um termístor. É um sensor de temperatura utilizado para os mais diversos fins, como por exemplo para controlar a temperatura em dispositivos eletrónicos, para implementação de alarmes, para desenvolvimentos de termómetros, em sistemas de ar-condicionado, entre outros.

Tratam-se de semicondutores sensíveis à temperatura, ou seja, apresentam uma resistência que varia com a sua temperatura [38]. Existem dois tipos de termístores básicos. O termístor PTC (*Positive Temperature Coefficient*), que apresenta um aumento da sua resistência com o aumento da temperatura e o NTC (*Negative Temperature Coefficient*), que diminui a sua resistência com o aumento da temperatura. O termístor utilizado é do tipo NTC. O esquema elétrico de interligação ao microcontrolador é apresentado na figura 3.9.

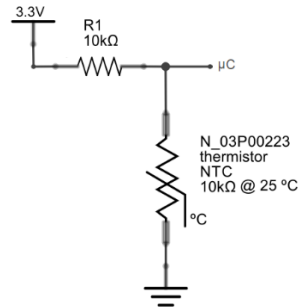


Figura 3.9 – Esquema elétrico de ligação ao termístor.

O termístor é um componente não linear, onde a variação da sua resistência com a temperatura não é linear. Para o cálculo da temperatura é utilizado o método do fator beta, sendo utilizada a seguinte equação:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \left( \frac{R}{R_0} \right) \quad (3.5)$$

onde  $T$  é a temperatura medida (em Kelvin),  $T_0 = 298$  K,  $B = 4220$  é o fator beta do termístor utilizado,  $R_0 = 10$  kΩ é a resistência do termístor a 25°C e  $R$  é a resistência do termístor a uma dada temperatura.

### 3.3.2.5 GPS

Para a medição da posição foi utilizado o módulo GPS MiniMod da Sparkfun. O módulo apresenta 3 terminais: VCC, GND e TX. Permite obter dados em intervalos de 1 segundo e a um *baud rate* de 4800 bps. As mensagens NMEA contêm, para além dos dados de posicionamento, diversas informações sobre o sistema de posicionamento, como o número de satélites utilizados, hora e data atual, entre outros. O GPS MiniMod utiliza o recetor GPS MN1010 em conjunto com uma micro antena e um LNA (*Low Noise Amplifier*) SMA661AS de 18 dB da ST Electronics [39]. Na figura 3.10 apresenta-se o GPS MiniMod da Sparkfun.



Figura 3.10 – GPS MiniMod da Sparkfun [39].

O módulo recetor GPS MN1010 permite monitorizar até 12 satélites em simultâneo (12 canais), obter uma precisão menor que 3 metros e o seu consumo é inferior a 75 mW. Os tempos de aquisição de dados válidos TTFF (*Time To First Fix*) são de 42 segundos para *Cold Start*, 8 segundos para *Hot Start* e 2 segundos para a reaquisição [39]. A estrutura das mensagens recebidas seguem o protocolo NMEA 018 v3.0. Na tabela 3.3 são apresentados os diversos tipos de mensagens recebidos pelo módulo.

Tabela 3.3 – Tipos de mensagens recebidas.

ID da mensagem	Descrição
GGA	<i>GPS fix data</i>
GSA	<i>DOP and active satellites</i>
GSV	<i>Satellites in view</i>
RMC	<i>Recommended Minimum specific GNSS data</i>
VTG	<i>Course over ground and ground speed</i>
ZDA	<i>Time and date</i>

Todas as mensagens NMEA iniciam com um cifrão, “\$”, e terminam com quebra de linha. Após ao cifrão surge o ID do remetente (*GP* para o GPS e *GL* para o GLONASS) seguido do ID da mensagem. Todos os restantes dados são delimitados por vírgulas e podem ser consultados em [39]. Das mensagens recebidas apenas são extraídos os parâmetros de interesse, nomeadamente a latitude, longitude, data, hora e o indicador da validade da posição.

### 3.3.2.6 Armazenamento

Para o armazenamento optou-se pela utilização de um SD Card. Trata-se de um pequeno dispositivo de memória não volátil que permite expandir a memória dos equipamentos eletrónicos. Existem três tipos principais de cartão de memória, o Standard SD, o mini SD e o micro SD. Optou-se pela utilização do micro SD dado o seu reduzido tamanho, comparativamente ao mini SD e o Standard SD. A alimentação do micro SD é feita entre 2,7 V e 3,6 V. No mercado é possível encontrar cartões de memória com uma capacidade de armazenamento entre alguns MB até a algumas dezenas de GB. Foram utilizados cartões de memória com capacidade de armazenamento de 2 GB, sendo esta capacidade de memória suficiente para o volume de dados a armazenar no período de interesse. Utilizou-se, em conjunto com o cartão de memória, um suporte micro SD. Na figura 3.11 é apresentado o cartão micro SD e o esquemático dos pinos.

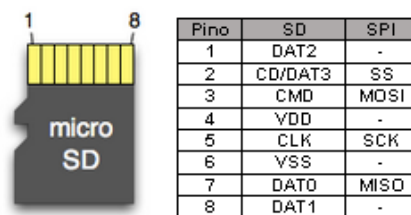


Figura 3.11 – Descrição dos pinos existentes no micro SD Card.

A comunicação entre o microcontrolador e o cartão de memória é realizada através do protocolo SPI. Pela figura 3.11 é possível observar também os pinos que interligam o cartão SD ao SPI. Este último trata-se de um protocolo síncrono de dados em série, que permite comunicar com um ou mais dispositivos secundários [40]. Quando usado, o protocolo SPI, existe um dispositivo mestre (microcontrolador) e um dispositivo escravo (cartão SD).

### 3.3.2.7 Display

Para a visualização do resultado das medições foi utilizado o *display* PDC8544 da Philips apresentado na figura 3.12.

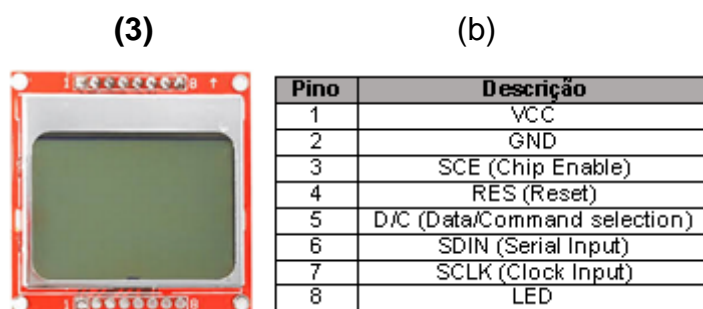


Figura 3.12 – Display PDC8544 da Phillips: a) Ilustração; b) Descrição do *pinout*.

Trata-se de um display monocromático de 84x48 pixels que opera com uma tensão de 3.3V. Apresenta um baixo consumo, sendo direcionado para dispositivos que operam com baterias [41].

### 3.3.2.8 Comunicação – XBee

O rádio XBee é produzido pela empresa DIGI [42]. O XBee destaca-se por suportar o protocolo ZigBee e ser de pequena dimensão. O módulo XBee tem um baixo consumo energético, nomeadamente no modo adormecido, e permite a comunicação entre dispositivos remotos que operam à frequência 2,4 GHz. Na figura 3.13 apresentam-se quatro versões do XBee produzidos pela DIGI, no que diz respeito ao tipo de antena utilizada.

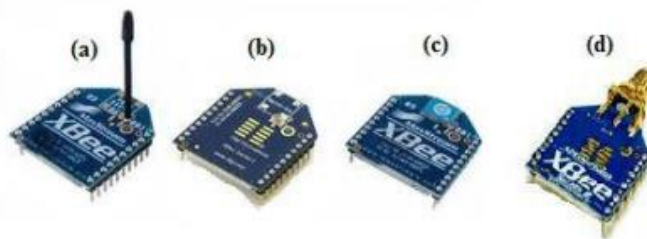


Figura 3.13 – XBee. A) Antena *whip*; b) Conector U.FL; c) Antena chip; d) Conector RPSMA.

O rádio XBee e o microcontrolador comunicam através da interface UART. O módulo apresenta portas E/S digitais ou analógicas e uma saída em PWM (Anexo G). A Figura 3.14 ilustra a comunicação UART entre o microcontrolador e o módulo XBee, assim como a comunicação entre dois módulos XBee.

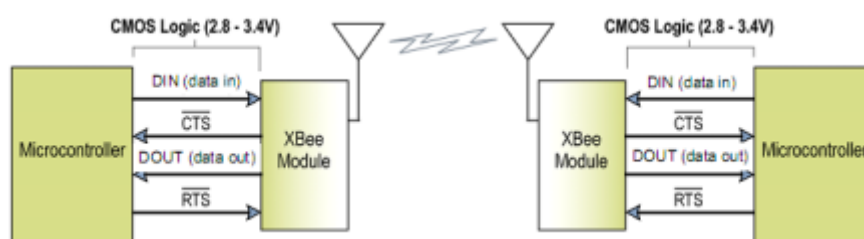


Figura 3.14 – Comunicação UART entre o microcontrolador e XBee.

Cada módulo XBee vem pré-configurado com um *firmware*. Estão disponíveis quatro *firmwares*, nomeadamente: o XBee 802.15.4 e DigiMesh 2.4 pertencentes à série 1; XBee Znet 2.5 e XBee ZigBee pertencentes à série 2. Estes *firmwares* podem ser carregados para os módulos XBee, utilizando o programa X-CTU disponibilizado pela DIGI.

Na tabela 3.4 são apresentadas as características principais da série 1 e série 2 [43].

Tabela 3.4 – Características da série 1 e série 2 do XBee.

	<b>XBee Série 1</b>	<b>XBee Série 2</b>
<b>Alcance RF (Urbano/Interior)</b>	Até 30 m	Até 40 m
<b>Alcance RF (Linha de vista/Exterior)</b>	Até 100 m	Até 120 m
<b>Potência de Transmissão</b>	1 mW (0 dBm)	2 mW (3 dBm)
<b>Sensibilidade de Recepção</b>	-92 dBm (1% PER)	- 98 dBm (1% PER)
<b>Tensão de Trabalho</b>	2,8 a 3,4 V	2,8 a 3,6 V
<b>Corrente (Transmissão)</b>	45 mA @ 3,3 V	40 mA @ 3,3, V
<b>Corrente (Recepção)</b>	50 mA @ 3,3 V	40 mA @ 3,3 V
<b>Corrente (modo adormecido)</b>	10 $\mu$ A	1 $\mu$ A
<b>Frequência</b>	ISM 2,4 GHz	ISM 2,4 GHz

A série 2 apresenta melhores características face à série 1, precisamente num maior alcance, maior potência de transmissão, maior sensibilidade na recepção e menor consumo energético. Os módulos XBee podem operar em modo AT e modo API. No modo AT, também designado por modo transparente, os módulos atuam

como se fossem uma linha de comunicação em série. No modo API toda a informação é constituída por tramas (*frames*), as quais podem conter informação diversa, nomeadamente: endereçamentos; comandos; mudanças de estado; entre outros. No Anexo G pode observar-se mais detalhadamente o formato da trama API.

### 3.3.2.9 Comunicação – *Bluetooth*

Para a transmissão da informação do nó sensor móvel foi utilizado o módulo *Bluetooth* BTBee Pro. Este módulo *Bluetooth*, ilustrado na figura 3.15, é projetado para comunicações sem fios *Bluetooth* e pode ser ligado ao *socket* XBee presente no Arduino Fio. A comunicação entre o microcontrolador e o módulo é feita através da interface UART. O módulo é compacto e apresenta uma tensão de trabalho de 3,3 V e baixo consumo, com uma corrente típica de 20 mA e corrente máxima de 40 mA [44].

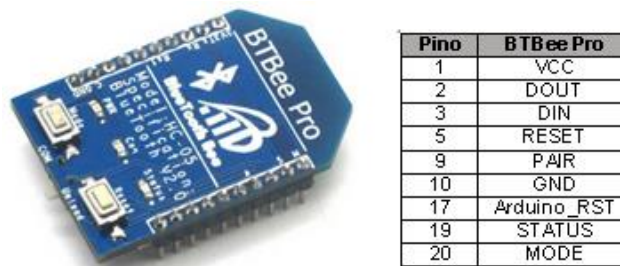


Figura 3.15 – Módulo *Bluetooth* BTBee Pro e respetivo *pinout*.

Através do comando AT é possível configurar ou obter diversos parâmetros do mesmo, designadamente o *baud rate*, versão do módulo, entre outros. O emparelhamento do módulo BTBee Pro com uma máquina consiste em fazer uma pesquisa por dispositivos *Bluetooth*. Após encontrar o módulo, é introduzido o código de emparelhamento. O código de emparelhamento pré definido para o módulo é “12345”, sendo que este código pode ser alterado através de um comando AT. Após o emparelhamento do módulo, este fica sempre associado a uma mesma porta COM da máquina, não sendo esta alterada.

### 3.3.3 Arquitetura

Escolhidos os vários componentes que compõem os nós sensores móveis, definiu-se a arquitetura dos mesmos, sendo esta ilustrada pela figura 3.16.

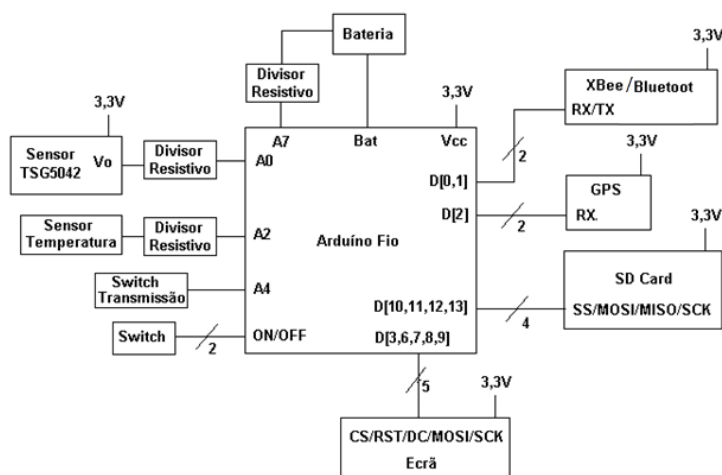


Figura 3.16 – Arquitetura dos nós sensores móveis.

Para além de todos os componentes já mencionados, é de referir os blocos divisor resistivo – que têm a função de reduzir o nível de tensão à entrada dos ADC para uma tensão máxima de 1,1 V. A arquitetura apresenta também um interruptor que permite ligar/desligar o nó sensor e um interruptor que permite transmitir os dados armazenados no cartão SD para a estação de monitorização através do Xbee ou *Bluetooth*. No nó sensor móvel utilizou-se o rádio Xbee com a antena *chip*, sendo esta a antena disponível de menor dimensão.

Determinou-se o consumo energético estimado dos nós. Para tal, foram tidos em consideração os consumos indicados pelos fabricantes de cada componente.

O consumo do nó quando opera com dois modos – ativo e adormecido – é dado pela equação

$$Consumo\ do\ nó = \frac{Consumo_{modo\ ativo} \times Tempo_{modo\ ativo} + Consumo_{modo\ adormecido} \times Tempo_{modo\ adormecido}}{Duração\ do\ ciclo} \quad (3.6)$$

A autonomia da bateria é dada por

$$Autonomia\ (h) = \frac{Capacidade\ da\ bateria\ (mAh)}{Consumo\ do\ nó\ (mA)} \quad (3.7)$$

Na tabela 3.5 apresenta-se o consumo esperado para os nós sensores móveis com Xbee e *Bluetooth*. Para estes módulos os componentes encontravam-se em modo ativo.

Tabela 3.5 – Estimativa do consumo dos nós sensores móveis.

Componente	Nó sensor móvel com Xbee (mA)	Nó sensor móvel com Bluetooth (mA)
Arduino FIO	3,8	3,8
Rádio Xbee S2	40	-
Bluetooth	-	20

Circuito de condicionamento	0,523	0,523
Display PCD 8544 (sem <i>backlight</i> )	1	-
Display NHD	-	-
GPS	20	20
Micro SD	10	10
Consumo total	75,32	54,32

Pela equação (3.6) obteve-se um consumo estimado de 7,32 mA para o nó sensor móvel com XBee e 54,32 mA para o nó sensor móvel com *Bluetooth*. Para as baterias utilizadas de capacidade de 2000 mAh, determinou-se através de (3.7) que estes operavam, sem recarga, durante aproximadamente 27 horas e 37 horas, respetivamente.

### 3.4 Nós sensores fixos

Na rede existem dois tipos de nós sensores fixos: nó sensor fixo exterior – destinado à medição de CO, temperatura e humidade; e nó sensor fixo em ambiente interior – destinado à medição de partículas PM<sub>10</sub> e CO<sub>2</sub>.

#### 3.4.1 Descrição funcional e constituição dos nós sensores Fixos

Na figura 3.17 apresenta-se o diagrama funcional dos nós sensores fixos. O funcionamento consiste em amostrar os valores dos sensores e transmitir os mesmos através da rede ZigBee.

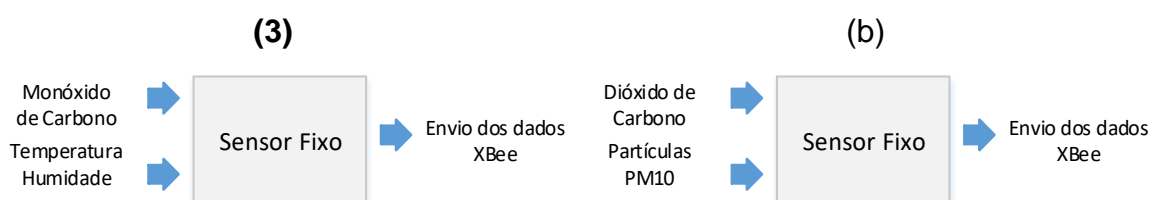


Figura 3.17 – Diagrama funcional dos nós sensores fixos: a) nó sensor fixo exterior; b) nó sensor fixo interior.

O funcionamento destes consistiu em obter os valores de CO, temperatura e humidade para o nó sensor fixo exterior e CO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub> para o nó sensor fixo interior. Os valores obtidos são transmitidos pela rede ZigBee e introduzidos na base de dados para a sua visualização gráfica.

#### 3.4.2 Componentes utilizados

Na escolha dos componentes teve-se novamente em conta as suas dimensões, baixo consumo e custo.

### 3.4.2.1 Sensor de partículas

Para a monitorização de partículas utilizou-se o sensor PPD42 comercializado pela *Shinyei* [45]. A escolha deste sensor resultou de um estudo comparativo feito entre o PPD42 e o GP2Y1010AU0F, cujos resultados serão apresentados no capítulo Resultados. Na figura 3.18 é apresentado o sensor PPD42.

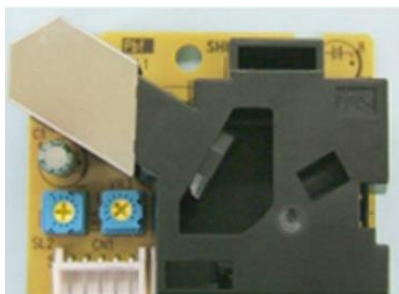


Figura 3.18 – Sensor de partículas PPD42 comercializado pela Shinyei [45].

Os sensores de partículas de baixo custo, geralmente, detetam as partículas em suspensão no ar ambiente através do espalhamento da luz. A deteção das partículas é realizada por meio ótico, onde geralmente um díodo emissor de luz infravermelho e um fototransístor estão posicionados de modo a detetar a luz refletida pelas partículas presentes no ar. Geralmente, estes sensores têm a capacidade de medir partículas de diâmetro superior a 1  $\mu\text{m}$ . Na tabela 3.6 resumem-se as principais características do sensor.

Tabela 3.6 – Características dos sensores PPD42 [45].

Tensão	Consumo	Tempo de estabilização	Temperatura de operação	Peso
5 V	450 mW	1 min	0°C a 45°C	24 g

O PPD42 apresenta um sinal PWM (*pulse width modulation*) proporcional ao número de partículas medidas e uma gama de medição de partículas de 0 a 28,000 partículas/litro. Este sensor tem a particularidade em diferenciar partículas PM2.5 e PM10.

O sensor PPD42 possui duas saídas digitais, P1 e P2, onde P1 permite obter a contagem de partículas PM10 e P2 a contagem de PM 2.5 [45][46]. A metodologia apresentada na nota informativa [50] permite determinar o número de partículas presente no ar, que consiste em medir a percentagem de tempo em que a saída do sensor permanece no estado *LOW*, *LPO* (*Low Pulse Ocupancy*), num período de 30 segundos. À percentagem de tempo em que a saída permanece no estado *LOW* é aplicada a curva de conversão do sensor apresentada em [45]. Assim, o número de partículas é dado por

$$PM10 = 1,1LPO^3 - 3,8LPO^2 + 520LPO + 0,62 \quad (3.8)$$

Em [47] é apresentado o método que permite relacionar o número de partículas medido e a sua densidade, em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 3.4.2.2 Sensor de CO<sub>2</sub>

Para a monitorização do CO<sub>2</sub> utilizou-se o sensor Cozir-W20, como é ilustrado na figura 3.19. O sensor deteta a concentração de CO<sub>2</sub> medindo a absorção de luz infravermelha. Este é um sensor comercializado num módulo autónomo, que inclui o condicionamento do sinal medido (conversão e linearização), fornecendo o valor final em ppm através de uma porta UART a cada 0,5 s [48].



Figura 3.19 – Sensor de CO<sub>2</sub> Cozir-W20 [48].

Na tabela 3.7 apresentam-se as principais características do sensor Cozir-W20.

Tabela 3.7 – Características do sensor de CO<sub>2</sub> Cozir-W20.

Tensão (V)	Consumo (mW)	Tempo de estabilização (s)	Temperatura de operação (°C)	Peso (g)
3,25 até 5,5	3,5	10	-25 a 55	8

O sensor Cozir-W20 apresenta uma gama de medição de 0-20% (0 a 200000 ppm) de CO<sub>2</sub> e vem calibrado de fábrica em toda a sua escala, mas oferece vários meios para calibrar tanto o desvio da escala como o declive da reta de conversão, sendo necessário o uso de um gás de calibração.

A conversão do valor obtido pelo sensor em ppm para  $\text{mg}/\text{m}^3$  é dada por

$$\left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right) = \frac{(\text{ppm}) \times M}{24,465} = 1,8 \times (\text{ppm}) \quad (3.9)$$

onde  $M = 44,01$  é a massa molar do dióxido de carbono.

O fabricante propõe três formas de calibração para o sensor, nomeadamente a calibração por meio de uma concentração de CO<sub>2</sub> conhecida, a calibração num ambiente livre de CO<sub>2</sub>, tipicamente nitrogénio, e a calibração num ambiente de “ar limpo”, onde neste ambiente é assumido uma concentração de 450 ppm de CO<sub>2</sub>.

O fabricante recomenda deixar o sensor estabilizar no ambiente de calibração. Após isso, é enviado um comando correspondente à forma de calibração utilizada para o sensor.

### 3.4.2.3 Sensor de temperatura e humidade

Para a monitorização da temperatura e humidade foi utilizado o sensor SHT15 comercializado pela *Sensirion*. Trata-se de um sensor de baixo consumo e pequeno tamanho. Este sensor vem calibrado de fábrica e produz uma saída digital, sendo que a leitura dos valores faz-se através de uma interface série, que permite uma qualidade do sinal e oferece imunidade a interferências externas [49]. Na figura 3.20 observa-se o sensor SHT15, comparando-se com um fósforo.

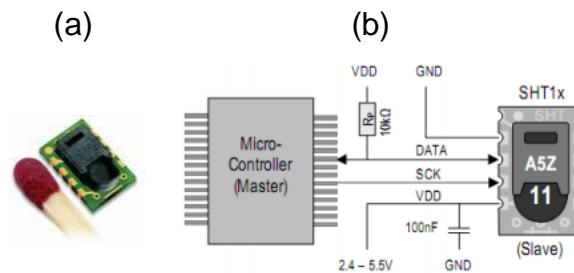


Figura 3.20 – Sensor SHT1x. a) Ilustração do sensor; b) Esquema elétrico da ligação do sensor com o microcontrolador.

Na figura 3.20b é apresentado o circuito elétrico típico proposto pelo fabricante. São utilizados dois pinos do microcontrolador para a interface do sensor e a sua alimentação situa-se na gama de 2,4 V e 5,5 V. O resultado proveniente do sensor necessita de conversão e compensação consoante o modelo do sensor. Para o cálculo do valor da temperatura e para uma alimentação de 3,3 V são necessários os seguintes coeficientes:  $d1 = -39,5$  e  $d2 = 0,01$ . A temperatura é obtida então por

$$temp (^{\circ}C) = d1 + d2 \times amostra\_temp \quad (3.10)$$

De igual forma, para o cálculo da humidade são necessários os seguintes coeficientes:  $c1 = -2,0468$ ,  $c2 = 0,0367$ ,  $c3 = -1,5955E^{-6}$ ,  $t1 = 0,01$  e  $t2 = 0,00008$ . É necessário também o cálculo da seguinte equação:

$$RH\_linear = c1 + c2 \times amostra\_humid + c3 \times amostra\_humid^2 \quad (3.11)$$

A humidade é obtida pela equação

$$Humid(\%) = (temp - 25) \times (t1 + t2 \times amostra\_humid) + RH\_linear \quad (3.12)$$

### 3.4.3 Arquitetura

Escolhidos os diversos componentes que fazem parte do nó sensor fixo interior, definiu-se a arquitetura apresentada na figura 3.21.

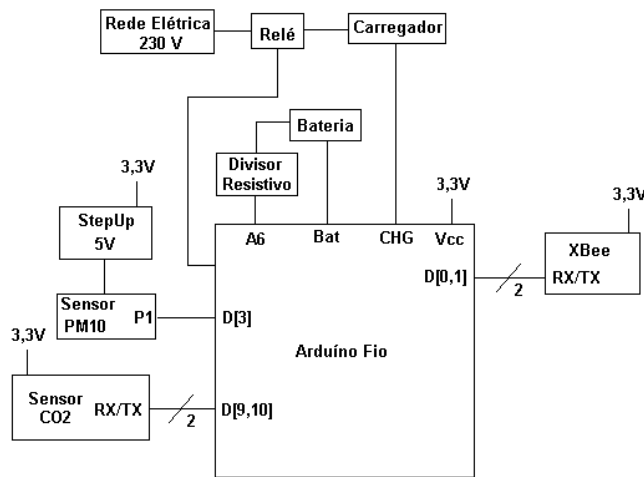


Figura 3.21 – Arquitetura do nó sensor fixo interior.

Como este nó será colocado num ambiente interior, a sua alimentação é feita através da rede elétrica, onde um carregador alimenta o Arduino e carrega a bateria. Destaca-se a utilização de um relé do tipo *latch* que desliga o carregamento da bateria quando esta se encontra carregada. De notar também a utilização de um *step-up* utilizado para alimentar o sensor de partículas, que permite elevar a tensão do microcontrolador de 3,3 V para 5 V que alimenta o sensor de partículas.

Na figura 3.22 apresenta-se a arquitetura do nó sensor fixo exterior.

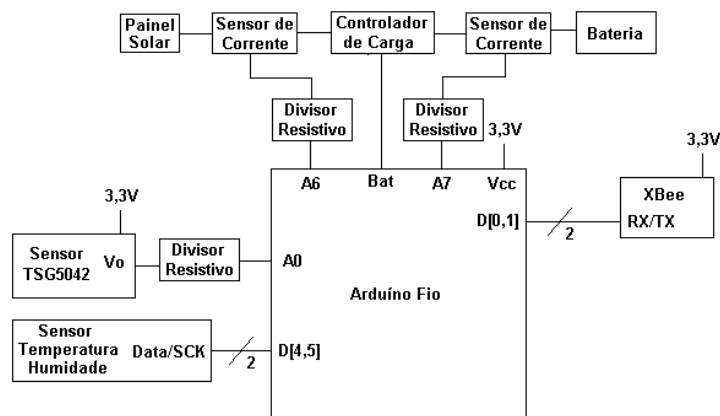


Figura 3.22 – Arquitetura do nó sensor fixo exterior.

Como este nó será colocado no exterior, a sua alimentação deveria ser feita através de painéis solares. No entanto, este nó foi alimentado através da rede elétrica, no período de testes do protótipo. Apresenta-se o projeto do sistema solar para este nó sensor a seguir.

Na tabela 3.8 apresentam-se os consumos esperados para os nós sensores fixos interior e exterior. O nó fixo exterior manteve-se no modo ativo durante 0,2 s e no modo adormecido durante 9,8 s. Já o nó interior manteve-se em modo ativo pois é necessário contar as partículas durante um período de 30 segundos. Durante este tempo apenas o XBee entra em modo adormecido, entrando em modo ativo durante 0,2 s para o envio da informação.

Tabela 3.8 – Estimativa do consumo dos nós sensores fixos.

Componente	Nó fixo interior		Nó fixo exterior	
	Ativo (mA)	Adormecido (mA)	Ativo (mA)	Adormecido ( $\mu$ A)
Arduíno FIO	3,8	3,8	3,8	180
Rádio XBee S2	40	0,0035	40	3,5
Circuito de condicionamento	-	-	0,523	523
Sensor DHT15	-	-	0,55	0,3
PPD42	90	90	-	-
Cozir-W20	1,1	1,1	-	-
Consumo total	134,9	94,90	44,87	706,8

Através da equação (3.6) o consumo total para o nó interior, tendo em conta que este se encontrava durante 0,2 s em modo ativo e 30 s em modo adormecido, foi estimado em 95,16 mA. A partir de (3.7) a duração da bateria de 2000 mAh é de aproximadamente 21 horas.

Projetou-se o sistema de alimentação através de painéis solares para o nó sensor fixo exterior.

Tendo em conta os dois modos de operação, através de (3.6) obteve-se um consumo para o nó de 1,60 mA, totalizando um consumo diário de 32 mAh. Tendo em conta a capacidade da bateria utilizada de 850 mAh, através de (3.7) determinou-se que esta tinha capacidade de alimentar o nó durante aproximadamente 1 mês.

Para o carregamento da bateria utilizou-se um painel fotovoltaico MSX005F de 0,5 W, com tensão em circuito aberto de 4,6 V e corrente de curto-circuito de 160 mA. Tendo em conta o mês de dezembro como sendo o mês de menor exposição solar diária, totalizando em média 4,5 h de sol por dia, o painel é capaz de produzir por dia, no máximo 720 mAh.

Utilizou-se o controlador de carga MCP73871 USB/Solar, tendo uma eficiência de 82,5%. Assim, a produção diária gerada pelo painel entregue à bateria é de 594 mAh. Assim, é possível carregar a bateria em aproximadamente 4 dias.

### 3.5 Módulo de calibração

O módulo de calibração destina-se à calibração dos sensores de CO TGS5042, permitindo avaliar a qualidade dos resultados obtidos por este sensor de baixo custo. O sensor utilizado neste módulo oferece maior resolução e precisão, no entanto o seu custo é mais elevado.

#### 3.5.1 Descrição funcional e constituição do módulo de calibração

Na figura 3.23 apresenta-se o diagrama funcional do módulo de calibração. O funcionamento do módulo consiste em obter a cada segundo a data a medição de CO,

sendo estes apresentados num ecrã. Estes dados são também registados num cartão de memória.

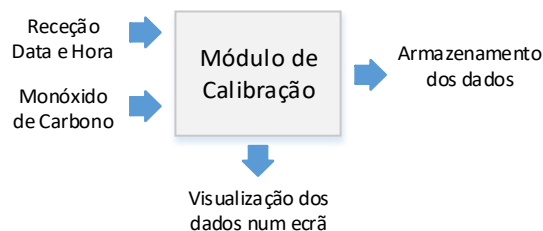


Figura 3.23 – Diagrama funcional do módulo de calibração de CO.

### 3.5.2 Componentes utilizados

Os componentes utilizados neste nó sensor são semelhantes aos utilizados pelos nós sensores anteriormente apresentados, sendo estes: o microcontrolador, cartão SD e bateria.

#### 3.5.2.1 Sensor de CO

Adquiriu-se CO-B4 da *Alphasense* apresentado na figura 3.24. É, um sensor eletroquímico pertencente à família de sensores B4, que fornece uma corrente proporcional à concentração de CO medido. É ideal para aplicações nas quais a deteção de níveis baixos de CO na ordem de ppb é exigida e permite medir concentrações de CO desde 0 a 1000 ppm com elevada resolução e sensibilidade. A sua utilização é adequada em equipamentos de segurança portáteis e monitorização do ar. Este é composto por quatro elétrodos, elétrodo de trabalho (WE), referência (REF), auxiliar (AUX) e contra elétrodo (C) [50].



Figura 3.24 – Sensor CO-B4.

A seguinte tabela 3.9 apresenta as principais características do sensor [50].

Tabela 3.9 – Características do sensor CO-B4 da Alphasense.

Gama de medição	Sensibilidade	Tempo de resposta (T90)	Temperatura de operação	Peso
0 – 1000 ppm	420 - 650 nA/ppm	Inferior a 25 s	-30°C - +50°C	<13 g

A nota informativa da Alphasense indica os tipos de gases que possam influenciar nas medições, estando estes apresentados na tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Sensibilidade do sensor CO-B4 a outros gases [50].

Gás interferente	Concentração do gás interferente		Sensibilidade
$H_2S$	5 ppm		< 1
$NO_2$	5 ppm		< 1
$CL_2$	5 ppm		< 1
$NO$	5 ppm		< -3
$SO_2$	5 ppm		< 0,1
$H_2$	100 ppm		< 10
$C_2H_4$	100 ppm		< 1
$NH_3$	20 ppm		< 0,1

O sensor de CO vem equipado com um filtro eletroquímico que permite filtrar gases interferentes. A Alphasense afirma que o filtro torna-se menos eficiente com o passar do tempo e à exposição prolongada dos gases interferentes. Dado que o sensor foi adquirido recentemente, espera-se que outros gases não interfiram no resultado das medições.

Para a medição do CO é utilizada uma resistência de carga entre 33 e 100 ohm entre o elétrodo de trabalho e contra elétrodo [50]. No entanto, para obter medições com baixo ruído, a Alphasense recomenda a utilização da sua placa ISB conjuntamente com o sensor de CO.

A ISB (*Individual Sensor Board*) permite converter a corrente gerada pelo sensor em uma tensão que possa ser lida por um microcontrolador. Para cada tipo de sensor da família B4 - CO, NO, NO2 O3, respetivamente - a ISB é ligeiramente diferente, sendo necessário ter o cuidado de utilizar a ISB com o sensor correspondente. A *Alphasense* recomenda adquirir o sensor CO-B4 juntamente com a placa ISB, ficando à responsabilidade da mesma proceder à calibração do sistema. A *Alphasense* afirma ser possível obter medições com baixo ruído na ordem de  $\pm 4$  ppb dada a utilização de componentes de baixo ruído. A figura 3.25 ilustra a ISB para o sensor CO-B4 e a figura ilustra os terminais de ligação presentes na ISB [51].

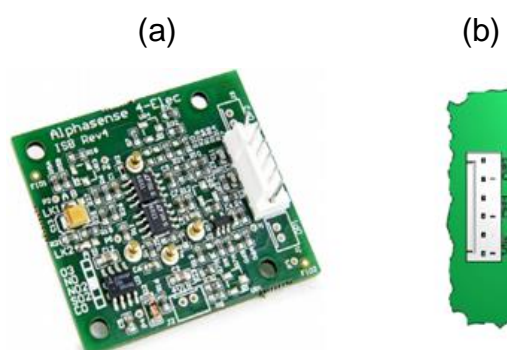


Figura 3.25 – ISB: a) Face inferior da ISB. b) Pinout da ISB.

Os terminais vin e vin- permitem alimentar a ISB com uma fonte de tensão DC de  $6 \pm 0,2$  V. Os terminais OP1 e OP2 correspondem respetivamente às tensões do elétrodo de trabalho (WE) e elétrodo auxiliar (AUX). A ISB foi alimentada por microcontrolador de 3,3V, pelo que se tornou necessário elevar esta tensão.

Ao adquirir o sensor juntamente com a ISB, a Alphasense calibra o sistema. No invólucro que contém o sensor juntamente com a ISB vêm impressas as tensões de *offset* do eletrodo de trabalho WE e do eletrodo auxiliar AUX em mV e a sensibilidade expressa em mV/ppm. Para o sensor adquirido, os valores de calibração foram:  $offset_{WE} = 492\text{ mV}$ ;  $offset_{Aux} = 334\text{ mV}$ ;  $Sensibilidade = 405\text{ mV/ppm}$ .

No entanto, ao adquirir a ISB separadamente com o sensor, a Alphasense recomenda realizar os seguintes passos para verificar as tensões de *offset* e sensibilidade:

1. Acoplar o sensor à ISB;
2. Alimentar A ISB com uma tensão DC de 6 V;
3. Permitir a estabilização do sensor durante pelo menos 6 horas;
4. Aplicar “ar limpo” durante 20 minutos;
5. Obter as tensões de *offset* para o WE e AUX;
6. Verificar a sensibilidade, utilizando concentrações conhecidas do gás alvo.

Em [52] são apresentados alguns valores esperados à saída dos pinos OP1 e OP2 da ISB para os diferentes tipos de sensores da família B4, sendo estes apresentados na tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Características elétricas da ISB.

Gás	Offset (WE / Aux) (mV)	Sensibilidade mV/ppm	Sensibilidade Min/ max (mV/ppm)	Gama máxima de medição (ppm)	Ganho da ISB (mV/nA)
CO	270/ 340	320	230/550	15	1,76
H <sub>2</sub> S	350/ 350	1650	1600/1700	3	1,76
SO <sub>2</sub>	355/ 345	450	379/520	10	1,76
NO	545/ 510	800	550/ 930	5	2,53
NO <sub>2</sub>	225/ 245	430	340/ 520	10	1,24
O <sub>3</sub>	260/ 300	1150	1000/1200	5	1,01

Verifica-se da Tabela 3.11 que o valor máximo de medição de CO encontra-se em 15 ppm. Esta limitação deve-se à tensão máxima de alimentação, ganho e sensibilidade da ISB.

A metodologia de cálculo utilizada teve por base as especificações técnicas fornecidas pela Alphasense no que se refere à conversão do sinal obtido pelo sensor em mV para ppm. Para obtenção da concentração de CO em ppm é utilizada a seguinte equação:

$$[CO](ppm) = \frac{(WE\ OP1 - WE\ Vo) - (AUX\ OP2 - AUX\ vo)}{S} \quad (3.13)$$

onde WE OP1 é a tensão do eletrodo WE (mV), AUX OP2 é a tensão do eletrodo WE (mV), WE Vo é o *offset* do eletrodo WE fornecido pela Alphasense (mV), AUX Vo é o *offset* do eletrodo AUX fornecido pela Alphasense (mV) e S é sensibilidade (mV/ppm);

### 3.5.2.2 Display

Para a visualização dos dados foi utilizado neste módulo o *display* NHD-C12832A1Z comercializado pela *Newhaven*, sendo este apresentado na figura 3.26.

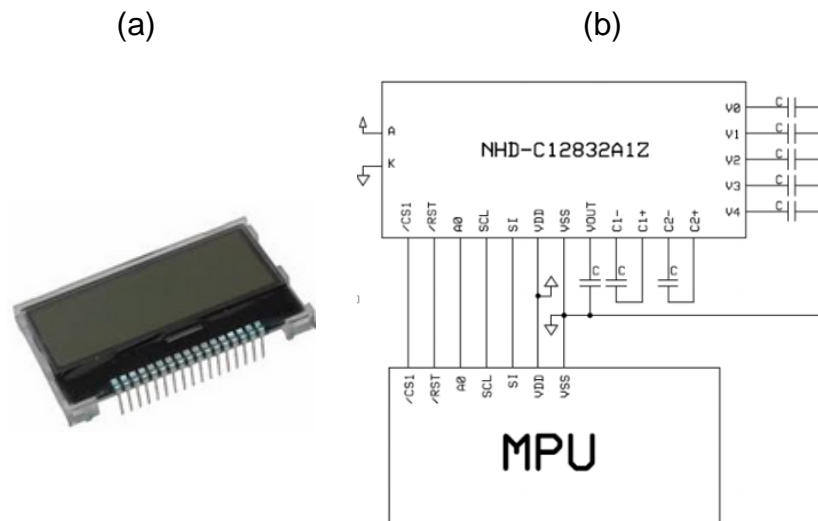


Figura 3.26 – Display NHD: a) Ilustração do display; b) Esquema de ligação ao microcontrolador;

Trata-se de um pequeno display de 128x32 pixels, que pode ser alimentado com 3,3 V e apresenta um consumo de 1,5 mW [53]. Na figura 3.26b é apresentado o esquema de ligação a um microcontrolador proposto pelo fabricante.

### 3.5.2.3 RTC – *real time clock*

A obtenção da data e hora é realizada pelo RTC DS3234 ilustrado pela figura 3.27. Trata-se de um componente de baixo custo e de pequena dimensão. A comunicação entre o RTC e o microcontrolador é realizada através do protocolo SPI [54].

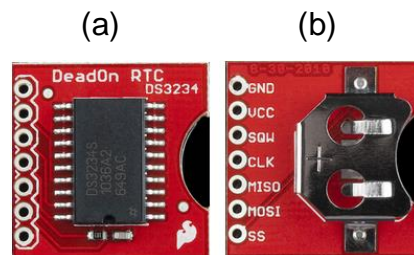


Figura 3.27 – RTC Breakout - DS3234: a) Face superior; b) Face inferior.

Pela Figura 3.27b é possível observar o encaixe para bateria que permite manter a hora e data correta do RTC, quando este não se encontra ligado à fonte de alimentação do nó sensor.

### 3.5.3 Arquitetura

Escolhidos os diversos componentes que constituem o módulo de calibração, definiu-se a arquitetura do mesmo. Na figura 3.28 apresenta-se a arquitetura final do nó sensor de calibração.

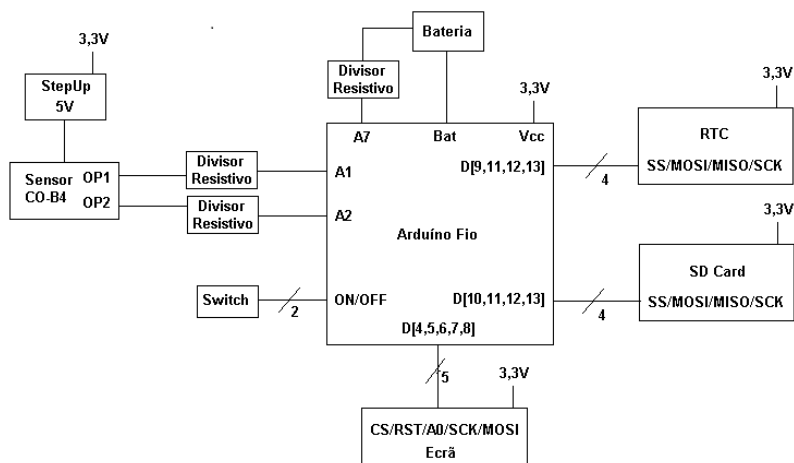


Figura 3.28 – Arquitetura do sensor de calibração.

Para além de todos os componentes já mencionados refere-se a utilização de um *step-up* utilizado para alimentar o sensor CO-B4 que permite elevar a tensão do microcontrolador de 3,3 V para 5 V.

Na tabela 3.12 apresenta-se o consumo esperado para o módulo de calibração. Neste módulo os componentes encontravam-se em modo ativo.

Tabela 3.12 – Estimativa do consumo do módulo de calibração.

Componente	Módulo de calibração
Arduíno FIO	3,8
Display NHD	20
RTC	0,4
ISB	1,5
Micro SD	10
Consumo total	35,7 mA

Através de (3.6) obteve-se um consumo estimado de 74,8 mA. Para as baterias utilizadas de capacidade de 2000 mAh, determinou-se através de (3.7) que a duração da bateria é de aproximadamente de 56 horas.

## 4. Software e interfaces do sistema

Neste capítulo é abordado todo o *software* implementado no protótipo de monitorização ambiental. É descrita a configuração da rede ZigBee, onde serão mencionados aspetos referentes à configuração dos rádios XBee. São apresentadas as plataformas de armazenamento e tratamento de dados dos nós sensores, nomeadamente a aplicação Java já existente e as respetivas alterações efetuadas, por forma a acomodar um novo tipo de nó sensor, o nó sensor móvel. É apresentado o mecanismo de visualização geográfica Google Maps. Por fim, é apresentada a plataforma de visualização, através de uma página de internet.

### 4.1 Configuração da rede ZigBee

Descreve-se, neste ponto, a configuração dos rádios XBee que implementam a rede ZigBee. Para os módulos do sistema comunicarem com o computador necessitam de integrar um rádio XBee configurado adequadamente.

Identificam-se três tipos de nós no sistema, nomeadamente: o coordenador da rede que serve de *gateway*, ligado diretamente ao computador via porta série; o *router*; e os *end devices* (ou nós terminais) que são aplicados aos módulos móveis e aos módulo interior e exterior. A configuração do rádio XBee pode ser realizada recorrendo à placa de desenvolvimento fornecida pela empresa DIGI, apresentada na figura 4.1, que permite interligar o PC ao rádio XBee através de uma interface USB.

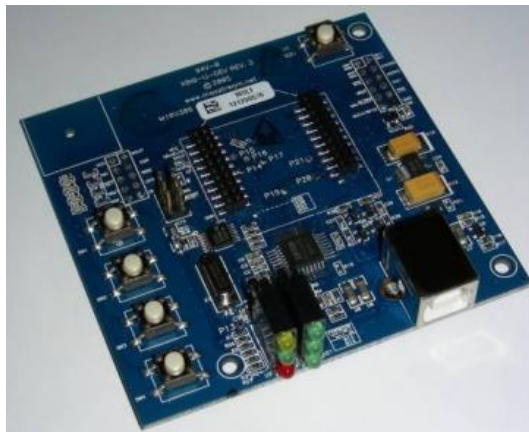


Figura 4.1 – Placa de desenvolvimento da DIGI.

Os rádios XBee são configurados através do *software* X-CTU [55]. Utilizaram-se rádios XBee série 2 em conjunto com o *firmware* XBee, por este ser o *firmware* mais recente que implementa o protocolo ZigBee.

Os rádios XBee são regulados de fábrica para trabalharem no modo AT, embora não sendo este o modo mais adequado para o desenvolvimento do protótipo.

Por isso, procedeu-se à alteração para o modo API. Para configurar cada nó é necessário selecionar os parâmetros adequados no *firmware* e atualizar o módulo XBee respetivo.



```
0xFF, 0xFE, 0x00, 0x00, 0x54, 0x45, 0x53, 0x54, 0x45, 0x6D};
```

Figura 4.3 – Formato da trama ZigBee.

- 0x7E – Byte de início da trama;
- 0x0013 – Comprimento da mensagem (em bytes) ou o número de bytes entre os campos *length* e *checksum*;
- 0x10 – Identificador de API, neste caso transmissão de dados;
- 0x00 – Numeração da mensagem;
- 0x0000000000000000 – Endereço de 64 bits do destinatário;
- 0xFFFE – Endereço de 16 bits do destinatário. FF FE é utilizado quando se desconhece o endereço na rede atual do nó destino;
- 0x00 – Número máximo de saltos de uma mensagem de *broadcast* (0 para número máximo de saltos);
- 0x00 – Opções de transmissão (0x08 – *Multicast*, caso contrário *Unicast*);
- 0x5445535445 – Dados, neste caso representando as seguintes letras: “TESTE”;
- 0xF5 – Byte de *checksum*, calculado a partir da subtração entre FF e os últimos 8 bits da soma dos bytes que são contabilizados para comprimento da mensagem (de 10 a 45). Neste exemplo a soma hexadecimal dá 392, sendo que  $FF-92=F5$ ;

O sistema de base de dados MySQL foi escolhido para o armazenamento de dados, visto oferecer mecanismos adequados para a pesquisa e consulta de dados, para além de centralizar dados provenientes de várias fontes.

A base de dados foi estruturada de forma a guardar todos os dados provenientes dos diversos módulos e encontra-se a funcionar num servidor, localizado nas instalações da UMA.

A aplicação que corre na estação de monitorização, desenvolvida em Java mediante o programa de desenvolvimento Netbeans IDE 6.7 [56], teve por base a aplicação já desenvolvida na cadeira de Sensores e Captação de Energia, denominada por *uma\_xbee\_parser*, e tem a tarefa de receber as mensagens provenientes do coordenador, interpretar e armazenar os diferentes dados na base de dados.

A aplicação conta com várias classes com diversas funções, nomeadamente para a comunicação com a porta série, tratamento das mensagens com diferentes identificadores API, envio de pedido do RSSI e armazenamento dos dados na base de dados.

Houve a necessidade de identificar um novo tipo de trama para os nós sensores móveis, pois estes utilizam a hora e data fornecida por um GPS e não a hora em que

são introduzidos na base de dados. Para tal, a aplicação `uma_xbee_parser` foi alterada por forma a utilizar o tempo e posição de GPS associados a cada parâmetro monitorizado pelos nós sensores móveis. Foi definida uma nova trama que é identificada pelo carácter “\*” como mostra a figura 4.4.

```
*ts=101115165958&C=60&T=2245&L=3265084&I=1690722
```

Figura 4.4 – Definição do formato dos dados na trama dos nós sensores móveis.

A variável “ts” indica a data e hora dos parâmetros monitorizados, tendo o formato DDMMYYHHMMSS. Os restantes valores separados por “&” correspondem aos valores medidos pelos sensores e GPS, onde L corresponde à latitude e I à longitude.

Inicialmente, a aplicação Java `uma_xbee_parser` foi idealizada para lidar com a receção de uma cadência pouco elevada de dados. No entanto, como os nós sensores móveis podem armazenar dados de um ou vários dias de medições, estes dados necessitam de ser descarregados para a aplicação Java a um ritmo elevado.

Foi necessário aumentar o *buffer* de receção para que permitisse à aplicação receber rajadas de grandes quantidades de dados. Para tal, aumentou-se o tamanho da fila circular para um valor de 50000. Para isso, na classe `Msg_buffer.java` alterou-se, dentro da função `public class Msg_buffer`, a constante para `private static final int MAX=50000`. Este valor pode ser aumentado, no entanto o consumo de memória da máquina é superior.

A identificação do novo formato de dados dos nós sensores móveis, apresentado na figura 4.4, foi feita através das alterações na classe `Main.Java`, apresentadas na figura 4.5.

```

private String[][] msgInterpreter(msgXBee m) {
    switch(m.get_apiId()){ // Escolhe o interpretador consoante o XBee API ID
        case 0x90: // Mensagem de dados
            switch(m.get_msgType()){ //Escolhe o interpretador consoante
                // o caracter que indentifica o formato dos dados
                case '?': // Mensagem do tipo: "?Sensor1=valor1&Sensor2=valor2" ...
                    return msgCare_data.msgInterpreter(m.get_data());

                case '*': // Mensagem do tipo: "?Sensor1=valor1&Sensor2=valor2" ..
                    return msgCare_data.msgInterpreter(m.get_data());

                case '#':
                    return msgCare_base.msgInterpreter(m.get_data());
                default:
                    System.out.println("WARNING 2: Message data format unknown");
                    return null;
            }
        }

        case 0x92: // Mensagem de XBee IO Data sample
            return msgCare_XBeeADC.msgInterpreter(m.get_data());

        case 0x97: // Mensagem de RSSI
            return msgCare_rssi.msgInterpreter(m.get_data());

        default:
            System.out.println("WARNING 1: Message API ID unknown");
            return null;
    }
}

```

Figura 4.5 – Novo formato de dados identificado pelo caracter “\*”.

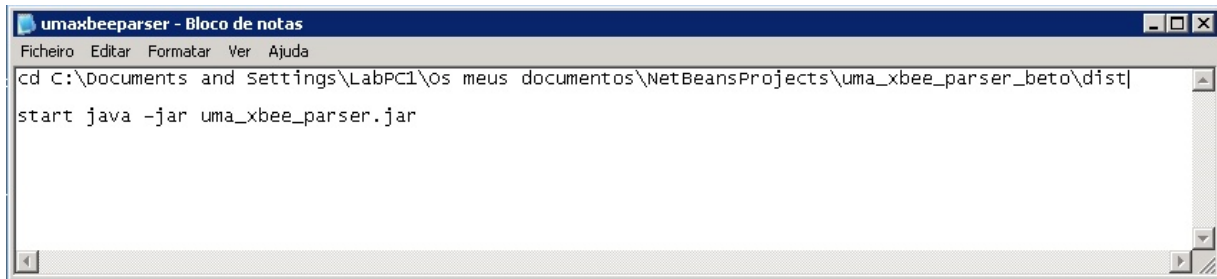
Como referido anteriormente, a aplicação Java aplicava o *time stamp* de acordo com a data e hora que a mensagem, enviada através da rede ZigBee, chegava à estação de monitorização. No entanto, para os nós sensores móveis, o *time stamp* encontra-se na mensagem (figura 4.4). As alterações feitas ao uma\_xbee\_parser encontram-se no Anexo M.

No protótipo desenvolvido é possível, também, ter um ou mais computadores a correr a aplicação uma\_xbee\_parser de modo a recolher os dados dos nós sensores. No entanto, estes dados convergem para a base de dados localizada na UMA. Para introduzir a informação remotamente na base de dados, na função **public class MySQL** da classe **MySQL.java** alterou-se a variável para **private static final String LOCALHOST = "jdbc:mysql://193.136.232.173/"**. De referir, também, que foram abertas algumas exceções à rede da UMA por parte dos serviços informáticos.

A transmissão dos dados armazenados nos nós sensores fixos e nó sensor móvel com XBee é feita através da rede ZigBee. No entanto, o protótipo oferece a possibilidade da entrega da informação do nó sensor móvel por *Bluetooth*.

Para a entrega da informação por *Bluetooth* é utilizada a mesma aplicação Java modificada. Neste caso, em vez dos dados serem entregues pelo rádio ZigBee, é utilizado um rádio *Bluetooth* para a receção dos dados. As tramas enviadas por *Bluetooth* seguem o mesmo formato da trama enviada por XBee, permitindo utilizar a mesma aplicação adaptada sem mais modificações.

De modo a ser possível correr as duas aplicações em simultâneo no mesmo computador, criou-se um ficheiro *batch* que chama o motor de Java para correr a aplicação uma\_xbee\_parser. Na figura 4.6 ilustra-se o ficheiro *batch* criado.



```
umaxbeeparser - Bloco de notas
Ficheiro  Editor  Formatar  Ver  Ajuda
cd C:\Documents and Settings\LabPC1\Os meus documentos\NetBeansProjects\uma_xbee_parser_beto\dist
start java -jar uma_xbee_parser.jar
```

Figura 4.6 – Ficheiro *batch* para correr a aplicação Java.

Ao executar o ficheiro *batch* é apresentada uma janela de comando, onde o utilizador define a porta série, a qual está associada ao rádio ZigBee, como ilustra a figura 4.7. Para o *Bluetooth* basta executar a aplicação novamente e em paralelo, mas definir a porta COM correspondente ao rádio *Bluetooth* instalado na estação de monitorização.



```
C:\WINDOWS\system32\java.exe
Available port name=COM1
PASSOU
Type port name > COM1_
```

Figura 4.7 – Ecrã da linha de comandos da aplicação Java.

É possível ainda entregar a informação armazenada nos nós sensores móveis através do cartão de memória presente nos mesmos, quer localmente quer remotamente através da página Web desenvolvida para o sistema. Para isso, o cartão de memória é introduzido no computador e na página Web é possível carregar a informação armazenada no cartão para a base de dados, para posterior visualização dos dados. O desenvolvimento desta página é descrito na secção 4.5.

### 4.3 Controlo embebido dos nós sensores

O *software* criado para o controlo dos nós sensores presentes no sistema foi desenvolvido em C. Para tal, fez-se uso do ambiente integrado para desenvolvimento de *software* IDE 1.6.5 [57].

Cada programa embebido no microcontrolador dos nós é responsável pelo funcionamento autónomo dos mesmos e a programação destes resume-se à configuração de tarefas periódicas. Na figura 4.8 apresenta-se o fluxograma do programa de controlo do nó sensor móvel com XBee.

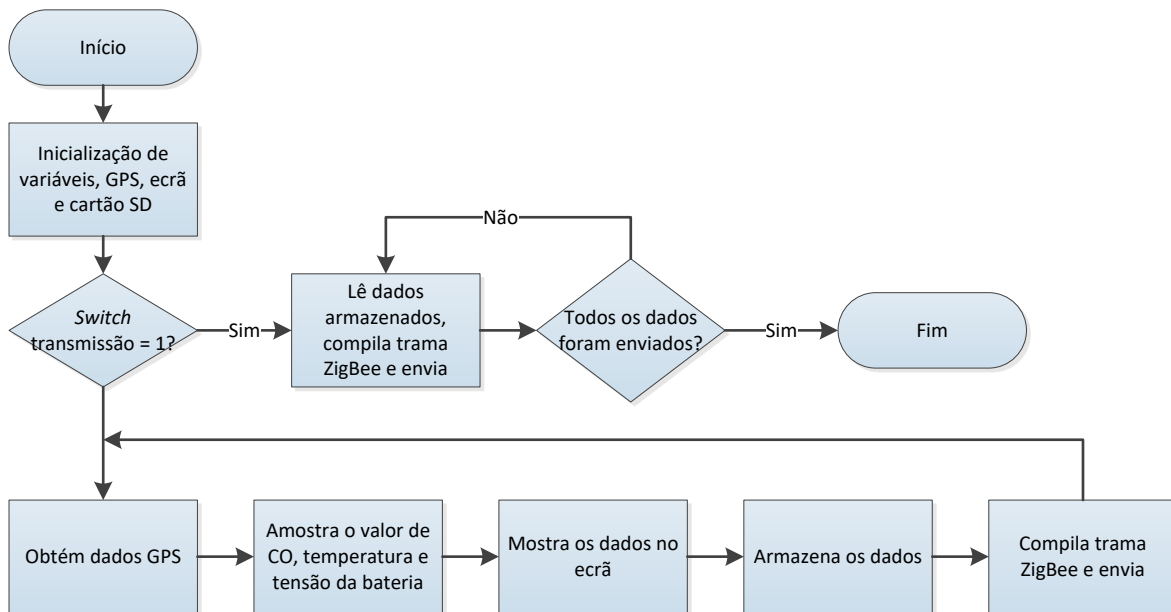


Figura 4.8 – Fluxograma do programa de controlo do nó sensor móvel com XBee.

Para a programação foram utilizadas as bibliotecas PCD8544 para o ecrã e a biblioteca SD para o cartão micro SD.

Ao ligar o nó, dá-se a inicialização de variáveis, do cartão SD, do GPS e do ecrã. É verificado se é necessário transmitir a informação armazenada no cartão SD ou efetuar a medição do CO e temperatura. O período de amostragem entre cada medição é de 2 segundos de modo a ser possível medir a poluição junto à passagem de tráfego. No ecrã são mostrados o valor de CO, temperatura, hora e data da respetiva medição e a tensão da bateria. Estes dados também são armazenados no cartão de memória. No Anexo H apresenta-se o código fonte desenvolvido com os comentários respetivos, que contribuem para uma melhor compreensão do programa.

Na figura 4.9 é apresentado o fluxograma do programa de controlo do nó sensor móvel com *Bluetooth*.

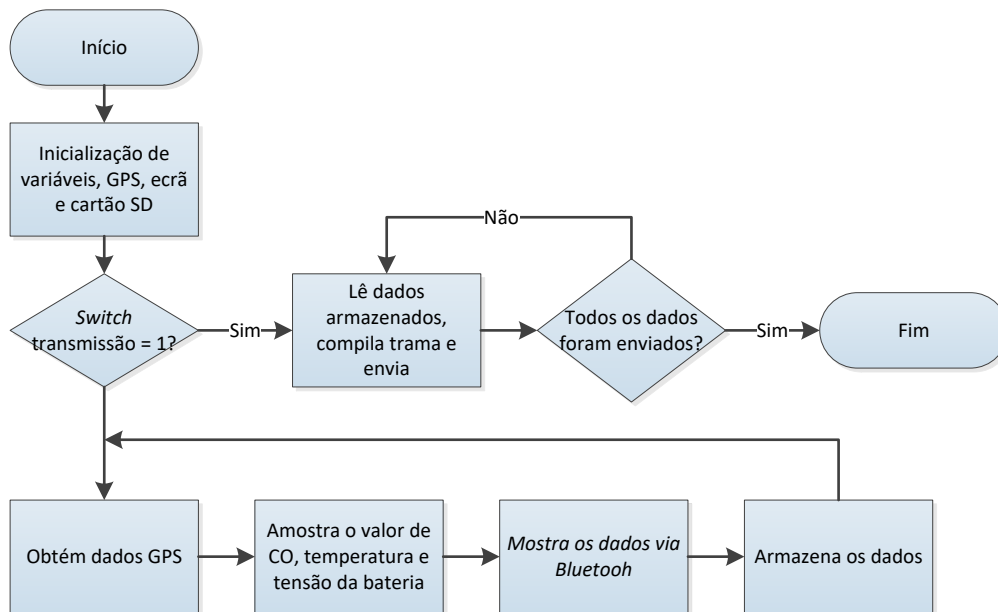


Figura 4.9 – Fluxograma do programa de controlo do nó sensor móvel com *Bluetooth*.

As rotinas periódicas que correm no microcontrolador são semelhantes às apresentadas anteriormente, com a exceção de que através do módulo de *Bluetooth* é possível visualizar o resultado das medições no ecrã de um telemóvel. No Anexo I apresenta-se o código fonte desenvolvido.

O fluxograma do programa de controlo do nó sensor fixo exterior é apresentado na figura 4.10.

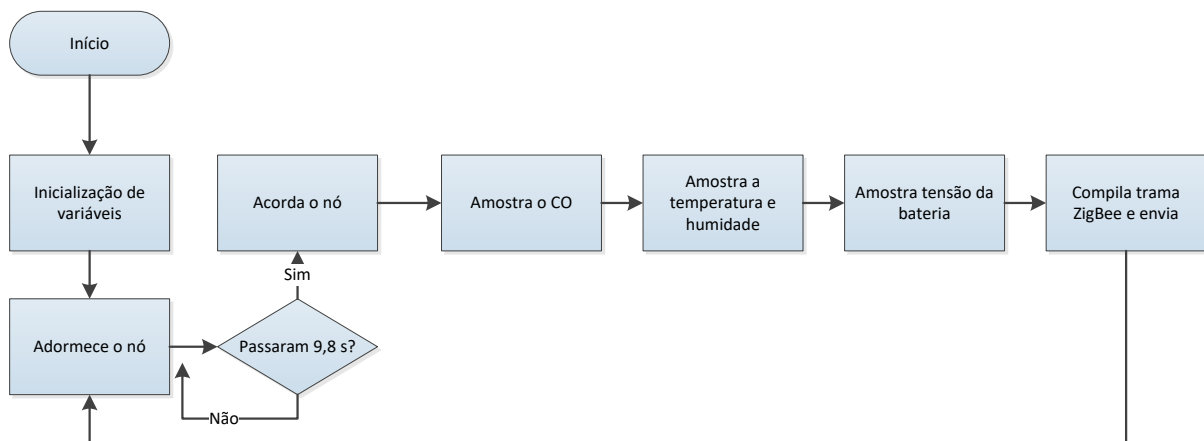


Figura 4.10 – Fluxograma do programa de controlo do nó fixo exterior.

Ao ligar o nó sensor dá-se a inicialização de variáveis. São medidos os valores de CO, de temperatura, de humidade e da tensão da bateria. É compilada a trama ZigBee e transmitida para a rede. O período de amostragem escolhido é de 10 segundos. O código fonte desenvolvido para este nó pode ser consultado no Anexo J.

Na figura 4.11 é ilustrado o fluxograma do programa para o nó sensor fixo interior.

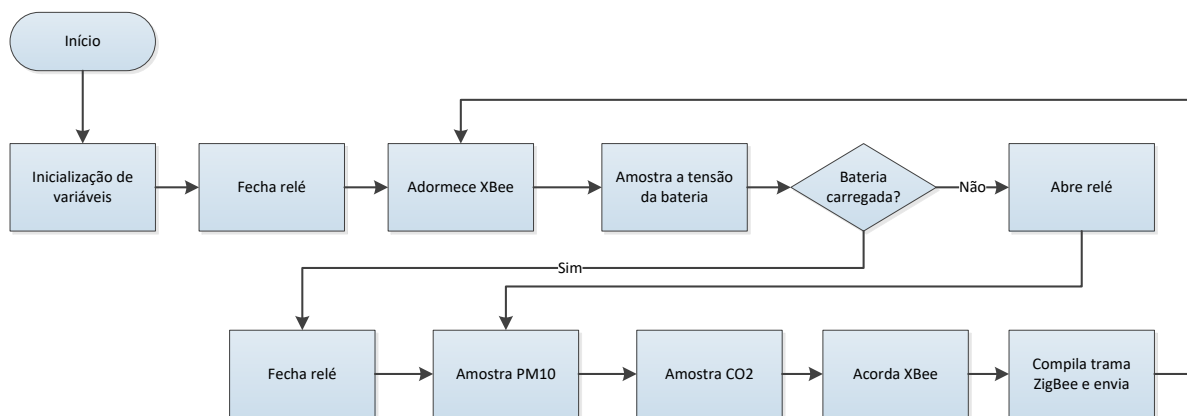


Figura 4.11 – Fluxograma do programa de controlo do nó fixo interior.

A programação do nó sensor resume-se à configuração de tarefas periódicas. Inicialmente dá-se a inicialização de variáveis. São medidos os valores de partículas  $PM_{10}$  de  $CO_2$ . É compilada a trama ZigBee e transmitida para a rede. O período de amostragem é de 30 segundos, sendo este o tempo necessário para o sensor de partículas efetuar a medição. É apresentado no Anexo K o código fonte desenvolvido.

Por último, apresenta-se, através da figura 4.12, o fluxograma do programa de controlo do módulo de calibração.

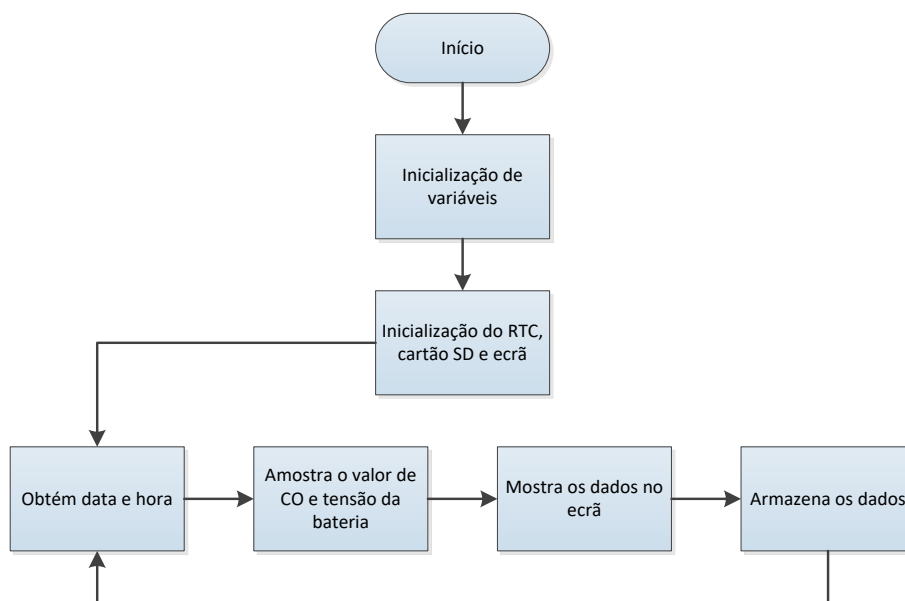


Figura 4.12 – Fluxograma do programa de controlo do módulo de calibração.

Para este módulo foi utilizada a biblioteca U8glib para o *display*. Ao ligar o módulo de calibração, dá-se a inicialização de variáveis, do RTC e do ecrã. O período de amostragem do CO é de 2 segundos. No ecrã são mostrados o valor de CO e a hora e data da respetiva medição. Estes dados são também armazenados no cartão de memória. Apresenta-se o código fonte desenvolvido com os comentários respetivos no Anexo L.

## 4.4 Plataforma de visualização geográfica

A visualização dos dados recolhidos pelos nós sensores móveis é realizada sobrepondo os dados na ferramenta Google Maps disponibilizada pela Google. O Google Maps é uma aplicação de mapas para a web, estando disponível uma API (*Application Programming Interface*) para o desenvolvimento de aplicações Web personalizadas sobre o Google Maps [58].

A API do Google Maps oferece uma série de funcionalidades para a aplicação que se pretende desenvolver, nomeadamente:

- Versão gratuita da API;
- Nível de detalhe do mapa da Região Autónoma da Madeira;
- A maior parte dos utilizadores está familiarizado com a interface de navegação do mapa;
- Existência de documentação de ajuda ao desenvolvimento de aplicações sobre o Google Maps;
- Pode ser acedido através de um computador ou através de um terminal móvel, nomeadamente o telemóvel.

Para ser possível desenvolver a aplicação de visualização no Google Maps é necessário criar um novo projeto e obter uma API *key* em <https://developers.google.com/maps/web>. As primeiras tentativas para desenvolver a aplicação começaram com código HTML e Javascript, necessário para a interação com a API.

Na figura 4.13 apresenta-se um exemplo de como utilizar o Google Maps JavaScript API. No exemplo, é exibido num *browser* uma página de um mapa centrado nas coordenadas (32,66084; -16,91720) e um marcador circular nas coordenadas (32,65834; -16,92940).

```

<!DOCTYPE html> 1

<html>
  <head>
    <title>Simple Map</title>
    <meta name="viewport" content="initial-scale=1.0">
    <meta charset="utf-8">

    <style>
      #map {
        height: 100%;
      }
      html, body {
        height: 100%;
        margin: 0;
        padding: 0;
      }
    </style> 2

  </head>
  <body>

    <div id="map"></div> 3

    <script>
      function initMap() {
        var map = new google.maps.Map(document.getElementById('map'), {
          zoom: 14,
          center: {lat: 32.66084, lng: -16.91720},
          mapTypeId: google.maps.MapTypeId.SATELLITE
        });

        var marker = new google.maps.Marker({
          position: {lat: 32.65834, lng: -16.9242},
          map: map,
          icon: {
            path: google.maps.SymbolPath.CIRCLE,
            strokeColor: 'blue',
            scale: 2,
          },
          title: 'valor',
        });
      }
    </script> 4

    <script src="https://maps.googleapis.com/maps/api/js?key=API_KEY&callback=initMap"
    async defer></script> 5

  </body>
</html>

```

Figura 4.13 – Exemplo de como utilizar o serviço Google Maps.

A partir da figura 4.13 é possível verificar uma série de passos, necessários para a utilização do Google Maps. É declarado em 1 que a aplicação é executada no modo padrão em HTML5, o que significa que esta terá maior compatibilidade nos diversos *browsers*.

É possível definir a altura e o tamanho do mapa que será apresentado na página. Para tal, neste exemplo, em 2 é declarado em CSS que o mapa, com id=map, ocupa 100% da altura da página.

Para que o mapa seja exibido, é necessário reservar um elemento no modelo de objetos do *browser*. Isso em feito em 3, criando um elemento div com id="map".

Em 4 são criadas duas funções – *initMAP* e *marker*. Na primeira função existem duas propriedades obrigatórias: *zoom* e *center*. Estas duas propriedades permitem definir o nível de *zoom* e onde o mapa se encontra centrado quando este é inicializado. A função *marker* permite sobrepor um marcador no mapa. O marcador pode ter diversas formas ou cor e também apresentar texto.

Por fim, o carregamento da API do Google Maps através do *script* apresentado em 5. Quando a API está pronta, é chamada a função especificada usando o parâmetro *callback*. De referir que a *API\_KEY* deve ser substituída pela *API key* gerada para o projeto desenvolvido.

Ao efetuar um percurso com o nó sensor móvel, poderão existir situações onde o sinal recebido pelo recetor GPS seja insuficiente, como por exemplo na passagem dentro de um túnel, originando assim a obtenção de coordenadas inválidas ou nulas nesse troço. No entanto, torna-se útil registar e posteriormente visualizar no mapa os dados de poluição recolhidos nesse local.

Para ser possível representar no mapa os dados recolhidos no troço com coordenadas inválidas torna-se necessário realizar uma aproximação ou interpolação desse troço. Na figura 4.14 apresenta-se um percurso onde apresenta um pequeno troço onde houve perda do sinal GPS. No eixo dos *xx* apresenta-se a latitude e no eixo dos *yy* a longitude.

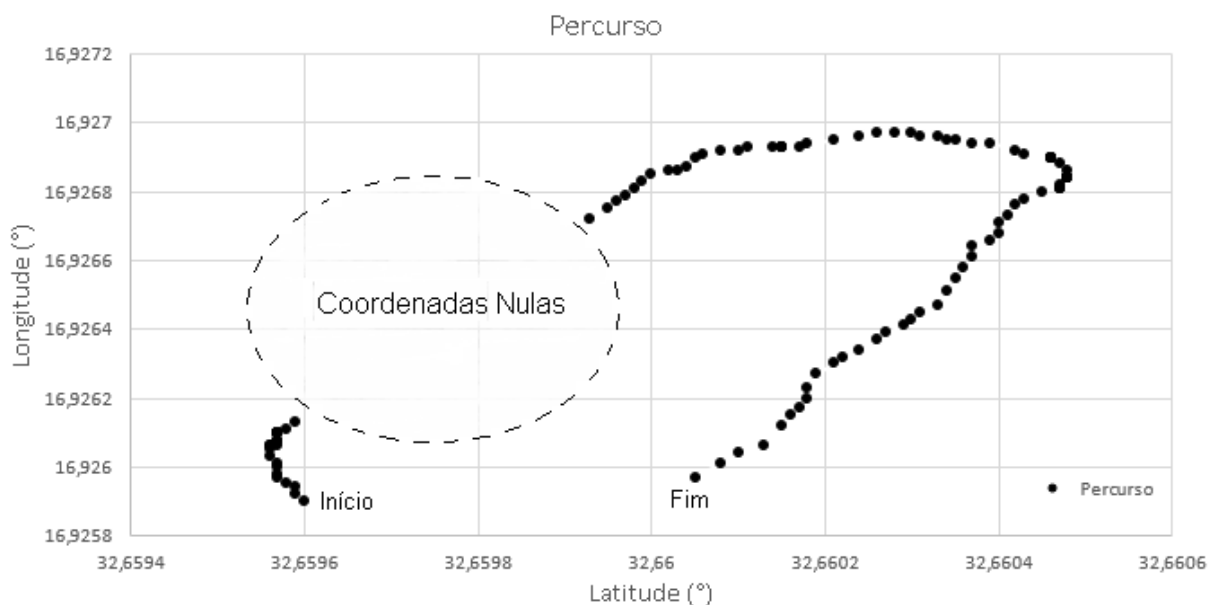


Figura 4.14 – Representação de um percurso com coordenadas inválidas.

Esta aproximação pode ser vista como uma reta entre a última coordenada válida e a primeira coordenada válida, após a última coordenada nula. Essa reta é então dada por

$$lng = m \times lat + b \quad (4.1)$$

com  $lng$  a longitude,  $m$  o declive da reta,  $lat$  a latitude e  $b$  a ordenada na origem.

Para a interpolação das coordenadas é determinado o intervalo (espaçamento) entre as latitudes, sendo dado por

$$intervalo_{lat} = \frac{lat_{final} - lat_{inicial}}{n+1} \quad (4.2)$$

com  $n$  o número de coordenadas inválidas.

As latitudes são então dadas por

$$lat(j) = lat_{inicial} + intervalo_{lat} \times j, \text{ com } j = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

Através de (4.1) as longitudes são dadas por

$$lng(j) = m \times lat(j) + b, \text{ com } j = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

Na figura 4.15 ilustra-se o exemplo apresentado na figura 4.14 após a interpolação das coordenadas.

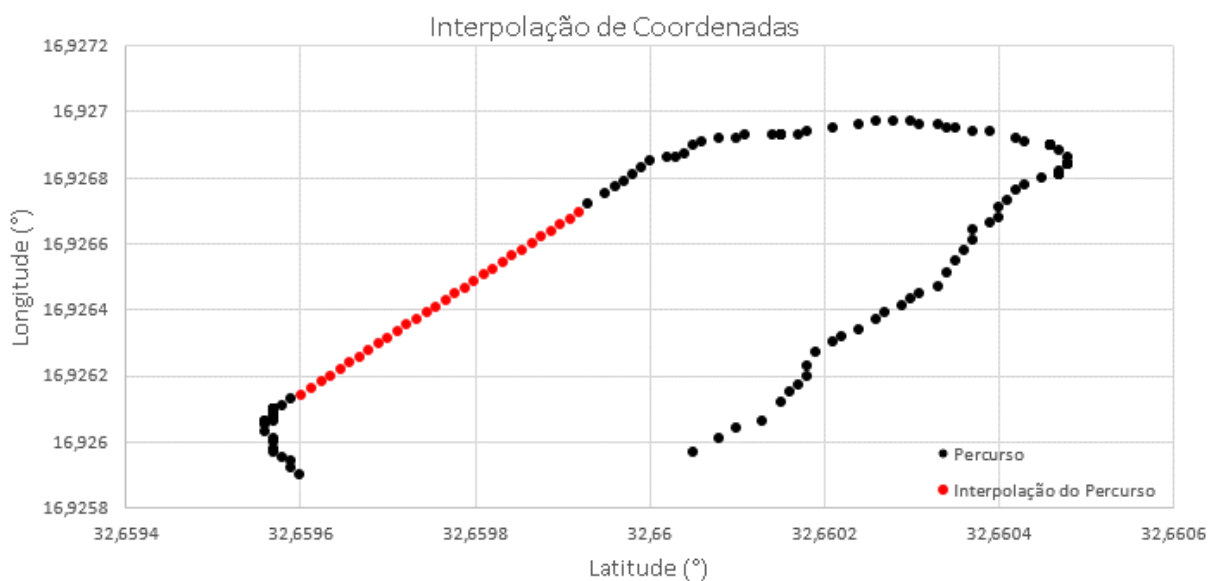


Figura 4.15 – Representação de um percurso com interpolação de coordenadas inválidas.

Após realizar este procedimento, não é possível distinguir trajetos não retilíneos, no entanto fornece uma referência do percurso realizado.

## 4.5 Página Web

Desenvolveu-se uma aplicação *Web* que permite o acesso remoto e a visualização dos parâmetros monitorizados. Para o correto funcionamento da aplicação, instalou-se o pacote XAMPP [59], o qual contém um servidor Apache que

serve como servidor de Internet, um motor PHP e um sistema de base de dados MySQL, os quais são necessários para a elaboração da página Web.

O diagrama de fluxos de dados referente à página Web pode ser visualizado na figura 4.16.

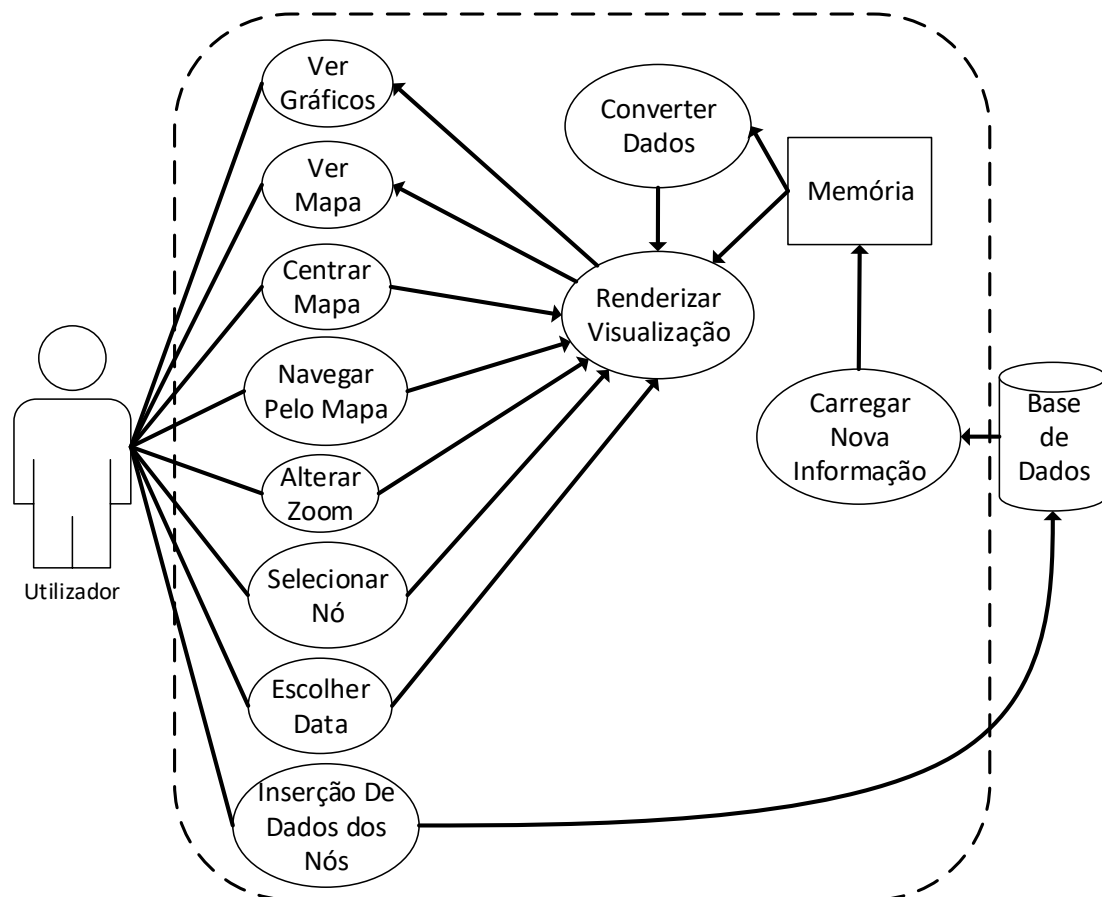


Figura 4.16 – Diagrama de fluxo de dados da página Web.

A aplicação de visualização para a Internet foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação PHP. Os parâmetros medidos pelos nós sensores podem ser consultados através da interface gráfica desenvolvida, utilizando a internet, dentro ou fora do domínio da Universidade. Na figura 4.17 apresenta-se a interface desenvolvida.

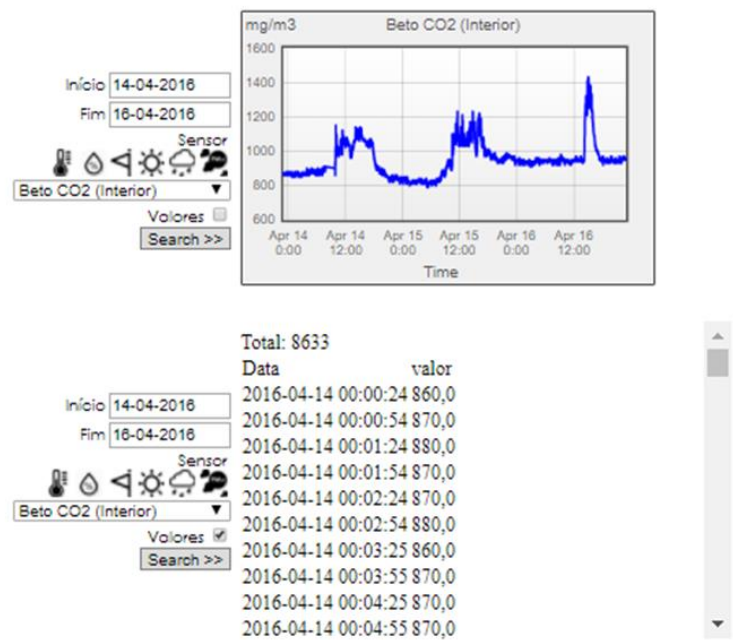
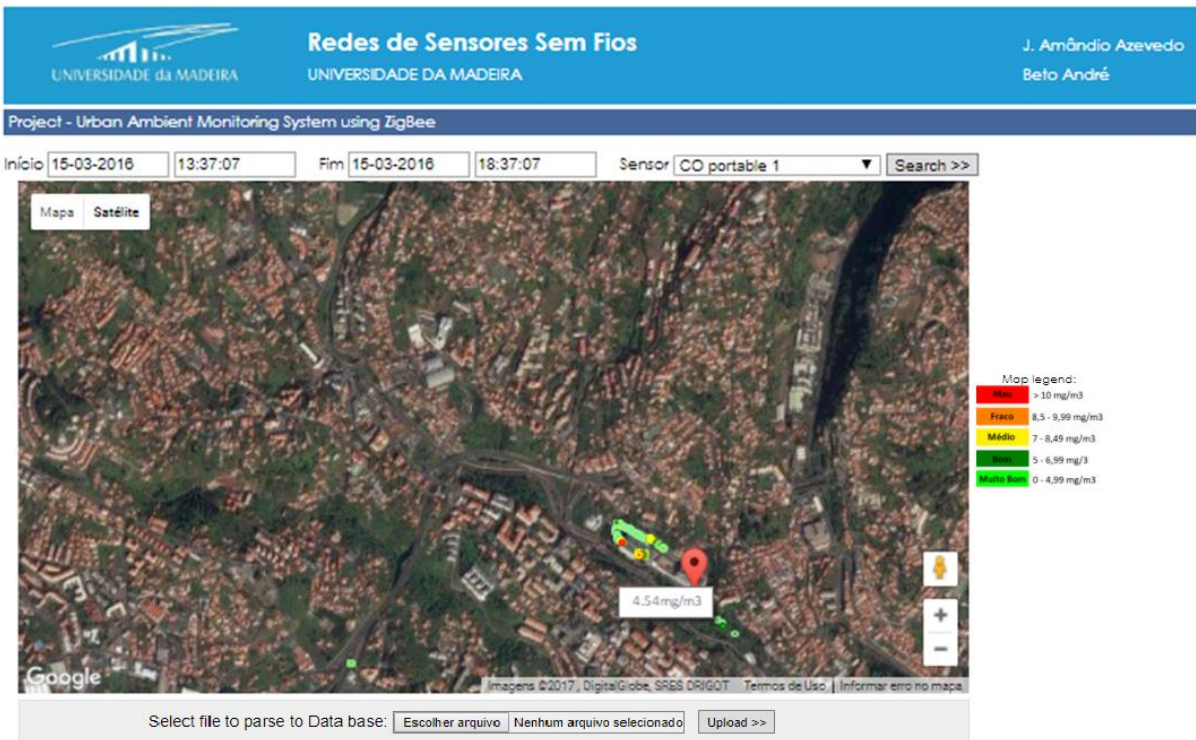


Figura 4.17 – Página Web desenvolvida.

No topo da página apresenta-se o mapa do Google Maps, sendo possível alterar a vista deste para o modo mapa ou modo satélite. Por cima deste mapa, existe um formulário que permite efetuar pesquisas por data e hora e selecionar um parâmetro dos nós sensores móveis a representar no mapa. No lado direito, encontra-se uma legenda onde se diferencia através da escala de cores o nível de concentração de CO. Abaixo do mapa existe, um *link* que permite ainda escolher o ficheiro de dados recolhidos pelos nós sensores móveis e, assim, fazer a inserção dos dados presentes no cartão de memória do nó na base de dados.

Por baixo do mapa, existem 2 gráficos que permitem ao utilizador consultar os vários parâmetros ao longo do tempo. Estes dados podem também ser visualizados em forma de texto, como mostra a figura 4.17.

A página encontra-se disponível em <http://www.cee.uma.pt/hardlab/wsngroup/wsn/urbansense/> e o código em PHP referente a esta aplicação encontra-se no Anexo N.

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelos protótipos desenvolvidos e pela rede instalada. São apresentadas as análises ao desempenho dos sensores utilizados nos nós em ambiente de teste e os resultados obtidos durante o período experimental do protótipo, onde são apresentados gráficos com as amostras recebidas. Por fim, faz-se uma pequena análise no que diz respeito à transmissão dos dados armazenados pelos nós sensores para a base de dados quer através do XBee, *Bluetooth* e página *Web*.

### 5.1 Locais de teste

Identifica-se pela figura 5.1 a localização da estação de monitorização ambiental urbana e dos nós sensores fixos interior e exterior bem como a localização de alguns testes realizados com os nós sensores móveis e módulo de calibração.



Figura 5.1 – Localização da estação de monitorização ambiental urbana e locais de teste.

A estação de monitorização encontra-se situada no laboratório de telecomunicações. Esta é constituída por um computador, onde corre a aplicação, ligada por USB ao nó coordenador que recebe as mensagens ZigBee. Nesta encontra-se, ainda, ligado um rádio *Bluetooth*.

Na figura 5.2 são apresentados os nós sensores móveis e o módulo de calibração desenvolvidos e utilizados durante a recolha dos dados de poluição de CO.



Figura 5.2 – Nós sensores móveis e módulo de calibração.

Da esquerda para a direita, é apresentado o nó sensor móvel com XBee, o nó sensor móvel com *Bluetooth* e o módulo de calibração.

Na figura 5.3 apresenta-se com mais detalhe a localização dos nós sensores fixos exterior e interior.



Figura 5.3 – Nós sensores fixos: a) Exterior. b) Interior.

Na figura 5.3a é possível verificar a localização do nó sensor fixo exterior, tendo sido colocado numa superfície de apoio existente fora da janela do laboratório de telecomunicações. A colocação deste nó sensor permitiu registar o poluente CO próximo à passagem dos automóveis que circulam pela UMA. Já na figura 5.3b é apresentado o nó sensor fixo interior, colocado sobre o topo da bancada que se encontra centrada no interior do laboratório, de modo a registar níveis de dióxido de carbono e partículas no interior do mesmo.

A estação de monitorização ambiental urbana encontra-se em funcionamento desde o dia 1 de fevereiro de 2016.

## 5.2 Testes e resultados obtidos

Nesta secção, faz-se uma análise ao desempenho dos sensores utilizados nos nós sensores. Como tal, apresentam-se seguidamente as medições efetuadas em ambiente de teste e durante o período de tempo experimental do protótipo, nomeadamente o monóxido de carbono, a temperatura, a humidade, o dióxido de carbono e as partículas em suspensão.

### 5.2.1 Monóxido de carbono

Para aferir a fiabilidade das medições dos sensores de monóxido de carbono TGS5042 realizou-se um conjunto de medições e compararam-se os resultados obtidos com o sensor utilizado no módulo de calibração. O CO-B4 utilizado no módulo de calibração é um sensor de elevada resolução (na ordem de ppb), tendo sido adquirido recentemente e encontra-se calibrado de fábrica.

#### 5.2.1.1 Comparação dos sensores

Nas figuras 5.4 e 5.5 apresentam-se, respetivamente, as medições realizadas pelos sensores dentro do túnel da cota 40 e junto à passagem de tráfego rodoviário, sendo esta a do Caminho da Penteadá.

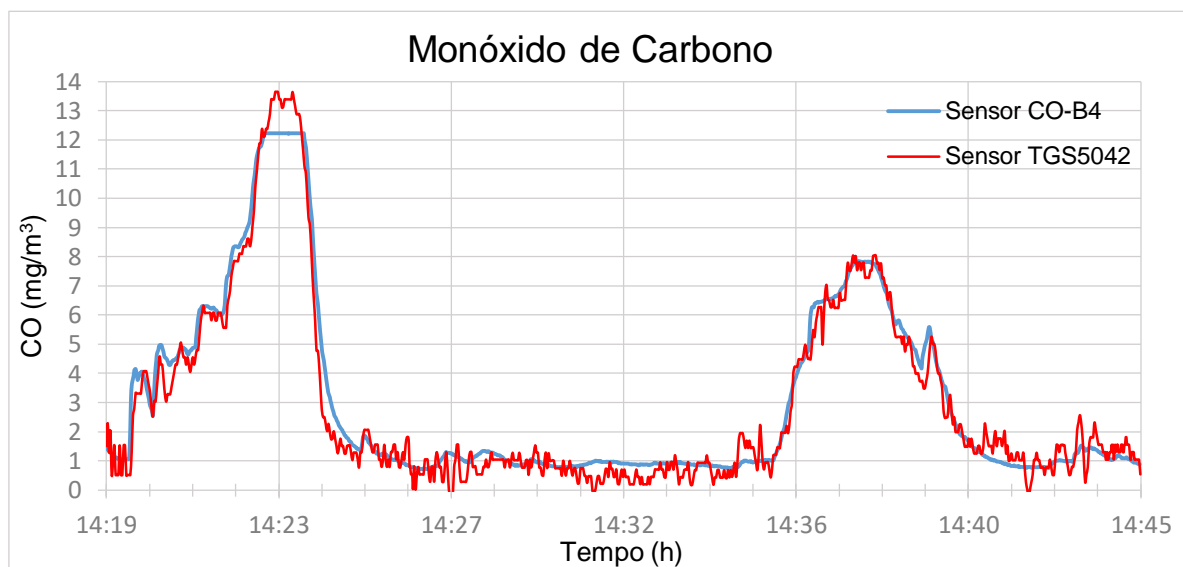


Figura 5.4 – Medição do CO dentro de um túnel.

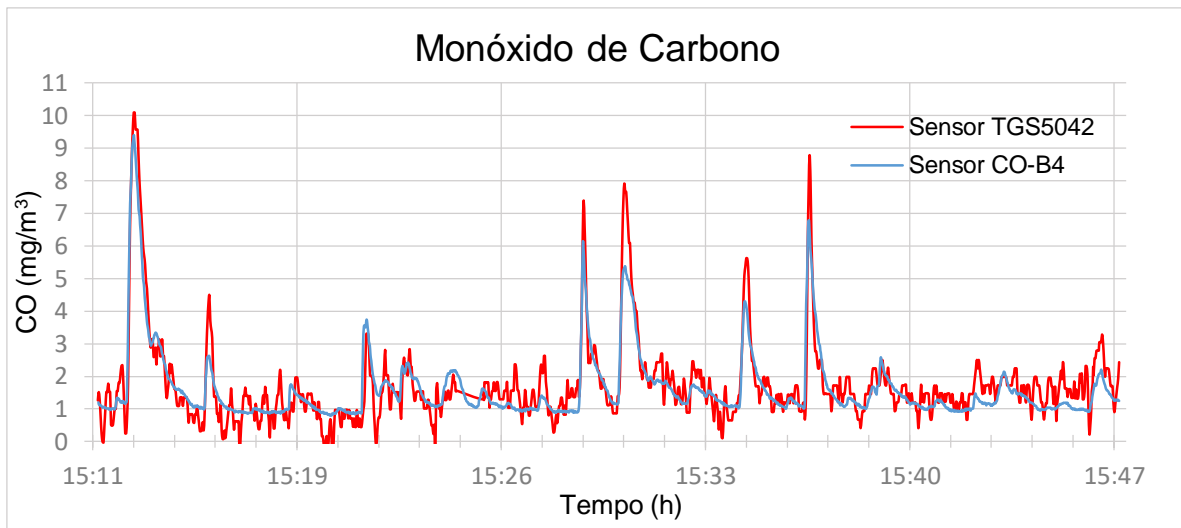


Figura 5.5 – Medição de CO junto à passagem de tráfego.

A partir da figura 5.4 é possível observar as duas passagens feitas dentro do túnel, entre os períodos das 14H19 a 14H26 e das 14H35 a 14H41, do dia 28 de outubro de 2015, onde se registaram concentrações máximas de CO de aproximadamente  $13 \text{ mg/m}^3$ . A partir da figura 5.5 é possível verificar o CO medido junto à passagem de tráfego, identificando-se picos de concentração de CO entre 5 e  $10 \text{ mg/m}^3$ , correspondentes à passagem de um ou mais carros.

Dos resultados anteriores é possível aferir a boa correlação entre os valores registados pelo sensor de mais baixo custo (TGS5042). É possível verificar que o sensor TGS5042 apresenta maiores variações (ruído) no nível de CO medido, podendo ter variações de  $1 \text{ mg/m}^3$  comparativamente com o sensor CO-B4. No entanto, pela tabela 2.1, como o nível de CO até  $5 \text{ mg/m}^3$  é classificado com Muito Bom e como os níveis de poluição podem atingir várias dezenas de  $\text{mg/m}^3$ , os valores obtidos com um erro de  $1 \text{ mg/m}^3$  são suficientes para aferir a qualidade ambiental.

É possível observar, ainda, a partir da figura 5.4, entre o período das 14H23 a limitação imposta pela ISB, onde o sensor fica limitado a uma gama de medição de aproximadamente  $12 \text{ mg/m}^3$ .

### 5.2.1.2 Comparação com os dados de uma estação

O módulo de calibração foi colocado junto à estação de monitorização da qualidade do ar situada no Funchal, em São João, e um sensor móvel junto à passagem de tráfego, como ilustrado pela figura 5.6, entre o período das 8H30 da manhã até às 18H30 da tarde.



Figura 5.6 – Localização dos sensores CO-B4 e TGS5042.

De referir que o sensor CO-B4 encontrava-se aproximadamente a 7 m da estrada e o sensor TGS502 a 3 m. Na figura 5.7 são apresentadas as medições instantâneas realizadas pelos dois sensores de CO.

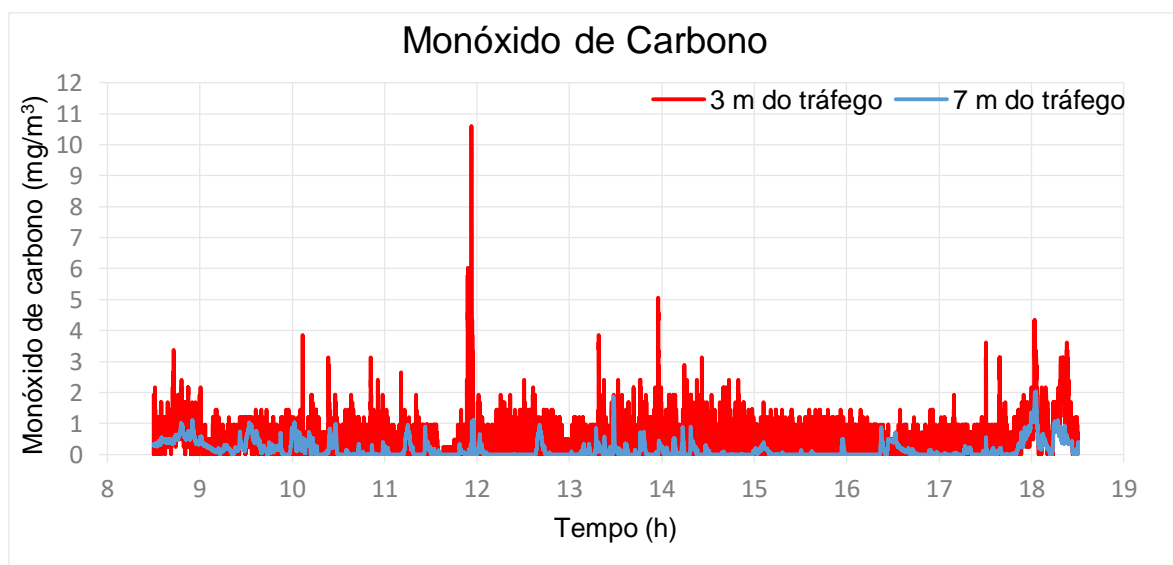


Figura 5.7 – Concentração de CO a 3 m e 7 m do tráfego.

A partir da figura 5.7 foi possível verificar que é junto à passagem de tráfego rodoviário onde se registam maiores concentrações de CO. É possível verificar também que, à medida que se afasta do foco de poluição, a concentração de CO tende a diminuir significativamente numa distância de poucos metros. É possível, ainda, verificar um pico elevado de CO próximo das 12 horas registado pelo TGS5042 de  $10,6 \text{ mg/m}^3$ . Este não foi medido pelo CO-B4 dado que nesse dia se fazia sentir algum vento, motivo pelo qual este poderia ter uma direção contrária ao sensor, não tendo sido registado pelo mesmo.

Os dados recolhidos pelos sensores apresentados na figura 5.7 foram comparados com os dados da estação, obtidos em <https://qualar.apambiente.pt/>. De referir que são disponibilizadas as médias horárias de CO. Na figura 5.8 pode-se observar os dados recolhidos.

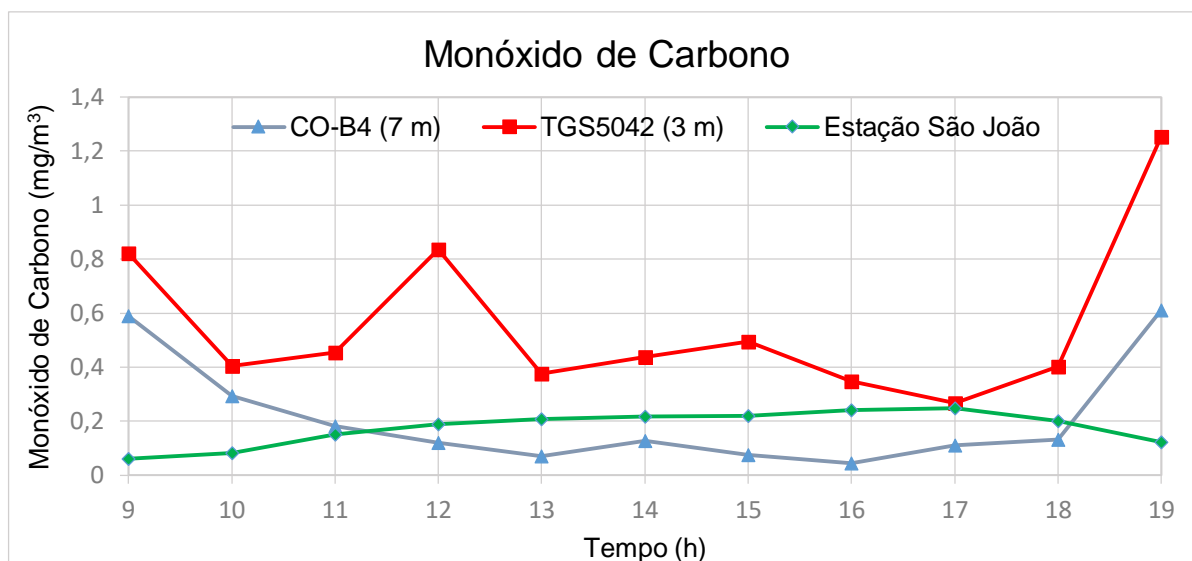


Figura 5.8 – Médias horárias registadas junto à estação de monitorização da qualidade do ar em São João.

A partir da figura 5.8 é possível observar as médias horárias obtidas dos valores apresentados na figura 5.7. Verifica-se que os valores medidos pelos sensores não seguiram exatamente a mesma tendência das concentrações horárias de CO medidas pela estação de monitorização, principalmente nos períodos de maior tráfego rodoviário, nomeadamente de manhã das 8 às 9 horas e de tarde das 18 às 19 horas.

Comparativamente aos dois sensores, observou-se novamente através das médias horárias que o sensor colocado mais próximo à passagem de tráfego rodoviário apresentou maiores concentrações, como era esperado. Pôde-se verificar também que, através das médias horárias, os períodos de curta duração mas de concentrações elevadas do poluente são mitigados, dado que no restante período as concentrações medidas foram baixas. A título de exemplo, no intervalo das 11 às 12 horas obteve-se um pico de CO de aproximadamente de 11 mg/m<sup>3</sup>, no entanto, a média horária para este intervalo foi de aproximadamente 0,8 mg/m<sup>3</sup>.

### 5.2.1.3 Medições com o sensor fixo

Apresenta-se, na figura 5.9, os dados do monóxido de carbono medidos pelo nó sensor fixo colocado no exterior no dia 19 de abril de 2016.

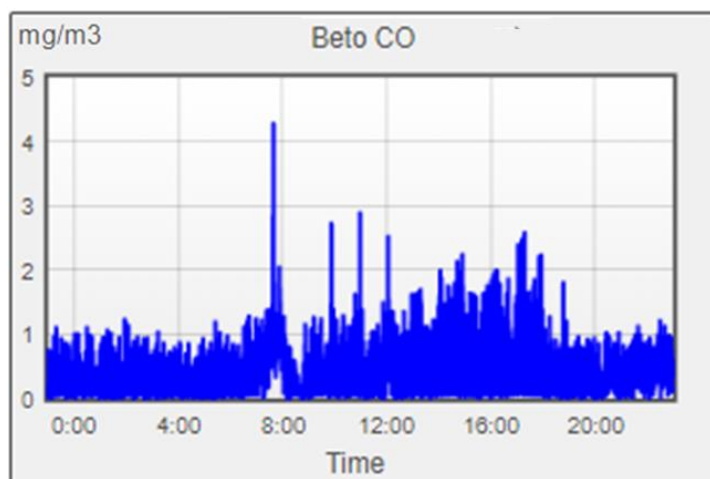


Figura 5.9 – Nível de CO no exterior.

Da figura 5.9 verifica-se que a partir das 8 horas houve um aumento do nível de CO, coincidindo com a chegada dos carros à UMA. Foi registado, também, ao longo do dia até aproximadamente as 19 horas variações do CO consoante a chegada e saída de automóveis. Embora seja notória a presença de ruído nas medições (aproximadamente  $1 \text{ mg/m}^3$ ), foi possível identificar os períodos de poluição causados pelos automóveis.

No dia 8 de agosto de 2016 deflagraram em diferentes localidades uma série de incêndios na ilha da Madeira, destruindo áreas florestais e urbanas. Na altura dos acontecimentos, o nó sensor fixo colocado no exterior encontrava-se em funcionamento, tendo-se registado valores de CO deste fenómeno. Na figura 5.10 apresenta-se os dados do CO recolhidos entre o dia 6 de agosto até o dia 13 de agosto de 2016.

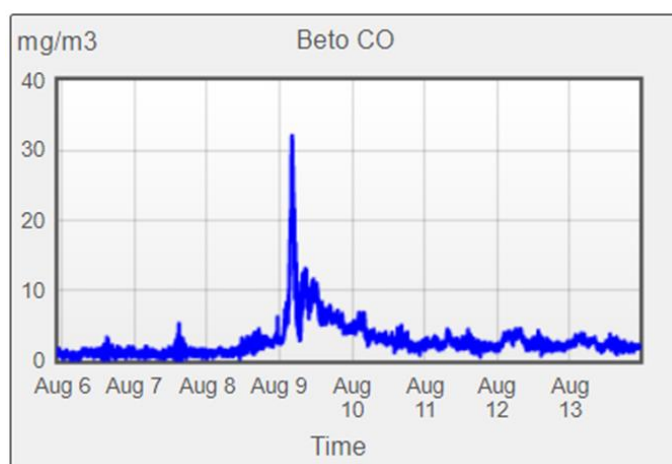


Figura 5.10 – Nível de CO no exterior.

Os incêndios iniciaram-se na zona florestal evoluindo e ameaçando a área urbana, nomeadamente a do Funchal. Pela figura 5.10 verifica-se que, no dia 9 de agosto, durante os incêndios, na zona da Universidade, registaram-se níveis elevados

de CO atingindo um pico acima dos 30 mg/m<sup>3</sup>. Nos dias subsequentes registavam-se, ainda, valores acima do esperado, relativamente aos dias anteriores de 8 de agosto.

### 5.2.1.4 Medições em estrada

Apresenta-se, de seguida, os resultados obtidos pelos sensores móveis. Na figura 5.11 apresenta-se um trajeto realizado num automóvel. Na figura 5.12 é apresentado, em forma de gráfico, a evolução da concentração do poluente medido durante o percurso realizado.

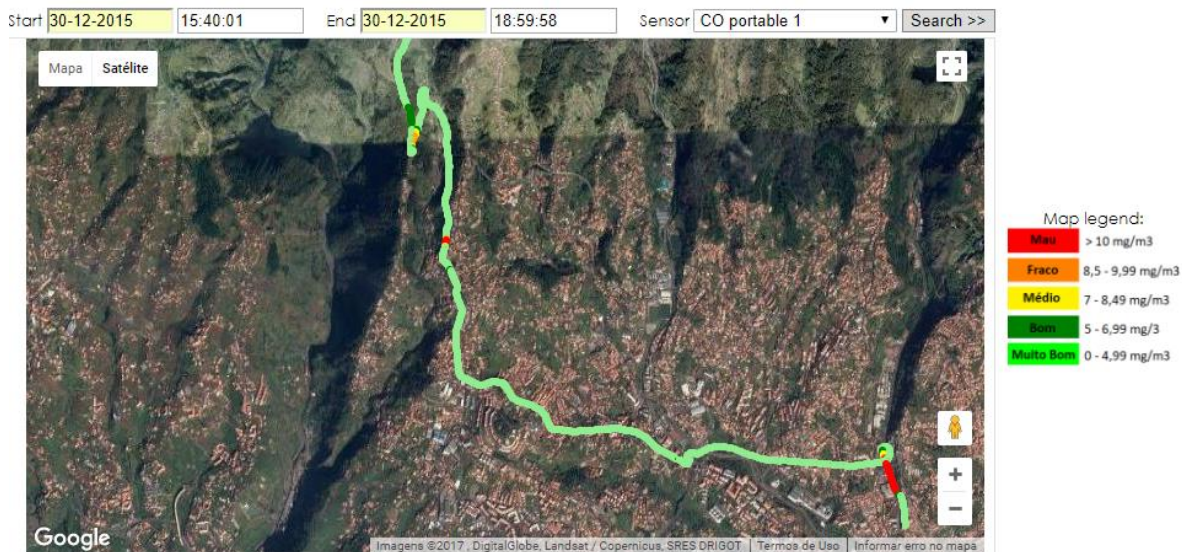


Figura 5.11 – Nível de CO no durante um percurso.

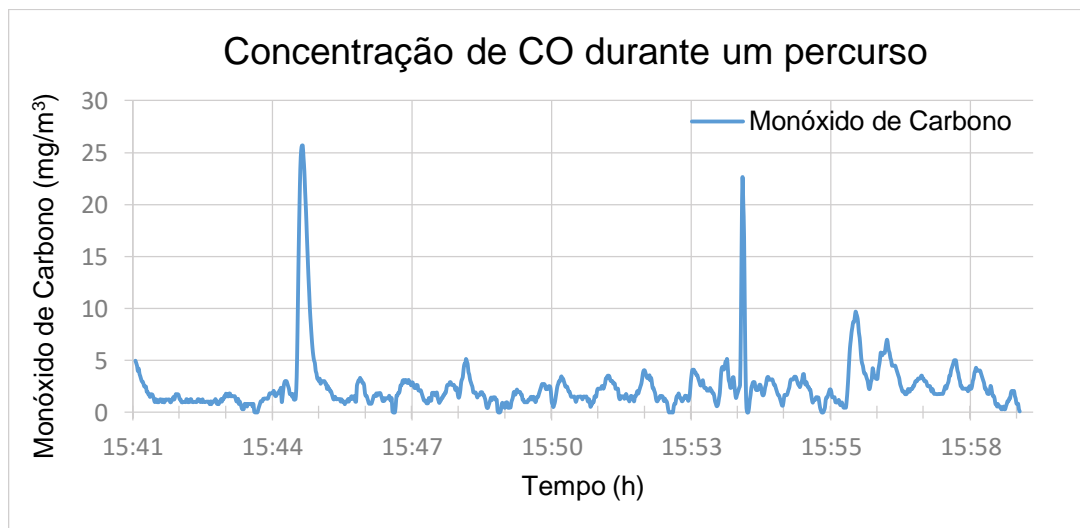


Figura 5.12 – Concentração de CO durante um percurso.

Da figura 5.11 é possível observar o percurso realizado, sendo possível identificar dois períodos onde se obtiveram valores superiores a 10 mg/m<sup>3</sup>, de acordo com os valores mostrados na figura 5.12. Na mesma figura é possível observar a

evolução da concentração do CO durante o percurso, onde se obtiveram vários picos de aproximadamente 5 mg/m<sup>3</sup>.

Já na figura 5.13 é possível verificar a medição do CO dentro de um parque e o respetivo gráfico da concentração do CO que se encontra representado na figura 5.14.

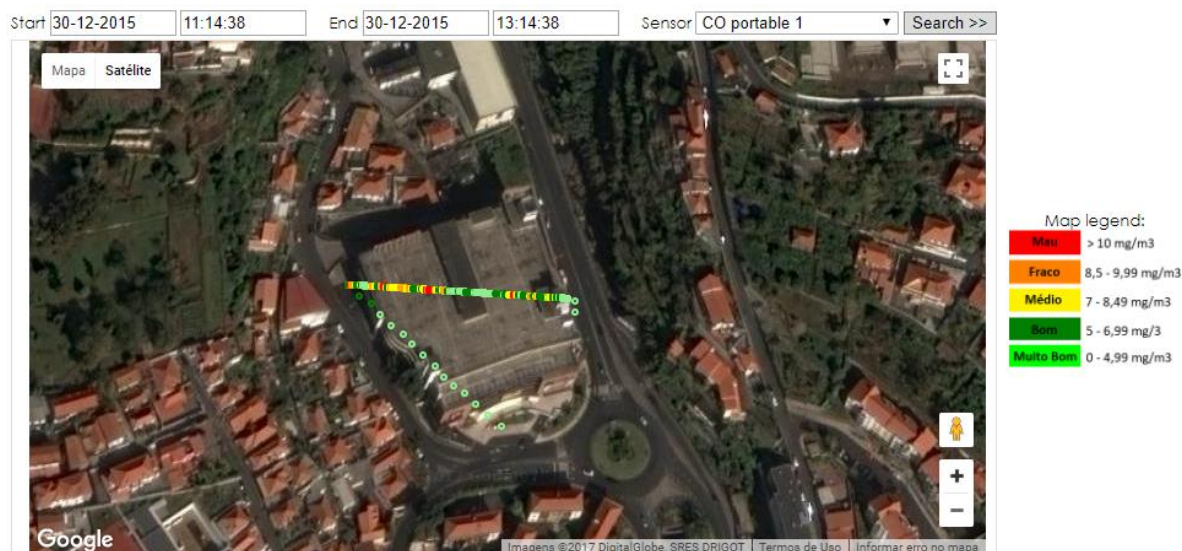


Figura 5.13 – Nível de CO dentro de um parque.

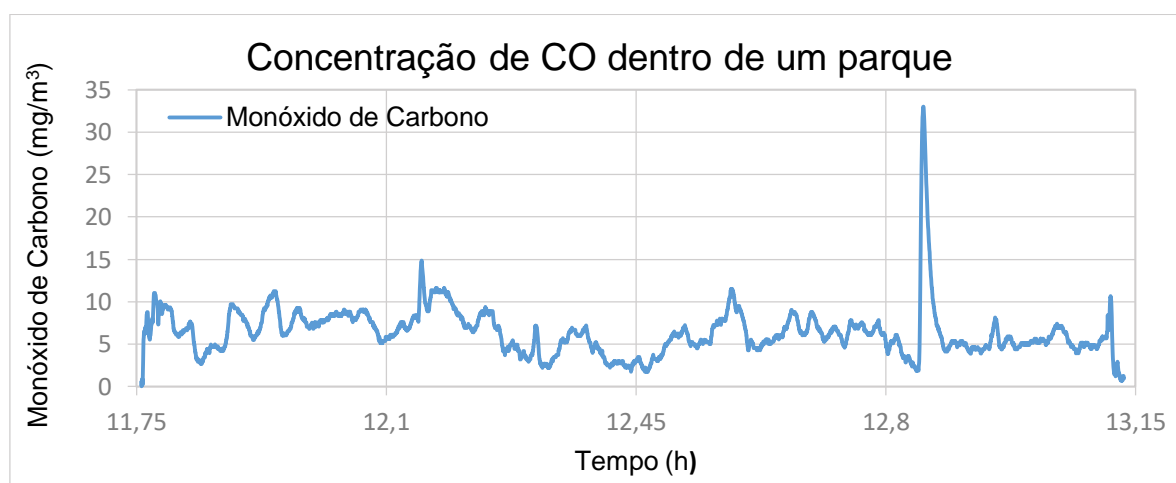


Figura 5.14 – Concentração de CO dentro de um parque.

Pode-se observar pela figura 5.13 o resultado da medição de CO dentro de um parque, onde é possível distinguir novamente, através dos pontos a vermelho, os períodos onde a concentração do mesmo foi superior a 10 mg/m<sup>3</sup>. Durante o período que o nó sensor permaneceu dentro do parque, a concentração de CO registada durante a maior parte do tempo permaneceu acima de 5 mg/m<sup>3</sup>. Observa-se, ainda, a reta traçada dentro do parque, resultado da interpolação de coordenadas nulas obtidas dentro mesmo, durante o período de medição.

Os dados recolhidos pelos nós sensores móveis são também mostrados ao utilizador, apresentando os parâmetros instantâneos medidos. Para o nó sensor com

o rádio XBee são apresentados no *display* monocromático e para o nó sensor com *Bluetooth* são apresentados num telemóvel para o nó sensor com *Bluetooth*. No telemóvel, com o sistema operativo Android, foi instalada uma aplicação já existente denominada por *Bluetooth Terminal*. Na figura 5.15 é apresentada a configuração da aplicação que mostra os dados do sensor no ecrã do telemóvel.

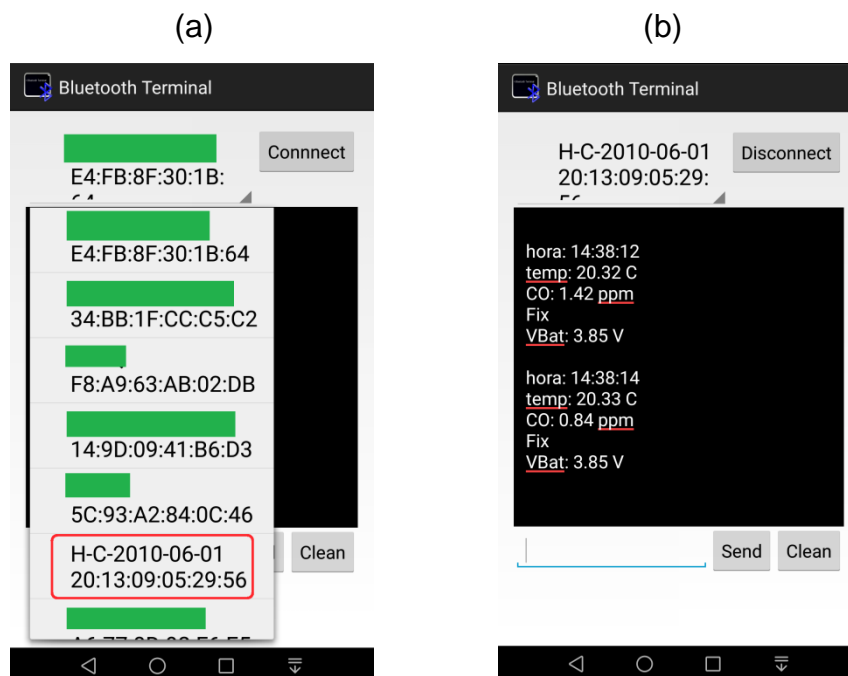


Figura 5.15 – Aplicação *Bluetooth Terminal*. a) Configuração da aplicação. b) Exemplo dos parâmetros mostrados no ecrã do telemóvel.

Após o rádio *Bluetooth* do nó sensor ser emparelhado com a aplicação, é selecionado o mesmo e em seguida carregar em *Connect*, como mostrado na figura 5.15a. Com a ligação feita com sucesso, são mostrados no telemóvel os valores parâmetros instantâneos medidos pelo nó. Da figura 5.15b é possível observar que são mostradas pelo sensor móvel a hora, a temperatura, o valor de CO, a validade da posição do GPS e a tensão da bateria.

## 5.2.2 Sensor de temperatura e humidade

De modo a avaliar o funcionamento do sensor de temperatura e humidade STH15, os dados medidos foram comparados com os da estação meteorológica do IPMA. A recolha dos parâmetros pelo sensor foi realizada no terraço da Universidade durante o dia de 9 de novembro de 2015. A calibração do SHT15 não foi necessária, dado que este já se encontra calibrado de fábrica em toda a sua escala. As figuras 5.16 e 5.17 ilustram a comparação dos parâmetros medidos.

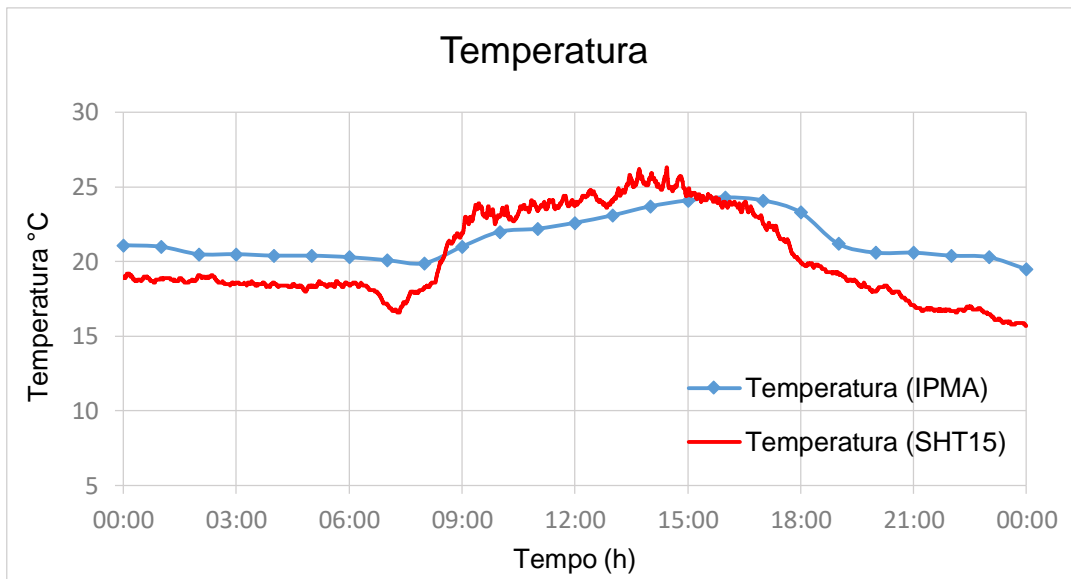


Figura 5.16 – Comparação dos resultados da temperatura do ar.

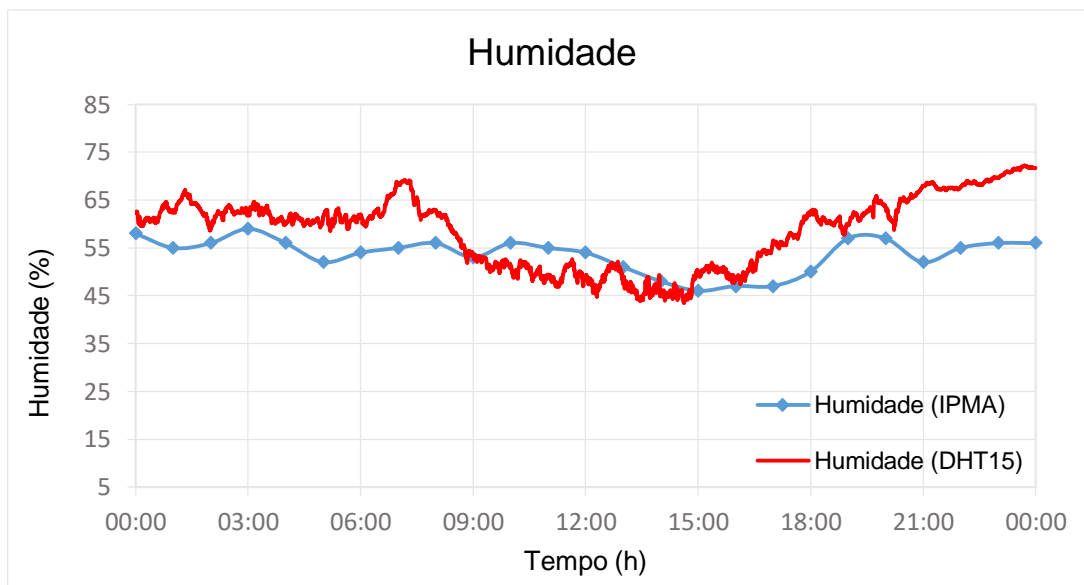


Figura 5.17 – Comparação dos resultados da humidade do ar.

A estação do IPMA utilizada nesta comparação encontra-se localizada na cidade do Funchal, mais precisamente na zona do Lido. É de referir que os dados disponibilizados através do IPMA correspondem à média horária dos parâmetros.

Embora pese o facto de o sensor e a estação do IPMA se localizarem em localidades diferentes, pela comparação gráfica apresentada, é possível observar que os valores obtidos pelo sensor colocado no terraço seguiram a mesma tendência comparativamente aos valores recolhidos pela estação do IPMA.

Durante o período experimental de teste do protótipo, registaram-se os parâmetros meteorológicos no período entre o dia 6 de agosto até o dia 13 de agosto de 2016. Na figura 5.18 apresenta-se a temperatura e a humidade registadas.

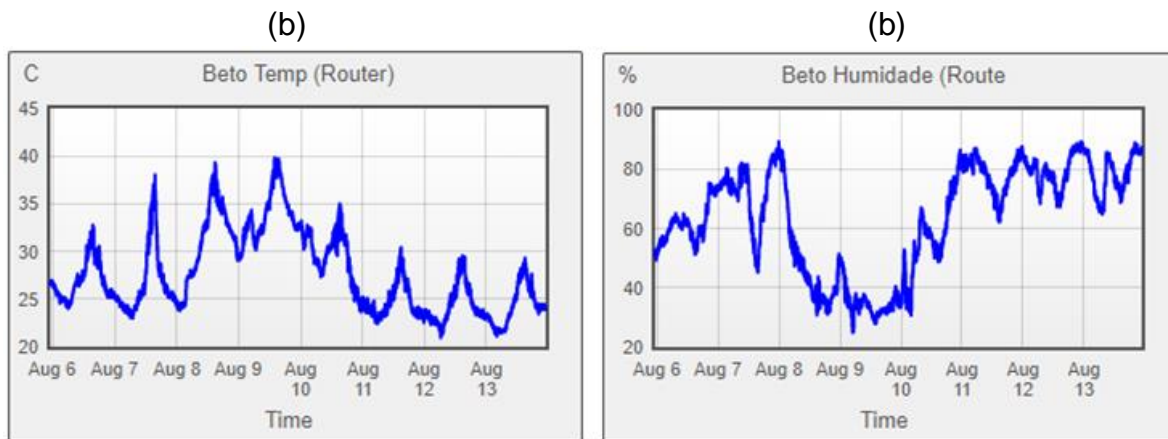


Figura 5.18 – Dados meteorológicos: a) Temperatura; b) Humidade.

Neste período, a ilha sofreu uma influência direta de uma massa de ar tropical continental, quente e seca e, acompanhada por humidade relativa muito baixa. Tal fenómeno explica as temperaturas máximas de 40°C, mínimas de 30°C e humidade de aproximadamente 20%.

### 5.2.3 Sensor de dióxido de carbono

De forma a poder-se utilizar o sensor de CO<sub>2</sub>, dado que este se encontrava armazenado há algum tempo, procedeu-se à calibração do mesmo. A partir da folha de características do fabricante fez-se a sua calibração. Para tal, colocou-se o sensor num ambiente de “ar limpo”. Após deixar o sensor estabilizar nesse mesmo ambiente calibrou-se o sensor para um valor lido de 450 ppm de CO<sub>2</sub>.

Com o sensor calibrado, verificou-se o comportamento do mesmo. Para tal, colocou-se o sensor dentro de uma sala (laboratório de telecomunicações) e registaram-se os valores medidos durante um período de 12 horas, sendo estes apresentados na figura 5.19. De realçar, que dentro da mesma, encontravam-se em média 3 pessoas.

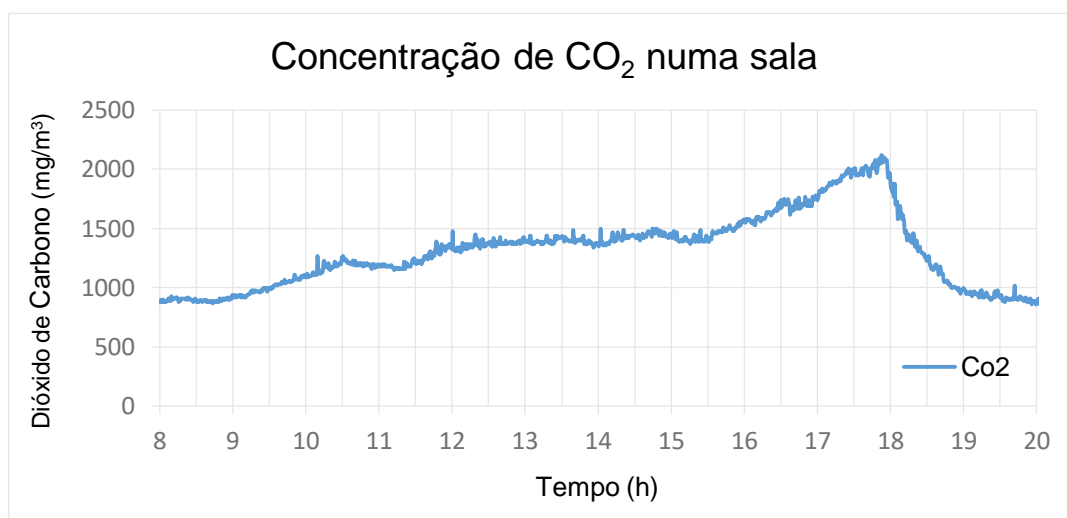


Figura 5.19 – Nível de CO<sub>2</sub> dentro de uma sala de aula.

Pela figura 5.19 pode-se observar que a concentração de CO<sub>2</sub> a partir das 9 horas aumentou gradualmente - originado pela presença dos alunos na sala – até às 16 horas. A partir das 16 horas verificou-se a entrada de mais alunos na sala, o que originou um aumento do nível de CO<sub>2</sub>, atingindo um valor de aproximadamente 2000 mg/m<sup>3</sup>. Com a saída de todos os alunos por volta 18 horas verificou-se uma descida acentuada do CO<sub>2</sub> presente na sala.

Já na figura 5.20 apresenta-se os níveis de CO<sub>2</sub> obtidos pelo nó sensor fixo interior das medições no período compreendido entre 3 de abril até 9 de abril de 2016.

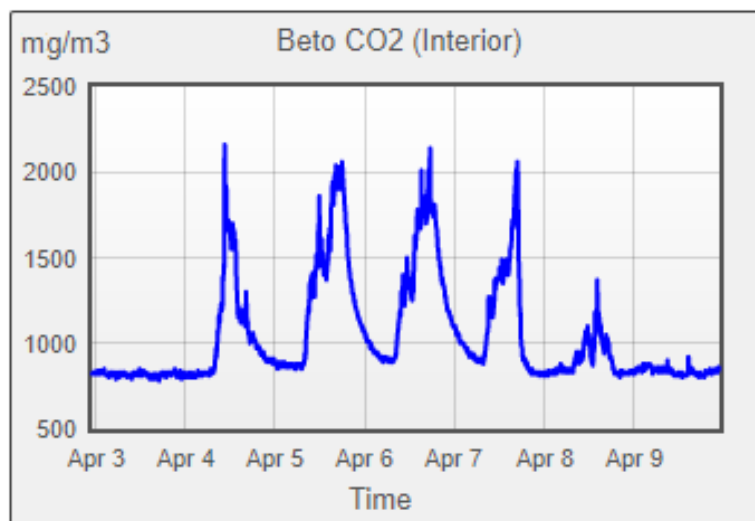


Figura 5.20 – Concentração de CO<sub>2</sub> no interior do laboratório.

Da figura 5.20 é possível verificar que no dia 3 de abril, correspondente a um domingo, o CO<sub>2</sub> manteve-se num nível baixo. Já nos dias subsequentes, com a presença de alunos no laboratório, registaram-se níveis de CO<sub>2</sub> acima de 2000 mg/m<sup>3</sup>.

#### 5.2.4 Sensores de partículas

De modo a escolher um sensor adequado para medição das partículas PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub> foram avaliados dois sensores, o PPD42 e o GP2Y1010AU0F. Os dois sensores foram colocados juntos numa sala e foram expostos a um ambiente com partículas em suspensão. De forma a originar partículas no ar, utilizou-se um pano com pó, que foi abanado próximo aos sensores. Os dados recolhidos encontram-se presente na figura 5.21.

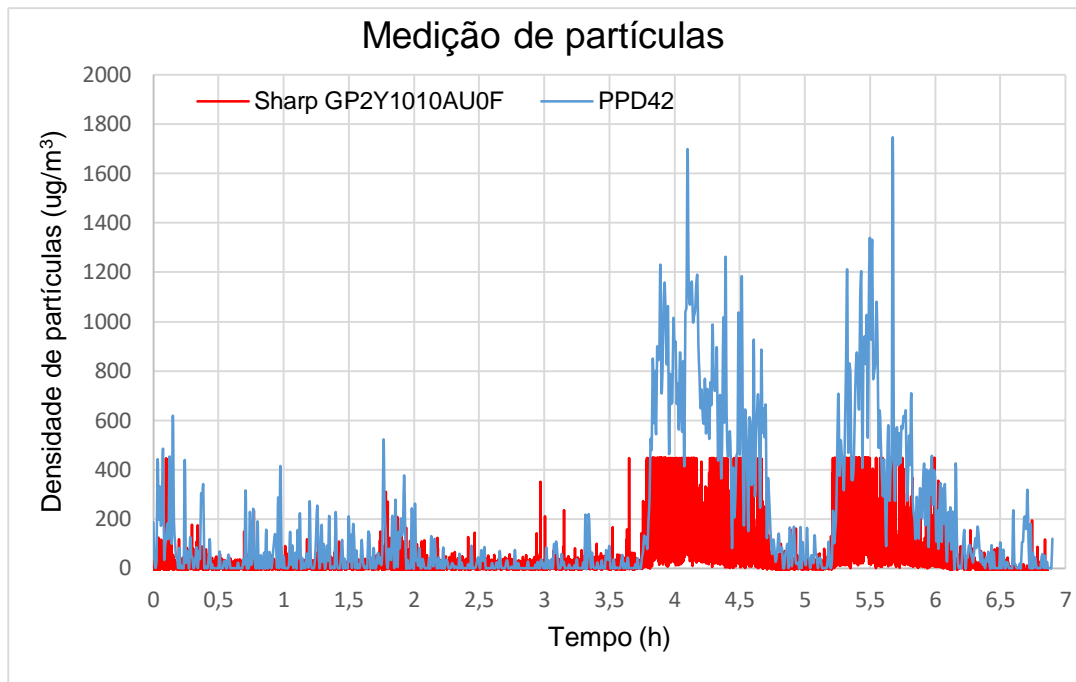


Figura 5.21 – Nível de partículas medidas dentro de uma sala.

A partir da figura 5.21, é possível verificar a medição de partículas pelos dois sensores. Entre o período de 0 e 3,75 horas forçou-se o aparecimento de partículas em suspensão no ar de forma não intensiva. Entre o período de 3,75 e 6 horas, forçou-se o aparecimento de partículas no ar de forma mais intensiva, havendo uma pausa entre este período, como é possível observar pelas 5 horas após início da experiência.

Verificou-se que ambos os sensores conseguiram detetar a presença de partículas em suspensão, no entanto, a gama de medição do GP2Y1010AU0F era limitada a aproximadamente  $400 \text{ ug/m}^3$ .

O sensor PPD42 mostrou ter uma maior gama de medição podendo-se distinguir claramente os momentos em que existem maiores concentrações de partículas presentes no ar. De referir que, sem a presença de partículas, o sensor GP2Y1010AU0F apresenta um *offset* de  $100 \text{ ug/m}^3$ , tendo sido necessário subtrair esse valor.

Embora o sensor PPD42 apresente maior consumo face ao GP2Y1010AU0F, optou-se pela utilização deste, dado que o módulo interior seria alimentado pela rede elétrica e este tem também a capacidade de distinguir partículas  $\text{PM}_{10}$  e  $\text{PM}_{2,5}$ .

Apresenta-se na figura 5.22 os dados obtidos durante o período de teste de partículas em suspensão pelo nó sensor fixo, no período compreendido entre 3 de abril até 9 de abril de 2016.

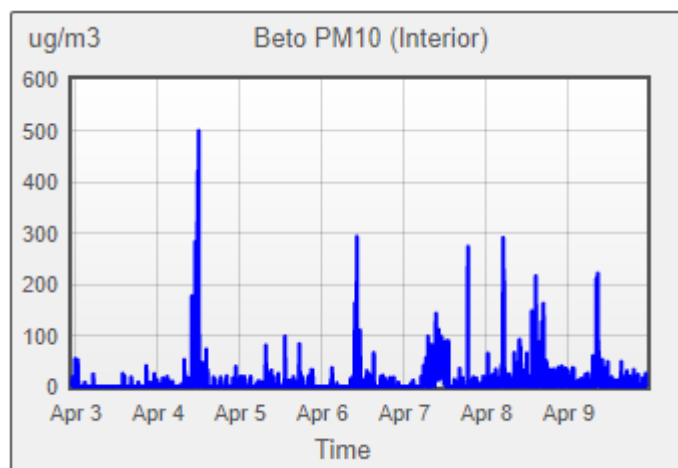


Figura 5.22 – Nível de PM<sub>10</sub> no interior.

No dia 3 abril, num domingo, o nível de concentração de partículas é baixo. Nos dias seguintes, em período de aulas, verifica-se que as concentrações de partículas tendem a aumentar. No sábado, no dia 9 de abril, embora não hajam aulas, existe manutenção no laboratório, nomeadamente limpeza, o que justifica a presença de partículas em suspensão.

### 5.2.5 Transmissão da informação dos nós sensores móveis

Neste ponto fez-se o estudo da transmissão dos dados recolhidos pelos nós sensores móveis armazenados no cartão de memória. O estudo da transmissão passou pela utilização do rádio XBee, rádio *Bluetooth* e da página de internet do protótipo.

Para o estudo da transmissão feita por XBee e *Bluetooth* foi utilizado um mesmo ficheiro contendo informação relativa a medições de 1 em 1 segundo efetuadas pelo nó sensor. Cada trama armazenada corresponde a uma medição e é guardada diversa informação, como o valor do CO, a posição do GPS e a data e hora respetiva, seguindo o formato apresentado na figura 4.4. Cada trama ocupa no cartão cerca de 50 *bytes* e o tamanho total do ficheiro para a realização do teste foi de 338 kB. O ficheiro continha 6935 medições, resultado de 2 horas de medições.

Aquando da transmissão das tramas armazenadas no cartão, são acrescentadas, ainda, a restante informação da trama ZigBee, como apresentado na figura 4.3. Assim, em cada envio, o tamanho total da trama é de cerca de 68 *bytes*.

A transmissão através do XBee consiste em utilizar um rádio XBee para a transmissão da informação do cartão para a estação de monitorização. De referir que o *baud rate* utilizado foi de 9200 bps.

Numa primeira fase, fez-se a transmissão de todos os dados contidos no ficheiro de teste para a estação de monitorização e constatou-se a perda de muita informação. Foram realizados testes, com a ajuda do XCTU que permitiram identificar que a perda deu-se no XBee emissor.

Considerando que a velocidade de comunicação entre o microcontrolador e o XBee é de 9600 bps, cada trama com tamanho de 68 *bytes* leva cerca de 56 ms para ser entregue ao *buffer* de dados de transmissão do XBee. Tendo em conta que a taxa de transmissão do XBee é de 250 kbps, cada trama leva cerca de 10 ms a ser transmitida. É necessário considerar ainda os tempos de processamento da trama e de acesso ao meio, sendo que estes tempos limitam a velocidade de entrega de mensagens. Segundo o fabricante, o *buffer* de dados do XBee é de 202 *bytes*. Sendo assim, é impossível enviar mais de 3 mensagens de 68 bytes, como o nosso caso, sem respeitar estes tempos.

Assim, de modo a contornar a perda da informação, adicionou-se um tempo de espera entre o envio de cada trama. Na tabela 5.1 apresentam-se os resultados obtidos para tempos de espera entre 30 a 100 ms.

Tabela 5.1 – Transmissão de dados via XBee.

<i>Delay</i>	Duração da transmissão (min)	# Tramas Recebidas com sucesso	# Tramas perdidas	Taxa de Perdas (%)	Taxa de transmissão (bps)
30	8,48	2332	4603	66,4	5312
40	8,62	2351	4584	66,1	5232
50	9,23	2464	4471	64,5	4880
60	9,67	2667	4268	61,5	4664
65	10,6	5238	1697	24,5	4248
70	11,2	6741	194	2,8	4024
80	12,35	6925	10	0,1	3648
90	13,78	6935	0	0,0	3272
100	15,28	6935	0	0,0	2952

Da tabela 5.1 verifica-se que para um *delay* inferior a 60 ms a informação perdida foi superior a 50%, correspondendo a mais de metade da informação armazenada no cartão. A figura 5.23 ilustra a relação entre o tempo necessário para transmitir toda a informação e a percentagem de informação perdida com o *delay* entre cada trama enviada.

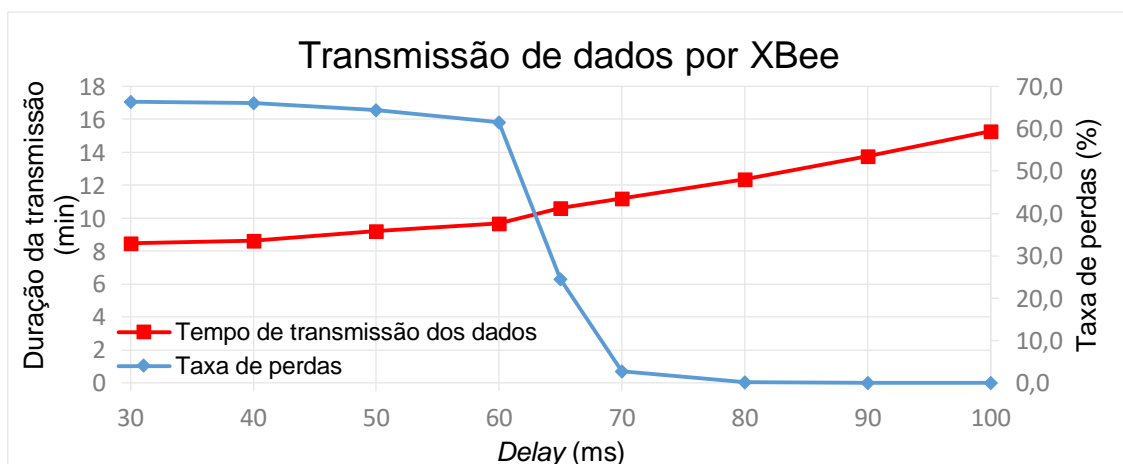


Figura 5.23 – Transmissão de dados via XBee.

Da figura 5.23 verifica-se que para atrasos inferiores a 70 ms, a taxa de perdas de informação é elevada e para valores superiores a 80 ms toda a informação é transmitida com sucesso. Como não se pretende perder a informação recolhida, deve ser utilizado o atraso mais conveniente, neste caso utilizou-se um atraso de 100 ms entre o envio de tramas.

A transmissão feita por *Bluetooth* consiste em utilizar o rádio *Bluetooth* presente no nó sensor móvel e um rádio *Bluetooth* ligado à estação de monitorização.

De igual forma procedeu-se à transmissão dos dados através do rádio *Bluetooth*. Na tabela 5.2 apresentam-se os resultados obtidos para diferentes *baud rate*.

Tabela 5.2 – Transmissão de dados via *Bluetooth*.

<i>Baud Rate</i> (bps)	Duração da Transmissão (min)	# Tramas Recebidas com sucesso	# Tramas Perdidas	Taxa de perdas (%)	Taxa de Transmissão (bps)
9600	8,48	6935	0	0	5312
19200	5,20	6935	0	0	8664
38400	2,78	6935	0	0	16208
57600	2,11	6935	0	0	21360
115200	1,36	6935	0	0	33136

Embora não se tenha adicionado tempos de espera entre cada trama enviada por *Bluetooth*, ao contrário do que acontecia com a transmissão dos dados via Xbee, todas as tramas foram recebidas com sucesso. A figura 5.24 ilustra a relação entre o tempo necessário para transmitir toda a informação e a percentagem de informação perdida para os diferentes *baud rate*.

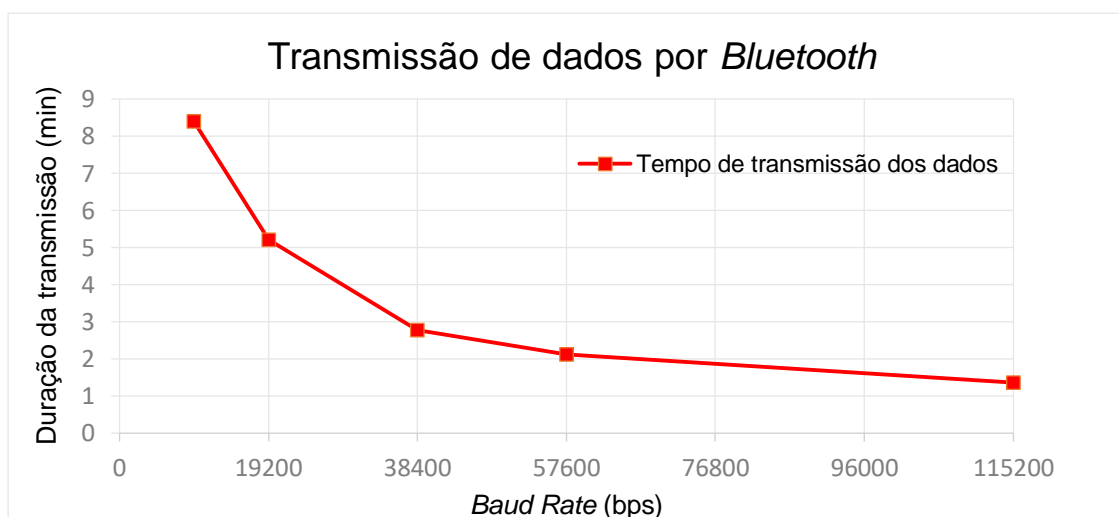


Figura 5.24 – Transmissão de dados via *Bluetooth*.

Da figura 5.24 verifica-se que, à medida que o *baud rate* aumenta, o tempo de transmissão diminui, embora de forma não inversamente proporcional. A partir das tabelas 5.1 e 5.2 verifica-se que, para um *baud rate* de 9200 bps, o tempo de

transmissão sem *delay* entre o envio de cada trama foi de 8,48 minutos. No entanto, para o XBee, como houve a necessidade de adicionar um *delay*, este tempo situou-se entre 13,78 e 15,28 minutos. A taxa de transmissão foi muito superior utilizando o *Bluetooth*, obtendo-se um valor máximo de 33136 bps. Para maiores volumes de dados armazenados pelos nós sensores, a utilização do *Bluetooth* mostrou ser a mais adequada. Para além do mais, o rádio *Bluetooth* utilizado no nó sensor apresenta um consumo inferior a 23 mA ao invés dos 40 mA consumidos pelo XBee.

É possível, ainda, enviar os dados armazenados no cartão através da página *Web* desenvolvida para o protótipo, tendo sido já apresentada na figura 4.17. A inserção dos dados armazenados no cartão na base de dados através da página consiste em selecionar o ficheiro de dados e fazer o *upload*, como ilustrado pela figura 5.25.

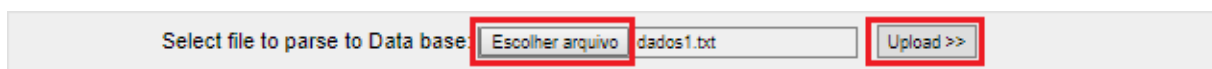


Figura 5.25 – Envio de dados armazenados nos nós sensores através da página *Web*.

Ao fazer o *upload* do ficheiro é criada uma cópia do mesmo no servidor. Os dados contidos na cópia armazenada no servidor são então introduzidos na base de dados. À medida que os dados são inseridos na base de dados, é disponibilizada informação ao utilizador no decorrer desta operação como ilustrado pela figura 5.26 e 5.27.

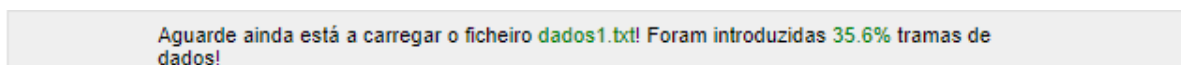


Figura 5.26 – Informação apresentada ao utilizador aquando da inserção dos dados na base de dados.

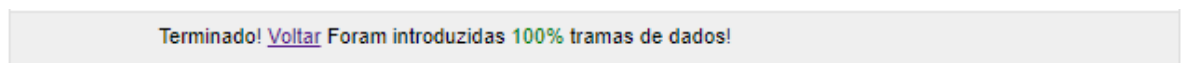


Figura 5.27 – Informação apresentada ao utilizador aquando da conclusão da inserção dos dados na base de dados.

Foi utilizado o mesmo ficheiro de teste de 338 kB e inseriram-se os dados através da página *Web*. Registou-se o tempo necessário para enviar toda a informação, tendo-se obtido um tempo aproximado de 12 minutos, resultando numa taxa de transmissão de 3756 bps.

De referir que não são inseridos os dados de uma só vez na base de dados, pois caso contrário, dado o volume de informação, seriam feitas imensas *queries* à base de dados num curto espaço de tempo, podendo dar origem a um *timeout* e a ligação à base de dados ser encerrada. Para não ocorrer tal exceção, são inseridas 10 tramas de dados na base de dados a cada segundo.

De entre as três formas da transmissão dos dados recolhidos pelos nós sensores estudadas, aquela que apresentou menor tempo para transmissão foi o *Bluetooth*. No entanto, considera-se que na ótica do utilizador sem conhecimentos

técnicos acerca do funcionamento do sistema, a inserção dos dados através da página Web é a mais intuitiva para o mesmo, dada a maior simplicidade do processo.

### 5.2.6 Análise financeira dos nós sensores

Na realização de um protótipo é importante efetuar uma análise financeira ao custo produto. Assim, na tabela 5.3 e 5.4 são apresentados os componentes utilizados nos nós sensores móveis, com uma curta descrição, referência e preço comercial. Outros custos adicionais, nomeadamente as caixas de norma IP65 e as placas de fenolite perfurada não foram tidos em conta. Os preços datam de outubro de 2016.

Tabela 5.3 - Análise financeira dos nós sensores móveis e módulo de calibração.

Qt.	Descrição	Referência	Preço/1u (€)	Obs.	Sensor móvel com XBee	Sensor móvel com Bluetooth	Módulo de calibração
1	Arduíno fio	DEV-10116	24,95	Sparkfun	✓	✓	✓
1	Módulo XBee Series 2	XB24-Z7SIT-004	16,18	Farnell	✓	-	-
1	BTBee Pro	PTR003391	16,73	PtRobotics	-	✓	-
1	Display monocromático PCD8544	338	10,00	Adafruit	✓	-	-
1	Display NewHeaven	338	10,00	Adafruit	-	-	✓
1	Sensor CO TGS5042	73874	22,50	Soselectronic	✓	✓	-
1	Sensor CO + ISB	CO-B4	120,00	Alphasense	-	-	✓
1	GPS	GPS-8416	19,00	Sparkfun	✓	✓	-
1	RTC	DS3234	17,10	Sparkfun	-	-	✓
1	Micro SD 2GB	SanDisk	7,29	Amazon	✓	✓	✓
1	Thermistor NTC 10K	1672383	0,60	Farnell	✓	✓	-
1	Bateria de Lítio, 2000 mAh, 3,7 V	2011	11,20	Adafruit	✓	✓	✓
Total					111,72 €	102,27 €	190,54 €

Tabela 5.4 - Análise financeira dos nós sensores fixos exterior e interior.

Qt.	Descrição	Referência	Preço/1u (€)	Obs.	Sensor fixo exterior	Sensor fixo interior
1	Arduíno fio	DEV-10116	24,95	Sparkfun	✓	✓
1	Módulo XBee Series 2	XB24-Z7SIT-004	16,18	Farnell	✓	✓

1	Antena omnidireccional 2,4GHZ RP-SMA	-	7,00	Amazon	✓	✓
1	Sensor CO TGS5042	73874	22,50	Soselectronic	✓	-
1	Sensor de partículas	PPD42	20,96	Amazon	-	✓
1	Sensor CO <sub>2</sub>	COZIR-W20	93,99	Co2meter	-	✓
1	Sensor tem. e hum.	SHT15	23,98	Farnell	✓	-
1	Relé	G6-JU-2FS-Y	2,50	Farnell	✓	✓
1	Bateria de lítio, 2000 mAh, 3,7 V	2011	11,20	Adafruit	-	✓
1	Bateria de lítio, 850 mAh, 3,7 V	1578	7,50	Adafruit	✓	-
1	Painel solar	MSX-005F	5,37	Farnell	✓	-
1	Controlador de carga USB/Solar	390	14,73	Adafruit	✓	-
Total					124,71 €	176,78 €

Sem contar com custos adicionais, obteve-se para os nós sensores móveis com XBee e *Bluetooth* um custo de 111,72 € e 102,27 €, respetivamente. Para o módulo de calibração o preço foi de 190,54. Para os nós sensores fixos exterior e interior obteve-se um valor de 124,71 € e 176,78 €, respetivamente. De referir que alguns sensores têm um custo alto, o que encarece o preço final do nó sensor.

Das observações feitas e dos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do protótipo, e dado que os nós sensores desenvolvidos não apresentam valores consideravelmente elevados, considera-se útil, através do tipo de sistema apresentado neste trabalho, medir a poluição na cidade do Funchal. Para tal, poderiam ser instalados alguns sensores fixos nas ruas e em lugares críticos, nomeadamente túneis e parques, e vários sensores móveis instalados em automóveis, autocarros e transportados por pessoas, de modo a ser possível criar um mapa temporal e espacial de dados acerca da poluição.

## 6. Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo são abordadas as conclusões acerca do protótipo de monitorização urbana com uma rede de sensores sem fios desenvolvido. São, ainda, apresentados alguns dos aspetos que podem ser melhorados e desenvolvidos em trabalhos futuros.

### 6.1 Conclusões

Os equipamentos utilizados nas estações de monitorização da qualidade do ar existentes tratam-se de equipamentos de elevada precisão e resolução, estando sujeitos a normas específicas no que diz respeito aos métodos de medição do ar, calibração, gama de medição bem como os princípios de funcionamento e apresentam custos elevados e medem a qualidade do ar no ponto onde estão localizados. Tal custo torna impraticável a colocação destes nas mais diversas localizações de modo a ter-se medições de uma maior área geográfica.

Com o desenvolver deste trabalho e com os resultados obtidos, pôde-se aferir a viabilidade da monitorização da qualidade do ar com base em redes de sensores sem fios, usando para tal sensores de baixo custo, com um valor de custo mais reduzido. A vantagem deste tipo de sistema, para além da sua replicabilidade, é que os nós sensores podem ser dispostos nos mais diversos pontos de uma zona urbana cobrindo assim uma maior área geográfica.

Relativamente ao sensor de monóxido de carbono TGS5042 de baixo custo estudado, e com base nos valores obtidos, pôde-se aferir que este permitiu medir concentrações de CO na gama pretendida, podendo ser utilizado num sistema de baixo custo. O desempenho deste pôde ser comparado e aferido com o sensor CO-B4, que por sua vez mostrou ser um sensor de boa qualidade e resolução, mesmo em concentrações baixas de CO.

No que diz respeito aos sensores utilizados em ambiente interior, nomeadamente o sensor de CO<sub>2</sub> e partículas PM<sub>10</sub>, estes apresentaram o comportamento esperado, na medida em que foi possível verificar a presença destes poluentes no ambiente interior em estudo, onde foi possível registar as concentrações dos mesmos, identificando-se ainda períodos onde houveram concentrações mais elevadas dos mesmos.

A transmissão dos dados recolhidos pelos nós sensores móveis através dos três meios de comunicação estudados, nomeadamente do XBee, do *Bluetooth* e da Internet, mostrou-se satisfatória na medida em que se pode transmitir e inserir com sucesso os dados na base de dados. De entre as três formas implementadas, o XBee foi aquele que mostrou ser o mais lento na entrega da informação, sendo menos adequado quando se tratam de volumes mais elevados de dados. Já a entrega da informação feita por *Bluetooth* mostrou ser a mais rápida. Para um utilizador comum, sem os conhecimentos técnicos acerca do funcionamento do sistema, o envio dos dados através da página Web é a mais simples e intuitiva para o mesmo

A interface desenvolvida consistiu na criação de uma página *Web*, podendo ser acedida através de um *browser* de Internet, e permite que os parâmetros de interesse monitorizados sejam disponibilizados graficamente. A visualização gráfica permite ao utilizador consultar os parâmetros de interesse quer de forma temporal (gráfico) quer de forma espacial (mapa).

Em suma, os objetivos pretendidos para este trabalho, foram de forma geral atingidos, tendo-se desenvolvido um protótipo funcional do sistema proposto, sendo possível implementar um sistema de monitorização ambiental urbana com rede de sensores sem fios, permitindo aos utilizadores verificar a qualidade do ar a que estão sujeitos, sendo possível identificar episódios de poluição.

## 6.2 Trabalhos futuros

Das várias observações efetuadas durante o desenvolvimento do protótipo, foram detetadas e identificadas uma série de melhorias que podem ser implementadas ao sistema apresentado, as quais resume-se seguidamente.

De modo a ter-se um sistema mais completo no que diz respeito aos poluentes medidos, podem ser adicionados mais sensores de baixo custo, nomeadamente: ozono, dióxido de enxofre, dióxido de azoto. Dada a resolução e os resultados obtidos para o sensor de CO da família B4 da Alphasense, recomenda-se a utilização para calibração dos sensores dos poluentes anteriormente mencionados.

Para além da medição de poluentes que contribuem para a degradação da qualidade do ar, poderão ser, ainda, medidos outros parâmetros meteorológicos para além da temperatura e humidade, nomeadamente a velocidade e direção do vento e chuva. Para além destes poderão ser medidos, ainda, o nível de ruído ou radiação solar.

Será útil realizar um estudo mais aprofundado no que diz respeito à tecnologia utilizada na transmissão dos dados armazenados nos nós móveis, sendo possível, também, explorar outras formas de transmissão dos dados, nomeadamente através da rede Wi-Fi ou rede móvel.

Aos dados recolhidos pelos nós sensores móveis poderão ser exploradas outras formas de sobreposição dos dados no Google Maps, podendo ser em forma de relevo, consoante o nível de concentração do poluente.

Como já referido, poderão ser feitas, ainda, amostras de um conjunto de várias medições através dos nós sensores móveis numa mesma rua ou num mesmo trajeto/trajeto, podendo estes serem colocados em autocarros, automóveis ou transportados por pedestres que utilizem o mesmo percurso/trajeto, obtendo-se assim um mapa temporal e espacial de dados acerca da poluição.

## 7. Bibliografia

- [1] “Avaliação da Qualidade do Ar na RLVT”. [Online]. Disponível em: <http://www.ccdrlvt.pt/pt/avaliacao-da-qualidade-do-ar-na-rlvt/8085.htm>. Consultado em 10 Outubro 2014.
- [2] “A Rede de Monitorização da Região Centro”. [Online]. Disponível em: <http://www.ccdrc.pt>. Consultado em 11 Outubro 2014.
- [3] “Informação da Qualidade do Ar - Estação de Monitorização da Qualidade do Ar dos Espalhafatos”. [Online]. Disponível em: <http://www.azores.gov.pt/Gra/srrn-ambiente/conteudos/livres/Informação da Qualidade do Ar - Estação de Monitorização da Qualidade do Ar dos Espalhafatos.htm>. Consultado em 15 Outubro 2015.
- [4] “Qualidade do Ar Ambiente”. [Online]. Disponível em: <http://www.apambiente.pt>. Consultado em 1 Outubro 2014.
- [5] “MANUAL DE MÉTODOS E PROCEDIMENTOS OPERATIVOS DAS REDES DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR – Amostragem e Análise”, Maio 2010. [Online]. Disponível em : <http://www.apambiente.pt>. Consultado em 10 Novembro 2014.
- [6] “Qualidade do AR”. [Online]. Disponível em: <http://www.ccdr-alg.pt/site/info/qualidade-do-ar>. Consultado em 22 Novembro 2014.
- [7] “Base de Dados Online sobre a Qualidade do Ar”. [Online]. Disponível em: [qualar.apambiente.pt/](http://qualar.apambiente.pt/). Consultado em 5 Outubro 2014.
- [8] “Relatório da Qualidade do Ar Açores, Setembro 2014”. [Online]. Disponível em: <http://servicos-sraa.azores.gov.pt/grastore/DSMALL/RQA2013.pdf>. Consultado em 6 Novembro 2014.
- [9] “Relatório da Qualidade do Ar na RAM – 2006”. [Online]. Disponível em: <http://dramb.gov-madeira.pt/berilio/docs/fileload/6FVMW00835.pdf>. Consultado em 5 Novembro 2014.
- [10] “Relatório Qualidade do Ar - Região Autónoma da Madeira, 2009”. [Online]. Disponível em: <http://dramb.gov-madeira.pt/berilio/docs/fileload/6VNSV01000.pdf>. Consultado em 4 Novembro 2014.
- [11] “Qualidade do Ar Interior”. [Online]. Disponível em: <http://www.qai.pt/quality.html>. Consultado em 10 Setembro 2015.
- [12] “Qualidade do Ar Interior”. [Online]. Disponível em: <http://www.adene.pt/sce>. Consultado em 10 Setembro 2015.
- [13] “Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios - Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril”. Consultado em 10 Setembro 2015.
- [14] “Metodologia de avaliação da qualidade do ar interior em edifícios de comércio e serviços no âmbito da Portaria 353-A/2013, Fevereiro 2015”. [Online]. Disponível em: <http://www.apambiente.pt/>. Consultado em 10 Setembro 2015.
- [15] Carla Ramos, “QUALIDADE DO AR INTERIOR EM GINÁSIOS”. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Educação e Ciências. Julho de 2013.
- [16] D. Culler; D. Estrin; e M. Srivastava, "Overview of sensor networks". IEEE Computer, vol. 37(8), pp 41– 49, Outubro 2004.
- [17] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, e E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks, 38(4):393–422, Março 2002. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389128601003024>, doi:10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [18] I.F. Akyildiz; S. Weilian; Y. Sankarasubramaniam; e , E. Cayirci, “A survey on sensor networks”. IEEE Communications Magazine, Agosto 2002.
- [19] Abd-El-Barr, M.I.; Youssef, M.A.M.; e Al-Otaibi, M.M. “Wireless Sensor Networks - Part I: Topology and Design Issues”. Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference, 2005.

- [20] F. Akyildiz; X. Wang; e W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey". Computer Networks and ISDN Systems, vol. 47 no.4, pp 445-487, 15 Março 2005.
- [21] "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)", IEEE Computer Society, 1 de Outubro 2003.
- [22] "ZigBee Specification". [Online]. Disponível no *Web site* da ZigBee Alliance: <http://www.zigbee.org>. Consultado em Novembro de 2014.
- [23] "ZigBee/IEEE 802.15.4". [Online]. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/ammaduddin5243/zigbee-43858401>. Consultado em
- [24] Mónica Azevedo, "Monitorização da Qualidade do Ar utilizando Redes Sem Fios Oportunistas". Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Julho de 2010.
- [25] A. Bielsa, "Smart City Project in Salamanca to Monitor Air Quality and Urban Traffic with Waspmote," Libelium, Spain, Dezembro 2011. [Online]. Disponível em [http://www.libelium.com/Smart\\_City\\_Air\\_Quality\\_Urban\\_Traffic\\_Waspmote](http://www.libelium.com/Smart_City_Air_Quality_Urban_Traffic_Waspmote). Consultado em Janeiro 2015.
- [26] "Meshlium Xtreme – Datasheet". [Online]. Disponível em: <http://www.libelium.com/development/meshlium/documentation/meshlium-datasheet/>. Consultado em 5 Janeiro 2015.
- [27] Donnelly, M, "The Milieu and the MESSAGE: Talking to Researchers about Data Curation Issues in a Large and Diverse e-Science Project". The International Journal of Digital Curation, Issue 1, Volume 6, Março 2011.
- [28] S. Wilkins, "Mobile Environmental Sensing Systems – An overview of the MESSAGE Project". TNO Social Sensor Networks Workshop, 28 Janeiro 2010.
- [29] Popoola, O. A.; Mead, M.; Stewart, G.; Hodgson, T.; McLoed, M.; Baldovi, J.; Landshoff, P.; Hayes, M.; Calleja, M.; Jones, R., "Low-Cost Sensor Units for Measuring Urban Air Quality". American Geophysical Union, abstract #A41A-0054, Dezembro 2010.
- [30] J Cohen, R North, S Wilkins "CREATING THE MESSAGE INFRASTRUCTURE". Traffic Engineering and Control (TEC) magazine, Novembro 2009.
- [31] Donnelly, M. "Ways of looking at data: MESSAGE (Mobile Environmental Sensing Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments)". Digital Curation Centre (DCC). Dezembro de, 2010. Disponível em <http://www.dcc.ac.uk/resources/case-studies/message>.
- [32] R.J. North, J. Cohen, S. Wilkins, M. Richards, N. Hoose, J.W. Polak, M.C. Bell, P. Blythe, B. Sharif, J. Neasham, V. Suresh, F. Galatioto, G. Hill, "Field deployment of the MESSAGE System for environmental monitoring". Traffic Eng. Control, pp. 484–488, Dezembro 2009.
- [33] "Arduino Fio pinout" [Online]. Disponível em: <http://www.pighixx.com/test/pinoutspg/boards>. Consultado em 1 Dezembro 2014.
- [34] Alexandre, M., & Gerboles, M. "Review of Small Commercial Sensors for Indicative Monitoring of Ambient Gas". 30, 169-174. Madrid, Spain: The Italian Association of Chemical Engineering.
- [35] "TGS 5042 - For the Detection of Carbon Monoxide, datasheet. Figaro Engineering Inc": [Online]. Disponível em: <http://www.figarosensor.com/products/5042pdf.pdf>. Consultado em 20 Outubro 2014.
- [36] "APPLICATION NOTES FOR TGS5042, datasheet. Figaro Engineering Inc": [Online]. Disponível em: <http://www.figarosensor.com/products/5042app.pdf>. Consultado em 20 Outubro 2014.
- [37] "COM5042 - Evaluation module for TGS5042, datasheet. Figaro Engineering Inc": [Online]. Disponível em: [http://www.figaro.co.jp/en/product/docs/com5042\\_product\\_information\\_rev03.pdf](http://www.figaro.co.jp/en/product/docs/com5042_product_information_rev03.pdf). Consultado em 10 Dezembro 2014.

- [38] "Termístores NTC." [Online]. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/mpef/mef004/20061/Cesar/SENSORES-Termistor.html>. Consultado em 11 Abril 2015.
- [39] "MN1010 – 10mm by 10mm GPS Receiver Module, datasheet." [Online]. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/GR-10-RevA1.pdf>. Consultado em 14 Abril 2015.
- [40] "Serial Peripheral Interface (SPI)" [Online]. Disponível em: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi>. Consultado em: 25 Março 2015.
- [41] "PCD8544 48 × 84 pixels matrix LCD controller/driver, datasheet." [Online]. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/Monochrome/Nokia5110.pdf>. Consultado em 8 Maio 2015.
- [42] "XBee/XBee-PRO OEM RF MXBee™ ZNet 2.5/XBee-PRO™ ZNet 2.5 OEM RF Modules, datasheet." [Online]. Disponível em: <http://elmicro.com/files/sparkfun/xbec-25-manual.pdf>. Consultado em: 6 Maio 2015.
- [43] "The Major Differences in the XBee Series 1 vs. the XBee Series 2." [Online]. Disponível em: [http://knowledge.digi.com/articles/Knowledge\\_Base\\_Article/The-Major-Differences-in-the-XBee-Series-1-vs-the-XBee-Series-2/?l=en\\_US&fs=RelatedArticle](http://knowledge.digi.com/articles/Knowledge_Base_Article/The-Major-Differences-in-the-XBee-Series-1-vs-the-XBee-Series-2/?l=en_US&fs=RelatedArticle). Consultado em 6 Maio 2015.
- [44] "BTBee Pro." [Online]. Disponível em: <http://www.electronicaestudio.com/docs/istd019.pdf>. Consultado em 14 Maio 2015.
- [45] "Particle Sensor Model PPD42NS, datasheet. Shinyei". [Online]. Disponível em: <http://sca-shinyei.com/pdf/PPD42NS.pdf>. Consultado em 1 de Julho 2015.
- [46] "Particle Size Discrimination by PPD42NJ" [Online]. Disponível em: [http://i.publiclab.org/system/images/photos/000/010/160/original/Size\\_Discrimination\(PPD42NJ\).pdf](http://i.publiclab.org/system/images/photos/000/010/160/original/Size_Discrimination(PPD42NJ).pdf) consultado a 1 de Julho 2015.
- [47] "DustDuino" [Online]. Disponível em: <https://github.com/dustduino/DustDuinoSerial/blob/master/DustDuinoSerial/DustDuinoSerial.ino>. Consultado em 1 de Julho 2015.
- [48] "COZIR-W Ultra Low Power CO2 Sensor For OEM Applications, datasheet" [Online]. Disponível em : <http://www.airtest.com/support/datasheet/COZIR-W.pdf>. Consultado em 10 Janeiro 2015.
- [49] "Datasheet SHT1x" [Online]. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Datasheet-humidity-sensor-SHT1x.pdf>. Consultado em 7 Maio 2015.
- [50] "CO-B4 Carbon Monoxide Sensor 4-electrode, datasheet. Alphasense Ltd.". [Online]. Disponível em: <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2015/04/COB41.pdf>. Consultado em 6 Junho 2015.
- [51] "Individual Sensor Board (ISB) Alphasense B4 4-Electrode Gas Sensor, datasheet. Alphasense Ltd.". [Online] Disponível em: <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2015/06/ISB.pdf>. Consultado em 6 Junho 2015.
- [52] Alexandre, M., Gerboles, M. e Spinelle, L. "2014 Report of Laboratory and In-Situ Validation of Micro-Sensor for Monitoring Ambient Air". JRC Technical Reports, 2014.
- [53] "NHD-C12832A1Z-FSW-FBW-3V3, datasheet." [Online]. Disponível em: <http://micropython.org/resources/datasheets/NHD-C12832A1Z-FSW-FBW-3V3.pdf>. Consultado em 10 Junho 2015.
- [54] "DS3234, datasheet" [Online]. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/DS3234.pdf>. Consultado em 5 Junho 2015.
- [55] "X-CTU". [Software]. Licença *freeware*. Disponível em: <http://www.digi.com>.
- [56] "Netbeans v6.7". Licença *freeware*. Disponível em: <http://www.netbeans.com>.

[57] "Arduino IDE 1.0.6 for Windows". Licença *freeware*. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.

[58] "Google Maps APIs " [Online]. Disponível em : <https://developers.google.com/maps>. Consultado em 2 Fevereiro 2016.

[59] "XAMPP v1.7.2 for Windows". Licença GNU. Disponível em: <http://www.apachefriends.org>.

[60] "Notepad++". Licença GPL. Disponível em: <https://notepad-plus-plus.org>

## Anexo A – Poluentes atmosféricos

Tabela A.1 – Descrição dos poluentes e consequências para a saúde humana.

Poluente	Descrição	Sintomas
<b>Monóxido de Carbono</b>	O monóxido de carbono (CO) é um gás tóxico, incolor, sem cheiro e insípido. É um subproduto que resulta da combustão incompleta de combustíveis fósseis devido normalmente à falta ou carência de oxigénio. Em zonas urbanas, o CO é de entre os poluentes atmosféricos mais expressivos da poluição gerada durante o tráfego automóvel e as concentrações mais altas são verificadas junto aos eixos da circulação automóvel [6].	Asfixia, tonturas, sonolência e em doses elevadas pode conduzir à morte [6] [25].
<b>Partículas PM<sub>10</sub></b>	Partículas inaláveis (PM <sub>10</sub> ) é um termo utilizado para uma mistura de micro partículas, sólidas ou líquidas, suspensas na atmosfera com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 µm. As PM <sub>10</sub> são partículas emitidas diretamente para a atmosfera, sendo sobretudo emitidas pela indústria, tráfego automóvel, queima de materiais, poeiras do solo, etc [6] [25].	Irritação das vias respiratórias, bronquites, crises cardíacas. Redução da visibilidade, irritações nas mucosas dos olhos e bronquite crónica [25] [29].
<b>Ozono</b>	O ozono troposférico (O <sub>3</sub> ) é um gás oxidante agressivo, muito tóxico e é considerado um poluente secundário. A sua formação resulta de reações químicas complexas na atmosfera desencadeadas pela ação da radiação solar na presença de certos elementos designados gases percursores nomeadamente os óxidos de nitrogénio (NO <sub>x</sub> ) [6] [29].	Problemas respiratórios, danos nos pulmões, asma, tosse, dores no peito e irritações ao nível dos olhos [25] [29].
<b>Dióxido de Azoto</b>	O dióxido de azoto (NO <sub>2</sub> ) é um gás reativo formado pela oxidação do monóxido de azoto (NO). Estes dois gases são designados por óxidos de azoto (NO <sub>x</sub> ). As altas temperaturas atingidas nos processos de combustão ocorridas nos veículos motorizados levam à formação de óxidos de azoto a partir da oxidação do azoto presente na reação entre o ar e o combustível. A concentração destes poluentes são mais elevadas em zonas urbanas dada a maior intensidade de tráfego rodoviário [6].	Infeções pulmonares, agravamento de sintomas de asma, lesões nos brônquios e alvéolos pulmonares [6] [29].
<b>Dióxido de Enxofre</b>	O dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> ) é um gás incolor, não-inflamável, solúvel na água, altamente tóxico e cheiro característico. Provém da utilização de combustíveis fósseis e de fontes naturais, sendo maioritariamente os vulcões. As emissões do poluente são formadas na queima de combustíveis que na sua composição contenham enxofre. Em zonas urbanas o SO <sub>2</sub> está associado à utilização de veículos movidos a gasóleo. Reage com o vapor de água presente na atmosfera dando origem ao ácido sulfúrico, sendo responsável por causar danos nos seres vivos e levar à acidificação dos rios e lagos [6].	Irritação no sistema respiratório, asma e bronquite. Para além de provocar irritação nas mucosas dos olhos e vias respiratórias [6].
<b>Dióxido de Carbono</b>	O dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) é um gás incolor, inodoro e não inflamável. O CO <sub>2</sub> é um produto resultante de processos naturais, como a respiração dos seres humanos, animais, plantas ou outros organismos, mas também da queima completa de combustíveis fósseis como o gás natural, petróleo, carvão, entre outros [24].	Dificuldade em respirar, aumento da pulsação, dor de cabeça, inconsciência e a

		morte em elevadas concentrações [24].
--	--	---------------------------------------

## Anexo B - Analisadores - princípio de medição

Seguidamente são apresentados os princípios de medição para os diferentes poluentes atmosféricos, nomeadamente o ozono, dióxido de azoto, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e partículas [5].

### Ozono

A Figura B.1 ilustra um esquema de um sistema de medição de ozono por fotometria ultra violeta (UV) com um tubo ótico.

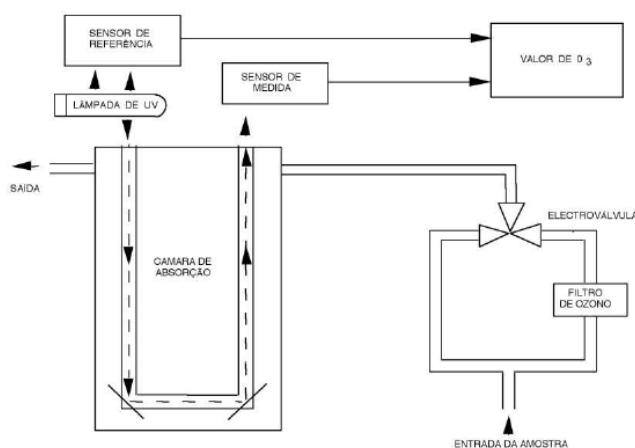


Figura B.1 – Esquema do sistema de medição de um analisador de ozono com um tubo ótico.

O princípio para a medição do ozono consiste em um feixe de luz ultravioleta produzida por uma lâmpada de vapores de mercúrio que emite num comprimento de onda de 254 nm, cujo espectro corresponde ao de absorção das moléculas de ozono. A análise do ozono consiste em introduzir amostras do ar ambiente numa câmara de absorção, sendo atravessada por um feixe de luz ultravioleta e, ao atravessar uma amostra de ar, sofre uma redução proporcional à concentração do ozono na amostra. A câmara onde se processa o fenómeno de absorção é constituída por um ou dois tubos óticos colocados paralelamente e com um comprimento total bem definido. A radiação luminosa produzida passa de um tubo para outro através de um sistema de reflexão constituído por espelhos. A concentração de ozono pode ser calculada através da equação de Beer-Lambert, em função da atenuação da intensidade de radiação, da distância percorrida pela luz ultravioleta e do respetivo comprimento de onda, sendo dado por

$$\frac{I}{I_0} = e^{-acd} \quad (\text{B.1})$$

onde  $I_0$  é a intensidade inicial da luz ultravioleta,  $I$  é a intensidade da luz após a absorção,  $a$  é o coeficiente específico de absorção do ozono para o comprimento de

onda de 254 nm,  $c$  é a concentração de ozono em ppm e  $d$  é o comprimento total do percurso ótico em cm.

## Dióxido de Azoto

A Figura B.2 ilustra um esquema do sistema de medição de um analisador de óxidos de azoto por quimiluminescência, com duas câmaras de reação.

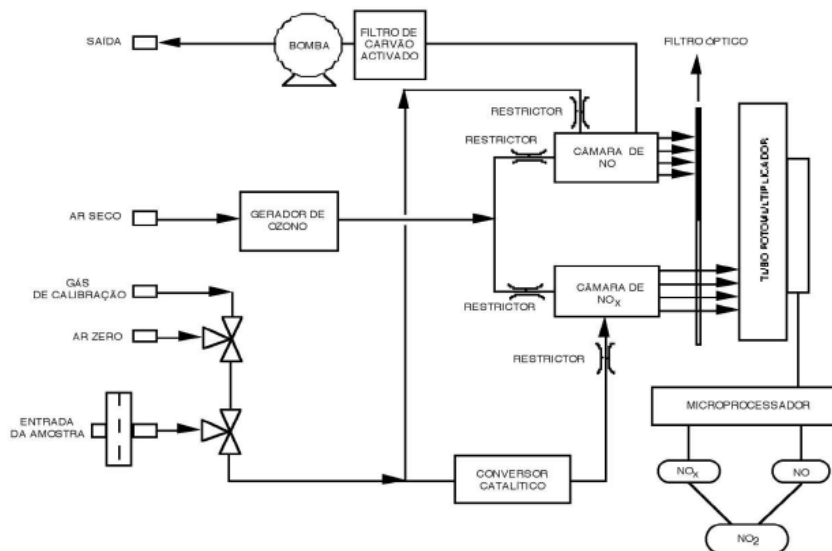


Figura B.2 – Esquema do princípio de funcionamento do analisador de óxidos de azoto.

São normalmente designados por óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ) os poluentes monóxido de azoto e dióxido de azoto. No que diz respeito à qualidade do ar ambiente, o  $\text{NO}_2$  é mais relevante que o  $\text{NO}$ , sendo que a legislação fixa apenas valores limite para o  $\text{NO}_2$ .

O princípio de funcionamento deste tipo de analisadores consiste na deteção fotométrica da quimiluminescência, sendo esta resultante da reação de oxidação do monóxido de azoto com o ozono. O ozono necessário para esta reação é produzido por um gerador existente no equipamento. Nesta reação o  $\text{NO}_2$  resultante, ao regressar ao seu estado fundamental emite luz numa região espectral entre 600 a 2400 nm com um pico a cerca de 1200 nm. A intensidade da luz emitida na reação é proporcional à concentração de  $\text{NO}$  presente, o que permite medir diretamente concentrações de  $\text{NO}$  no ar ambiente. A luz emitida pela reação de quimiluminescência é recebida por um tubo fotomultiplicador, onde é convertido num sinal elétrico proporcional a quantidade de moléculas de  $\text{NO}$  presentes na câmara de medição. A concentração de  $\text{NO}_2$  no ar ambiente é determinada indiretamente, sendo necessário fazer a sua conversão em  $\text{NO}$  através de um conversor térmico ou químico antes da reação com o ozono. Sabendo que no ar ambiente existe simultaneamente  $\text{NO}$  e  $\text{NO}_2$ , será necessário distinguir o  $\text{NO}$  existente naturalmente no ar do  $\text{NO}$  que resulta da conversão efetuada no conversor ( $\text{NO}_{\text{conv}}$ ).

Assim, para determinar estes dois parâmetros terá de se introduzir o ar ambiente na câmara de reação através de duas vias:

- 1ª via – O ar ambiente amostrado entra na câmara de reação, para determinar a concentração de NO presente;

- 2ª via - O ar ambiente amostrado passa previamente por um conversor, onde o NO<sub>2</sub> passa a NO convertido (NOconv). O somatório das moléculas de NO convertidas com as moléculas de NO existentes na amostra será determinado na câmara de reação como NO<sub>x</sub>= NO + NOconv.

A concentração de NO<sub>2</sub> é calculada pela diferença entre a concentração de NO<sub>x</sub> determinada através da 2ª via e a concentração de NO determinada pela 1ª via.

## Dióxido de Enxofre

A Figura B.3 ilustra um esquema do sistema de medição de um analisador de dióxido de enxofre por fluorescência.

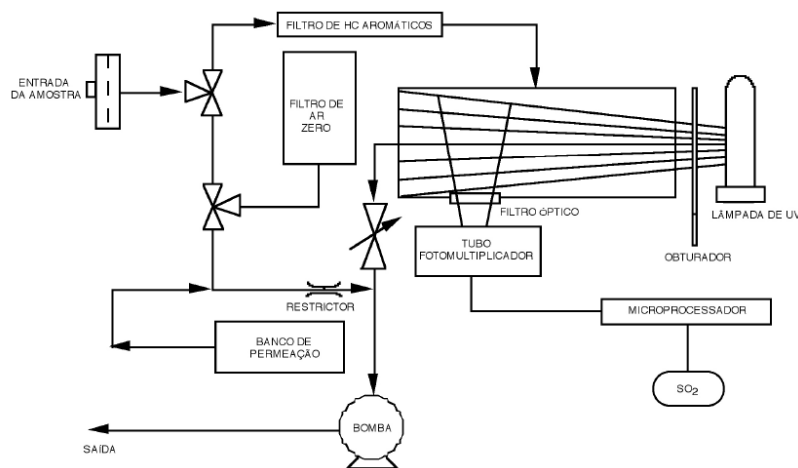


Figura B.3 – Esquema do sistema de medição de um analisador de dióxido de enxofre [5].

O princípio do método baseia-se na detecção da fluorescência emitida pelas moléculas de dióxido de enxofre após a irradiação por luz ultravioleta de comprimento de onda de cerca 214 nm, para o qual a absorção pelas moléculas de SO<sub>2</sub> é máxima. Dentro da câmara a amostra de ar é irradiada por luz ultravioleta e as moléculas de SO<sub>2</sub> adquirem um estado eletronicamente excitado, e regressam ao estado fundamental emitindo uma radiação característica. A radiação UV emitida por fluorescência com comprimento de onda compreendido entre 240 e 420 nm é filtrada e convertida em um sinal elétrico por um tubo fotomultiplicador. Os gases que poderiam apresentar fluorescência, tais como hidrocarbonetos, são eliminados através de um dispositivo que permite a filtração ótica destes gases [10].

## Monóxido de Carbono

A Figura B.4 ilustra um esquema do sistema de medição de um analisador de monóxido de carbono por fotometria infravermelha não dispersiva.

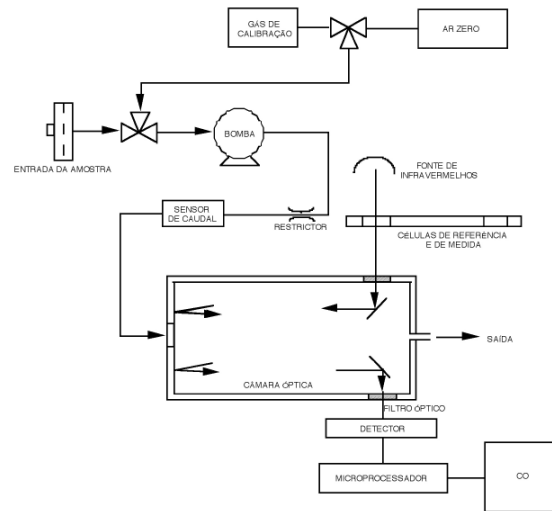


Figura B.4 – Sistema de medição de um analisador de monóxido de carbono [5].

O princípio de funcionamento do medidor de CO por fotometria de infravermelho não dispersivo baseia-se na absorção da radiação infravermelha por parte das moléculas de monóxido de carbono, cujo espectro de absorção máximo é num comprimento de onda de 4,7  $\mu\text{m}$ . A amostra de ar é aspirada por uma bomba e enviada para uma câmara de medida. A radiação infravermelha emitida por uma fonte estável é enviada para a câmara de medida. O monóxido de carbono existente na amostra contida na câmara absorve a radiação infravermelha correspondente à sua frequência característica. A deteção de CO é feita com base na diferença entre a energia da radiação que passa através da célula de referência e a energia da radiação que passa através da câmara que contém a amostra. A energia absorvida é convertida em calor, originando uma expansão seguida da contração do CO. A diferença de temperatura e pressão é detetada, compensada eletronicamente e amplificada, obtém-se um sinal de saída cujo sinal é proporcional à concentração do monóxido de carbono presente na amostra [5].

## Partículas PM10

A Figura B.5 apresenta o esquema do sistema de medição de partículas em suspensão PM10 por radiação  $\beta$ .

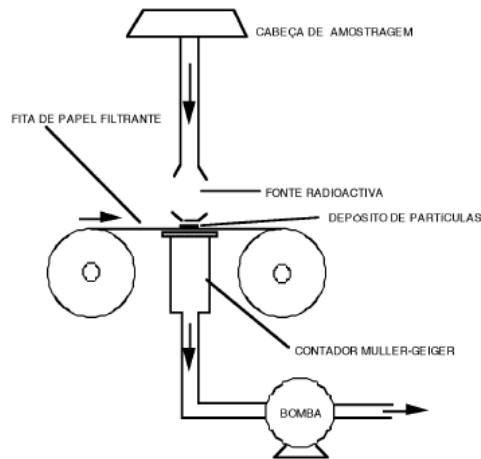


Figura B.5 – Esquema do sistema de medição de partículas em suspensão por radiação  $\beta$ .

O método por absorção de radiação  $\beta$  é utilizado na amostragem e determinação de partículas em suspensão.

O método por absorção de radiação  $\beta$  baseia-se na absorção da radiação beta emitida por uma fonte radioativa por partículas depositadas num filtro. As partículas do ar ambiente são depositadas numa fita de fibra de vidro, e esta fita encontra-se localizada entre a fonte radioativa e o detetor da radiação Geiger-Muller. A distribuição das partículas depositadas sobre a superfície do filtro permite relacionar a massa total depositada com o número de contagens registadas pelo detetor. Conhecendo-se o número de contagens registadas com o filtro antes da aspiração do ar ambiente e o número de contagens registados com o filtro após a deposição de partículas, a massa em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de partículas PM10 é dada por

$$m = \frac{A}{k} (\ln N_0 - \ln N) \quad (\text{B.2})$$

onde  $m$  é a massa total de partículas PM10,  $A$  é a atividade da fonte radioativa,  $k$  é a constante física do equipamento,  $N_0$  é o número de contagens inicial (sem absorção).

## Anexo C – Sensores de Gases

Nas seguintes tabelas C.1, C.2 e C.3 apresenta-se uma amostra de sensores de gases que podem ser utilizados nas RSSF.

Tabela C.1 – Sensores de dióxido de azoto.



Sensor/ Marca	Fabricante	Princípio de operação	Sensibilidade	Intervalo de medição
 NO2-B4	<i>Alphasense</i>	Eletroquímico	-160 a -320 nA/ppm	0-50 ppm
 EC4-20-NO2	<i>Sensortech</i>	Eletroquímico	450 - 750 nA/ppm	0-20 ppm

Tabela C.2 – Sensores de ozono.





Sensor/ Marca	Fabricante	Princípio de operação	Sensibilidade	Intervalo de medição
 O3-B4	<i>Alphasense</i>	Eletroquímico	-250 a -550 nA/ppm	0-5 ppm
 MQ-131	-	Semicondutor	-	0.01 a 2 ppm

Tabela C.3 – Sensores de dióxido de enxofre. ME3-SO2

Sensor/ Marca	Fabricante	Princípio de operação	Sensibilidade	Intervalo de medição
 SO2-B4	<i>Alphasense</i>	Eletroquímico	300 a 550 nA/ppm	0-10 ppm
 ME3-SO2	<i>Zhengzhou Winsen Electronics Technology</i>	Eletroquímico	400 a 700 nA/ppm	0 a 20 ppm

# Anexo D – Esquemático do Arduino fio

Na figura D.1 apresenta-se o esquemático do Arduino fio utilizado nos nós sensores.

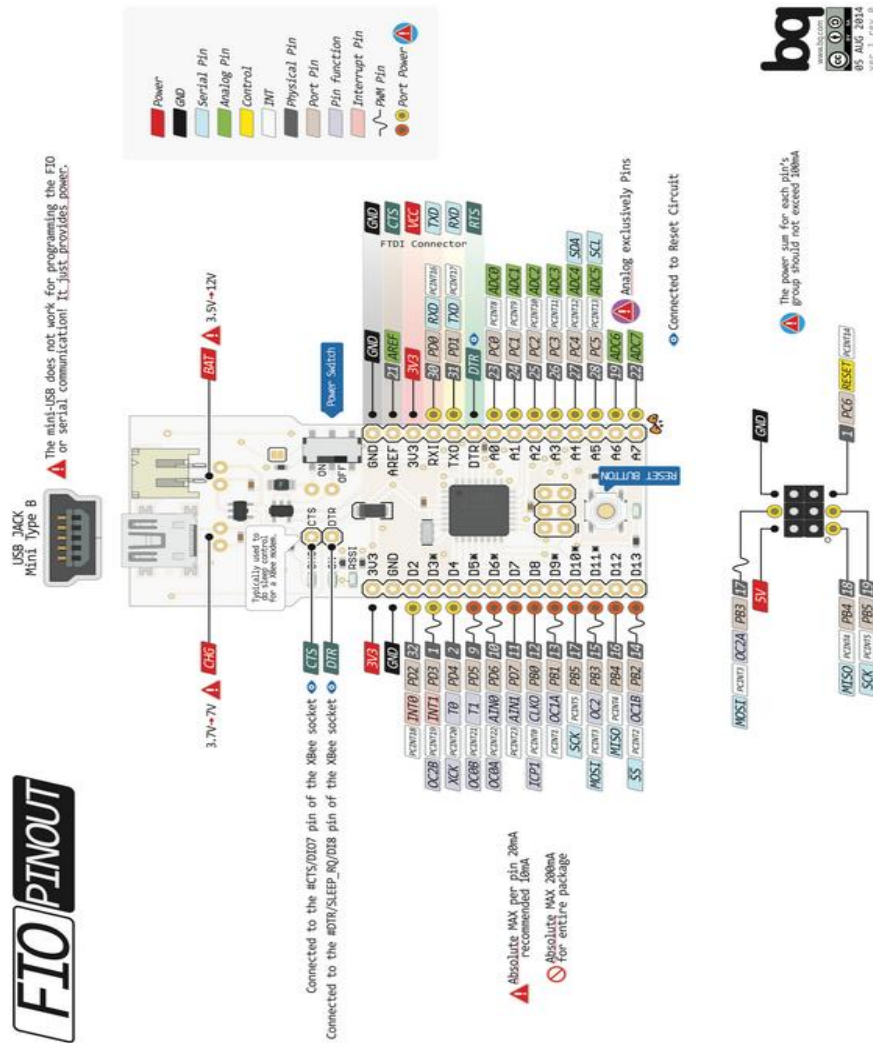


Figura D.1 – Esquemático do Arduino Fio [33].

O ATmega328P presente no Arduino Fio é um microcontrolador de 8 bit de tecnologia CMOS e arquitetura RISC e possui um grande número de instruções (131). Apresenta 32 KB de memória Flash para programa e dados, 3 contadores/temporizadores, 1 de 16 bit e 2 de 8 bit, 6 canais PWM, 8 canais ADC de 10 bit, interrupções e suporta os protocolos SPI e I<sup>2</sup>C. Opera numa gama de tensão desde os 1,5 V aos 5,5 V, velocidade de processamento de 0 - 4 MHz para uma tensão de 1,8 – 5,5 V, 0 – 10 MHz para uma tensão de 2,7 – 5,5 V e 0 – 20 MHz para uma tensão de 4,5 – 5,5 V. Cada porta fornece até 40 mA, no total o microcontrolador

fornece 200 mA. Pode operar numa gama de temperatura e desde os -40°C to 85°C [33].

## Anexo E – Sensores eletroquímicos

Os sensores eletroquímicos requerem pouca ou nenhuma energia para o seu funcionamento e apresentam à sua saída uma corrente proporcional ao gás medido. Verifica-se que os sensores eletroquímicos são mais viáveis quando o consumo dos dispositivos é relevante. Deste modo, apresenta-se a seguir o princípio de operação para este tipo de sensor.

Os sensores eletroquímicos são constituídos por células contendo um eletrólito e elétrodos. O gás que se pretende determinar entra em contacto com o elétrodo por difusão. A carga gerada pela reação à superfície do elétrodo que entra em contacto com o gás alvo é equilibrada com a reação que ocorre em simultâneo noutra elétrodo, formando assim um par de reações químicas de oxidação/redução (uma é reduzida e outra oxidada). Na prática dá-se uma transferência de eletrões entre os elétrodos, originando assim uma corrente elétrica mensurável, sendo proporcional à concentração do gás medido [50].

O diagrama de um sensor eletroquímico de 4 elétrodos típico é apresentado na figura E.1, porém possam existir sensores eletroquímicos com dois ou três elétrodos.

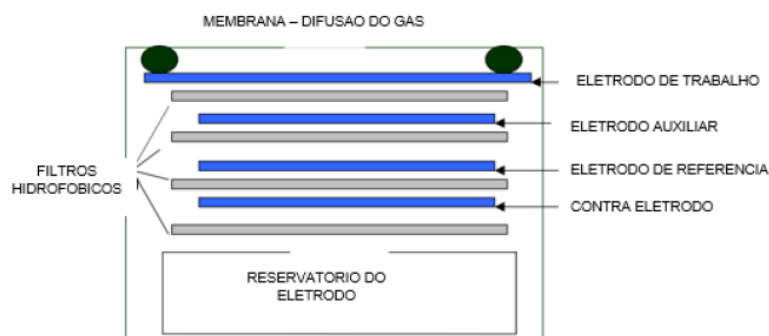


Figura E.1 – Esquema de um sensor eletroquímico de 4 elétrodos. Adaptado de [50] ALPHASENSE, 2013<sup>a</sup>

Os sensores eletroquímicos são constituídos fundamentalmente por dois elétrodos: o elétrodo de trabalho e o contra elétrodo.

O elétrodo de trabalho (*Working Electrode - WE*) encontra-se à superfície do sensor e responde ao gás alvo, onde ocorrem as reações de redução permitindo que o gás entre em contacto com o electrocatalisador e o eletrólito.

O contra elétrodo (*Counter Electrode - C*), completa o circuito com o elétrodo de trabalho. Equilibra a reação realizada pelo elétrodo de trabalho ocorrendo assim um par de reações químicas de oxidação/redução.

No entanto, diversos sensores possuem mais elétrodos para além destes, sendo estes o elétrodo auxiliar e o elétrodo de referência.

O elétrodo auxiliar (*Auxiliar Electrode* - AUX) não entra em contacto com o gás. Este varia consoante o efeito das condições climatéricas nomeadamente a temperatura. Uma alteração da linha de base (zero) do elétrodo de trabalho, devido a alterações de temperatura, será acompanhada com uma mudança idêntica pelo elétrodo auxiliar. A subtração dos dois sinais permite compensar o efeito da temperatura no sensor.

O elétrodo de referência (*Reference Electrode* - REF) é utilizado para manter uma tensão fixa do elétrodo de trabalho e do elétrodo de referência. É importante ter uma tensão estável nestes elétrodos de modo a garantir uma sensibilidade constante, boa linearidade e o mínimo de sensibilidade a gases interferentes.

Os sensores eletroquímicos são compactos e apresentam como principais vantagens a exigência de pouca energia, boa linearidade, repetibilidade e precisão, e podem ter um tempo de vida útil longo. Em contrapartida, são sensíveis a alterações de temperatura e possuem alguma sensibilidade a outros gases que não o gás alvo.

## Anexo F - Características do sensor TGS5042

A figura F.1 ilustra a dependência típica do TGS4052 à temperatura, onde o eixo dos xx representa a temperatura e o eixo dos yy o rácio entre  $I/I_0$ .  $I$  representa a corrente à saída do sensor para uma concentração de CO de 400 ppm a diferentes temperaturas.  $I_0$  representa a saída do sensor para uma concentração de CO de 400 ppm à 20°C

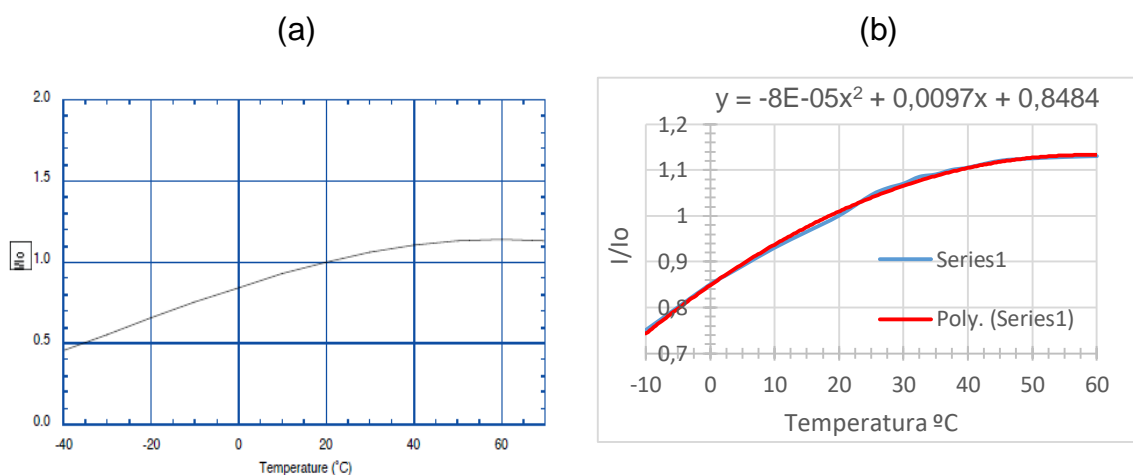


Figura F.1 - Dependência do sensor à temperatura. a) Curva apresentada pela Fígaro [35]; b) Equação polinomial da dependência do sensor à temperatura.

Da curva característica apresentada verifica-se que, para uma mesma concentração de CO, com o aumento ou diminuição da temperatura a corrente gerada pelo sensor aumenta ou diminui respetivamente. Embora a curva de dependência à temperatura apresentada seja referente à 400 ppm, a Fígaro afirma que esta relação é proporcional para qualquer outra concentração. A figura F.1b mostra a curva de calibração obtida em Excel.

Na figura F.2 é apresentado a sensibilidade do sensor a gases interferentes.

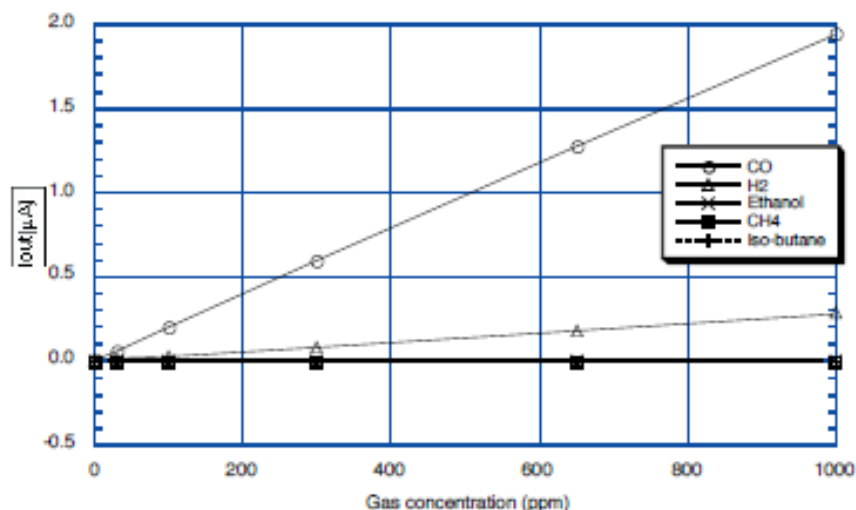
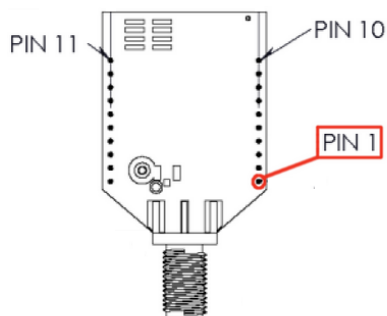


Figura F.2 - Sensibilidade do sensor TGS5042 ao CO e a outros gases [35].

## Anexo G – Características e notas de utilização do XBee

Na figura G.1 apresenta-se a configuração dos pinos presente no rádio XBee.



Pin #	Name	Direction	Default State	Description
1	VCC	-	-	Power Supply
2	DIO13/DOUT	Both	Output	UART Data out
3	DIO14/DIN/nCONFIG	Both	Input	UART Data In
4	DIO12/SPI_MISO	Both	Disabled	GPIO/ SPI slave out
5	nRESET	Input	Input	Module Reset
6	DIO10/RSSI PWM/PWM0	Both	Output	RX signal strength indicator/GPIO
7	DIO11/PWM1	Both	Disabled	GPIO
8	reserved	-	-	Do Not Connect
9	DIO8/nDTR/SLEEP_RQ	Both	Input	Pin Sleep Control line /GPIO
10	GND	-	-	Ground
11	DIO4/SPI_MOSI	Both	Disabled	GPIO/SPI slave In
12	DIO7/nCTS	Both	Output	Clear-to-Send Flow Control/GPIO
13	DIO9/ON_nSLEEP	Both	Output	Module Status Indicator/GPIO
14	VREF	-	-	Not connected
15	DIO5/ASSOCIATE	Both	Output	Associate Indicator/GPIO
16	DIO6/nRTS	Both	Input	Request-to-Send Flow Control/GPIO
17	DIO3/AD3 /SPI_nSSEL	Both	Disabled	Analog Input/GPIO/SPI Slave Select
18	DIO2/AD2 /SPI_CLK	Both	Disabled	Analog Input/GPIO/SPI Clock
19	DIO1/AD1 /SPI_nATTN	Both	Disabled	Analog Input/GPIO/SPI Attention
20	DIO0/AD0/CB	Both	Disabled	Analog Input/Commissioning Button/GPIO

Figura G.1 – Configuração dos pinos do rádio XBee.

Os rádios XBee podem operar em modo AT e modo API. No modo API toda a informação é constituída por tramas (*frames*), os quais podem conter diversas informações, nomeadamente endereçamentos, comandos, mudanças de estado, etc. Na figura G.2 pode observar-se mais detalhadamente o formato da trama API.

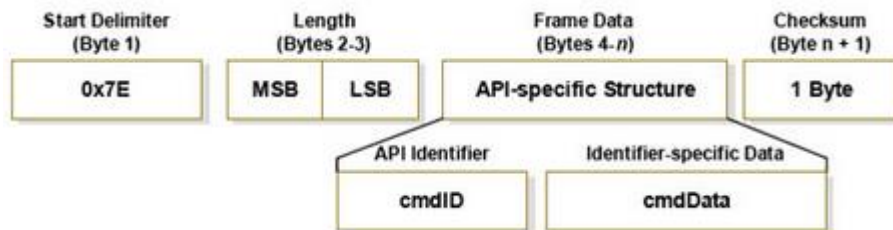


Figura G.2 – Estrutura da trama no modo API.

Cada trama API é então constituída por:

- **Start Delimiter** - primeiro byte da trama e começa sempre por 0x7E.
- **Length** - comprimento do campo *Frame Data*.
- **Frame Data** - é composto por dois campos, *API Identifier* e *Identifier-specific Data*. O *API Identifier* indica o tipo de dados API que estão presentes em *Identifier-specific Data*. O *Identifier-specific Data* é especificado consoante o *API Identifier* utilizado.

**Checksum** - permite verificar a integridade da mensagem. Resulta na soma dos valores existentes em *Frame Data*. Ao resultado obtido é subtraído o valor 0xFF.

Na figura G.3 apresenta-se um quadro resumo da estrutura API do XBee.

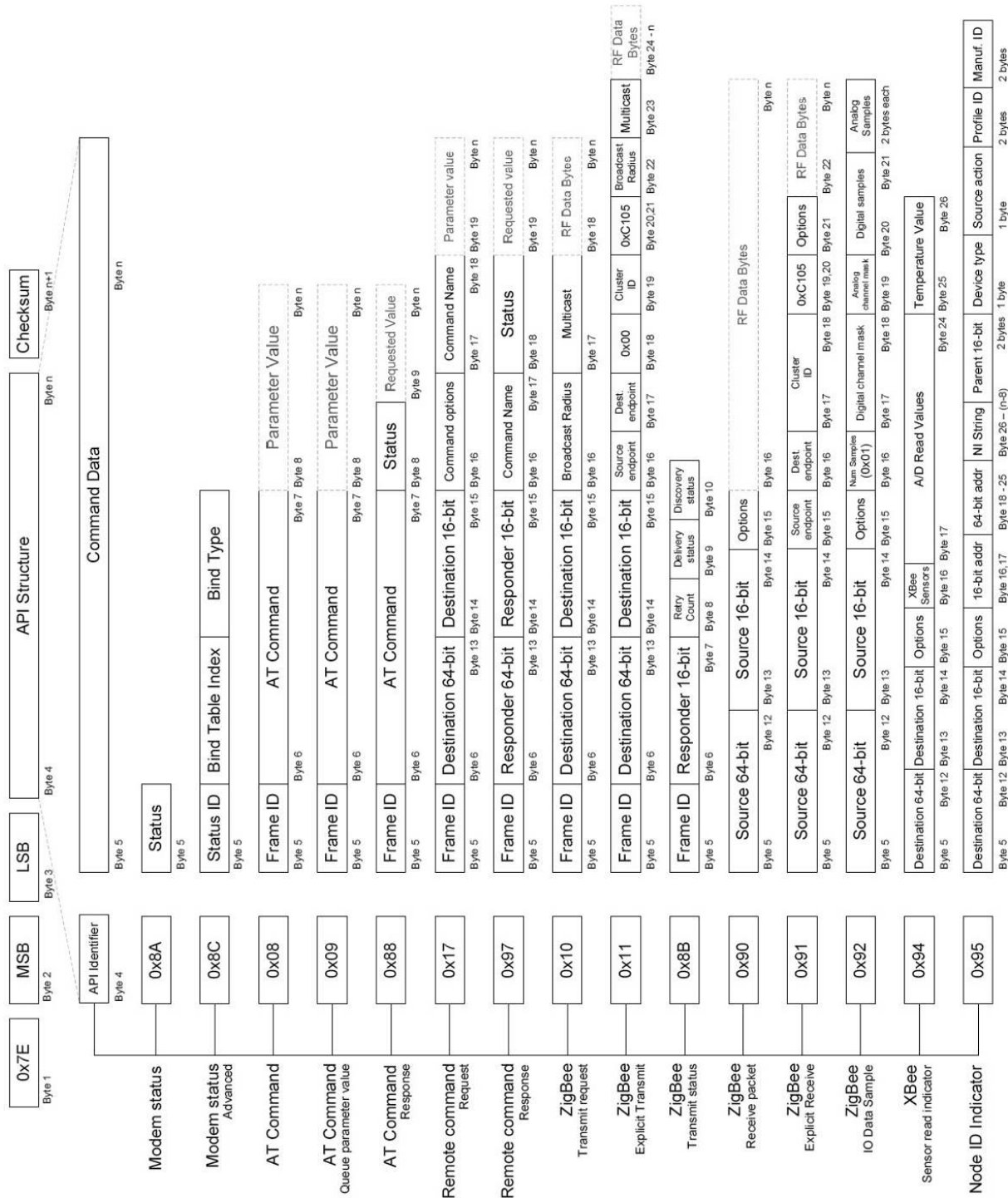


Figura G.3 – Resumo da estrutura API do XBee.



```

pay.toCharArray(buf, len+1);
for(int i=0;i<len;i++){
trama[17+i]=buf[i];
}
for(int i=0;i<len ;i++){//
}
checksum = 0;
for (int i = 3; i < 17+len; i++) {
checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}
trama[17+len] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento a 2
trama[2] = len+14;
Serial.write(trama, 18+len); // Envia a trama pela porta série
pay="";
delay(100);
}
else{pay+=aux;}
}}}

int i=0;
float t=0;
float h=0;
void loop()
{
gps_read();
co_read();
t_co_read();
vbat_read();
escreve_ecra();
pay="";
pay+="ts=";
pay+=data;
pay+=hora;
pay+="&C=";
pay+=(int)(co_ppm*100);
pay+="&T=";
pay+=(int)(t_co*100);
pay+="&L=";
pay+=LAT;
pay+="&l=";
pay+=LON;
Serial.flush();
escreve_sd();
}
void escreve_sd()
{
sd_status=0;
if (myFile = SD.open("r.txt", FILE_WRITE))
{
//formato *ts=101115125023&C=00000&T=2591&L=3265084&l=1690720
sd_status=1;
myFile.println(pay);
//Serial.println("ok");
myFile.flush();
myFile.close();
}
// Cálculo do checksum
int len=pay.length();
char buf[len+1];
pay.toCharArray(buf, len+1);
for(int i=0;i<len;i++){
trama[17+i]=buf[i];
}
for(int i=0;i<len ;i++){//
}
checksum = 0;
for (int i = 3; i < 17+len; i++) {
checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}

```

```

trama[17+len] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento a 2
trama[2] = len+14;
Serial.write(trama, 18+len); // Envia a trama pela porta série
Serial.println("");
}

void escreve_ecra()
{lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(hora);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(t_co);
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(co_mv);
lcd.setCursor(40, 2);
lcd.print(co_ppm);
lcd.setCursor(0, 3);
if(hora_data_fix[12]=='1'){lcd.print("Fix");}else{lcd.print("No FIX");}

void gps_read()
{int again=1;
int pos=1;
int i;
char gps_aux[300];
hora="";
data="";
unsigned long int aux[]={100000,10000,1000,100,10,1};
float aux_1[]={0.1, 0.01, 0.001, 0.0001};
while(again==1)
{while(gps_aux[pos-1] != 0x0A)
{ if(gpsSerial.available())
{gps_aux[pos] = gpsSerial.read();
pos++;
if(pos==74 ){pos=1;}
}
}
pos=1;
if(gps_aux[1]=='$'&&gps_aux[2]=='G'&&gps_aux[3]=='P'&&gps_aux[4]=='G'&&gps_aux[5]=='G'&&gps_aux[6]=='A'&&gps_aux[7]
=='&','&gps_aux[41]=='&')
{
again=0;
for(i=0;i<6;i++)
{//hora_data_fix[i]=gps_aux[i+8];
hora+=gps_aux[i+8];
}
hora_data_fix[12]=gps_aux[44];
for(i=0;i<9;i++){lat_lon[i]=gps_aux[19+i];}
lat_lon[9]=gps_aux[29];
for(i=0;i<10;i++){lat_lon[i+10]=gps_aux[31+i];}
lat_lon[20]=gps_aux[42];
float lat=0;
float lon = 0;
float L=0;
float L_l = 0;
float l=0;
float l_l = 0;
//Conversão de coordenadas
for(i=0;i<2;i++)
{lat = lat + ((float)gps_aux[19+i]-48)*aux[4+i];
L = L + ((float)gps_aux[21+i]-48)*aux[4+i];
L_l = L_l + ((float)gps_aux[34+i]-48)*aux[4+i];
}
for(i=0;i<3;i++)
{ lon = lon + ((float)gps_aux[31+i]-48)*aux[3+i]; }
for(i=0;i<4;i++)
{l = l + ((float)gps_aux[24+i]-48)*aux_1[i];
l_l = l_l + ((float)gps_aux[37+i]-48)*aux_1[i];
}
L = L + l;

```

```

L_1 = L_1 + L_1;
lat=(lat + L/60);
lon=lon + L_1/60;
LAT = long(lat*100000);
LON = long(lon*100000);
} }

again=1;
while(again==1)
{while(gps_aux[pos-1] != 0x0A)
{if(gpsSerial.available())
{gps_aux[pos] = gpsSerial.read();
pos++;
if(pos==74){pos=1;}
}}

pos=1;
if(gps_aux[1]=='$'&&gps_aux[2]=='G'&&gps_aux[3]=='P'&&gps_aux[4]=='R'&&gps_aux[5]=='M'&&gps_aux[6]=='C'){again=0;}
}

again=1;
//ciclo para encontrar a data
int continua=1;
int ind=1;
int cont =0;
while(continua==1)
{if(gps_aux[ind]==' '){ cont++;}
if(cont==9){continua=0;}
ind++;
}
for(int i=0;i<6;i++){data+=gps_aux[ind]; ind++;}
}

void co_read()
{int input =0;
input=analogRead(A0);
delay (20);
input= (input + analogRead(A0))/2;
float temp= t_co_read();
float correcao=(1.124*temp+95.03)/125;
co_mv =((input * 1.1)/1023)*1000; //valor em mV
co_ppm=((co_mv/correcao) - 124)/3.13/1.518);
if(co_ppm<0){co_ppm=0;}
}

void t_co_read(){
float reading;
reading = analogRead(A2);
reading = (1023 / reading) - 1;
reading = 10000 / reading;
//Faz o cálculo pela fórmula do Fator Beta
float temperatura;
temperatura = reading / 10000; // (R/Ro)
temperatura = log(temperatura); // ln(R/Ro)
temperatura /= 4000; // 1/B * ln(R/Ro)
temperatura += 1.0 / (25 + 273.15); // + (1/To)
temperatura = 1.0 / temperatura; // Inverte o valor
temperatura -= 273.15; // Converte para Celsius
t_co=temperatura;
}

void vbat_read()
{
int input =0;
input=analogRead(A3);
vbat=((input*1.1)/1024)*4.54;
}

```

# Anexo I – Programação em linguagem C do nó sensor móvel com Bluetooth

```
/*
*****
* Nome : movelbluetooth.cpp
* Autor : Beto Silva
* Descrição : usado no Arduino Fio para monitorizar o TGS5042, SHT15,
* tensão da bateria e comunicar com o rádio Bluetooth
*****
#include <SoftwareSerial.h> //Biblioteca para uma nova interface serial
#include <SD.h> //Biblioteca para o cartão SD
//inicia uma nova porta série para o GPS
SoftwareSerial gpsSerial(2,3); // RX, TX

File myFile;
int sd_status = 0;
//payload da trama xBee
String pay="";
//Definição de variáveis
float co_ppm = 0; valor de CO em ppm
float co_mv = 0; Valor de CO em mv
float t_co = 0; //temperatura
float vbat = 0; //tensao bateria
//Definição de variáveis para o GPS
char hora_data_fix[13];
char lat_lon[21];
long LAT=0;
long LON=0;
String hora;
String data;
int fix = 0;
//Trama Bluetooth
byte checksum = 0;
byte trama[] = {0x7E,0x00,0x44,0x10,0x00,0x13,0xA2,0x00,0x40,0xB3,0xD3,0xE5,//12
0x00,0xFF,0xFE,0x00,0x00, //5
0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00, //20
0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00, //11
0x00};

void setup()
{
analogReference(INTERNAL); //Tensão de referência em 1,1V
gpsSerial.begin(4800);
Serial.begin(9600);
Serial.println("a");
lcd.begin(84, 48);
lcd.setContrast(80);
while(SD.begin(10)==0){} //Espera até o cartão estar disponível
//gpsSerial.listen(); //Fica a escuta da porta do GPS

//Se o botão transmissão está a 1
if(analogRead(A4)==0){
File myFile = SD.open("r.txt", FILE_READ);
while (myFile.available()) //lê até ao fim do ficheiro
{ aux = myFile.read();
if(aux==0xA)
{
// Cálculo do checksum
int len=pay.length();
char buf[len+1];
pay.toCharArray(buf, len+1);
for(int i=0;i<len;i++){
trama[17+i]=buf[i];
}
}
for(int i=0;i<len ;i++){//
```

```

}
checksum = 0;
for (int i = 3; i < 17+len; i++) {
checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}
trama[17+len] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento a 2
trama[2] = len+14;
Serial.write(trama, 18+len); // Envia a trama pela porta série
pay="";
}
else{pay+=aux;}
}}}

int i=0;
float t=0;
float h=0;
void loop()
{
gps_read();
co_read();
t_co_read();
vbat_read();
envia_ecra();
pay="";
pay="*ts=";
pay+=data;
pay+=hora;
pay+="&C=";
pay+=(int)(co_ppm*100);
pay+="&T=";
pay+=(int)(t_co*100);
pay+="&L=";
pay+=LAT;
pay+="&l=";
pay+=LON;
Serial.flush();
escreve_sd();
}
void escreve_sd()
{
sd_status=0;
if (myFile = SD.open("r.txt", FILE_WRITE))
{
//formato *ts=101115125023&C=00000&T=2591&L=3265084&l=1690720
sd_status=1;
myFile.println(pay);
//Serial.println("ok");
myFile.flush();
myFile.close();
}
// Cálculo do checksum
int len=pay.length();
char buf[len+1];
pay.toCharArray(buf, len+1);
for(int i=0;i<len;i++){
trama[17+i]=buf[i];
}
for(int i=0;i<len ;i++){//
}
checksum = 0;
for (int i = 3; i < 17+len; i++) {
checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}

trama[17+len] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento a 2
trama[2] = len+14;
Serial.write(trama, 18+len); // Envia a trama pela porta série
Serial.println("");
}

```

```

void escreve_ecra()
{ Serial.print("hora:");
  Serial.println(hora);
  Serial.print("temp:");
  Serial.println(t_co);
  Serial.print("CO:");
  Serial.println(co_ppm);
  if(hora_data_fix[12]=='1'){Serial.println("Fix");}else{Serial.println("No FIX");}
  Serial.println(v_bat);
  Serial.println("");
  Serial.println("");
}

void gps_read()
{int again=1;
  int pos=1;
  int i;
  char gps_aux[300];
  hora="";
  data="";
  unsigned long int aux[]={100000,10000,1000,100,10,1};
  float aux_1[]={0.1, 0.01, 0.001, 0.0001};
  while(again==1)
  {while(gps_aux[pos-1] != 0x0A)
  { if(gpsSerial.available())
  {gps_aux[pos] = gpsSerial.read();
  pos++;
  if(pos==74 ){pos=1;}
  }
  pos=1;
  if(gps_aux[1]!='$'&&gps_aux[2]!='G'&&gps_aux[3]!='P'&&gps_aux[4]!='G'&&gps_aux[5]!='G'&&gps_aux[6]!='A'&&gps_aux[7]
  ==','&&gps_aux[41]==',')
  {
  again=0;
  for(i=0;i<6;i++)
  //{hora_data_fix[i]=gps_aux[i+8];
  hora+=gps_aux[i+8];
  }
  hora_data_fix[12]=gps_aux[44];
  for(i=0;i<9;i++){lat_lon[i]=gps_aux[19+i];}
  lat_lon[9]=gps_aux[29];
  for(i=0;i<10;i++){lat_lon[i+10]=gps_aux[31+i];}
  lat_lon[20]=gps_aux[42];
  float lat=0;
  float lon = 0;
  float L=0;
  float L_l = 0;
  float l=0;
  float l_l = 0;
  //Conversão de coordenadas
  for(i=0;i<2;i++)
  {lat = lat + ((float)gps_aux[19+i]-48)*aux[4+i];
  L = L + ((float)gps_aux[21+i]-48)*aux[4+i];
  L_l = L_l + ((float)gps_aux[34+i]-48)*aux[4+i];
  }
  for(i=0;i<3;i++)
  { lon = lon + ((float)gps_aux[31+i]-48)*aux[3+i]; }
  for(i=0;i<4;i++)
  {l = l + ((float)gps_aux[24+i]-48)*aux_1[i];
  l_l = l_l + ((float)gps_aux[37+i]-48)*aux_1[i];
  }
  L = L + l;
  L_l = L_l + l_l;
  lat=(lat + L/60);
  lon=lon + L_l/60;
  LAT = long(lat*100000);
  LON = long(lon*100000);
  } }
}

```

```

again=1;
while(again==1)
{while(gps_aux[pos-1] != 0x0A)
{if(gpsSerial.available())
{gps_aux[pos] = gpsSerial.read();
pos++;
if(pos==74){pos=1;}
}}

pos=1;
if(gps_aux[1]=='$'&&gps_aux[2]=='G'&&gps_aux[3]=='P'&&gps_aux[4]=='R'&&gps_aux[5]=='M'&&gps_aux[6]=='C'){again=0;}
}

again=1;
//ciclo para encontrar a data
int continua=1;
int ind=1;
int cont =0;
while(continua==1)
{if(gps_aux[ind]==','){ cont++;}
if(cont==9){continua=0;}
ind++;
}
for(int i=0;i<6;i++){data+=gps_aux[ind]; ind++;}
}

void co_read()
{int input =0;
input=analogRead(A0);
delay (20);
input= (input + analogRead(A0))/2;
float temp= t_co_read();
float correcao=(1.124*temp+95.03)/125;
co_mv =((input * 1.1)/1023)*1000; //valor em mV
co_ppm=((co_mv/correcao) - 124)/3.13/1.508;
if(co_ppm<0){co_ppm=0;}
}

void t_co_read(){
float reading;
reading = analogRead(A2);
reading = (1023 / reading) - 1;
reading = 10000 / reading;
//Faz o cálculo pela fórmula do Fator Beta
float temperatura;
temperatura = reading / 10000; // (R/Ro)
temperatura = log(temperatura); // ln(R/Ro)
temperatura /= 4000; // 1/B * ln(R/Ro)
temperatura += 1.0 / (25 + 273.15); // + (1/To)
temperatura = 1.0 / temperatura; // Inverte o valor
temperatura -= 273.15; // Converte para Celsius
t_co=temperatura;
}

void vbat_read()
{
int input =0;
input=analogRead(A3);
vbat=((input*1.1)/1024)*4.54;
}

```

## Anexo J – Programação em linguagem C do nó sensor fixo exterior

```
/*
*****
* Nome : fixoexterior.cpp
* Autor : Beto Silva
* Descrição : usado no Arduino Fio para monitorizar o TGS5042, SHT15,
* tensão da bateria e comunicar com o rádio XBee
*****
//Biblioteca para o sensor de temperatura STH15
#include <SHT1x.h>
//Definição das portas digitais a utilizar para o sensor STH15
#define dataPin 4
#define clockPin 5
//Configuração do sensor STH15
SHT1x sht1x(dataPin, clockPin);
//Definição de variáveis globais
float co_ppm = 0; //Valor do CO, em ppm
float co_mv = 0; //Tensão à saída do circuito de condicionamento de sinal de CO
float temp = 0; //Valor da temperatura
float hum = 0; //Valor da humidade
float vbat = 0; //Tensao da bateria
int xbeeSleep=7;
byte checksum = 0; //checksum da msg ZigBee
//Trama ZigBee
byte trama[] =
{0x7E,0x00,0x3A,0x10,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xFF,0xFE,0x00,0x00,'?', 'C', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00,0
x00,'&', 'V', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 'B', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 't', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00,'&', 'h', '=', 0x00,0x00,0x00,0
x00,'&', 'i', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00,0x00};

void setup()
{
  analogReference(INTERNAL); //Referência do ADC em 1,1V
  Serial.begin(9600); //Ativação da porta série
  digitalWrite(xbeeSleep,HIGH);//adormece XBee
}

int i=0;
float t=0;
float h=0;
void loop()
{
  i++; //Contagem de segundos
  co_read(); //Amostra CO
  if(i==9.8) //se passaram 9.8 s
  {
    read_tem_hum(); //Amostra temperatura e Humidade
    vbat_read(); //Amostra Tensão Bateria
    //Calcula o valor de CO
    co_mv = co_mv / i;
    float correcao=(1.124*temp+95.03)/125;
    co_mv =((input * 1.1)/1023)*1000; //valor em mV
    co_ppm=((co_mv/correcao) - 124)/3.13/1.367);
    if(co_ppm<0){co_ppm=0;}
    char acBuf[5 + 1]; // adiciona 1 para termina\u00e7\u00e3o NULL
    int co = co_ppm*100;
    sprintf( acBuf, "%5d", co ); // 1024 -> "1024" converte valor int para string
    trama[20] = acBuf[0];
    trama[21] = acBuf[1];
    trama[22] = acBuf[2];
    trama[23] = acBuf[3];
    trama[24] = acBuf[4];

    char acBuf1[5 + 1]; // adiciona 1 para termina\u00e7\u00e3o NULL
    int V = co_mv*100;
    sprintf( acBuf1, "%5d", V ); // 1024 -> "1024" converte valor int para string
    trama[28] = acBuf1[0];
    trama[29] = acBuf1[1];
    trama[30] = acBuf1[2];
    trama[31] = acBuf1[3];
    trama[32] = acBuf1[4];
  }
}
```

```

char acBuf2[4 + 1]; // adiciona 1 para termina\u00e7\u00e3o NULL
int B = vbat*100;
sprintf( acBuf2, "%4d", B ); // 1024 -> "1024" converte valor int para string
trama[36] = acBuf2[0];
trama[37] = acBuf2[1];
trama[38] = acBuf2[2];
trama[39] = acBuf2[3];

char acBuf3[4 + 1]; // adiciona 1 para termina\u00e7\u00e3o NULL
int T = temp*100;
sprintf( acBuf3, "%4d", T ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[43] = acBuf3[0];
trama[44] = acBuf3[1];
trama[45] = acBuf3[2];
trama[46] = acBuf3[3];

char acBuf4[4 + 1]; // adiciona 1 para termina\u00e7\u00e3o NULL
int H = hum*100;
sprintf( acBuf4, "%4d", H ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[50] = acBuf4[0];
trama[51] = acBuf4[1];
trama[52] = acBuf4[2];
trama[53] = acBuf4[3];

char acBuf5[4 + 1]; // adiciona 1 para termina\u00e7\u00e3o NULL
int I = curr;
sprintf( acBuf5, "%4d", I ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[57] = acBuf5[0];
trama[58] = acBuf5[1];
trama[59] = acBuf5[2];
trama[60] = acBuf5[3];

// C\u00e1lculo do checksum
checksum = 0;
for (int i = 3; i < sizeof(trama)-1; i++) {
checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}

trama[61] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento a 2
digitalWrite(xbeeSleep,LOW);//adormece XBee
delay(15);
Serial.write(trama, sizeof(trama)); // Envia a trama pela porta serie
digitalWrite(xbeeSleep,HIGH);//adormece XBee
delay(200);
co_ppm = 0;
co_mv = 0;
i=0;//reinicia contagem de 10s
} }

void co_read(){
int input =0;
input=analogRead(A0);
co_mv = co_mv +((input * 1.1)/1023)*1000; //valor em mV
delay(1000);
}

void read_tem_hum(){
temp = sht1x.readTemperatureC();
hum = sht1x.readHumidity();
}

void vbat_read(){
int input =0;
input=analogRead(A5);
vbat = ((input * 1.1)/1023)*4; //valor em mV
}

```

## Anexo K – Programação em linguagem C do nó sensor fixo interior

```
/*
*****
* Nome : fixointerior.cpp
* Autor : Beto Silva
* Descrição : usado no Arduino Fio para monitorizar o Cozir-W20, PPD42,
* tensão da bateria e comunicar com o rádio XBee
*****/

// PPD42 - mede a concentração de partículas em ug/m3
// Princípio de funcionamento
// é medida a largura de pulso dos canal P1 e P2
// A duração do pulso é convertido para percentagem
// e usada a equação da concentração de partículas
// A concentração de partículas é determinada assumindo a forma
// tamanho e densidade das partículas com a concentração de partículas
#include <SoftwareSerial.h>//Biblioteca serial
void setup();
void loop();
void xbee();
void co2_read();
SoftwareSerial co2Serial(9,10); // RX, TX novo objeto serial
String pay=""; //payload do xbee
//Variáveis sensor co2
String val= ""; //Valor enviado sensor CO2
int co2 =0; // Valor de CO2
//Variáveis
char buffer[60];
uint8_t ind =1;
int again = 1;
//Variáveis PPD42
unsigned long starttime;
float conclarge;
unsigned long trigger_On_P1;
unsigned long trigger_Off_P1;
unsigned long duracao_pulso_P1;
unsigned long duracao_P1;
boolean val_P1 = HIGH;
boolean trigger_P1 = false;
unsigned long trigger_On_P2;
unsigned long trigger_Off_P2;
unsigned long duracao_pulso_P2;
unsigned long duration_P2;
boolean val_P2 = HIGH;
boolean trigger_P2 = false;
float ratio_P1 = 0;
float ratio_P2 = 0;
unsigned long sampletime_ms = 30000;
float count_P1;
float count_P2;
int pm10 = 0;
int i= 0;
int flag=0;
boolean ok =false;
float vbat = 0; //Tensao da bacteria
int xbeeSleep=7;

void setup(){
pinMode(3, INPUT);//Canal P1
pinMode(2, INPUT);//Canal P2
Serial.begin(9600);
co2Serial.begin(9600); //Inicia comunicação série
digitalWrite(xbeeSleep,HIGH);//adormece XBee
}

void loop(){
//Verifica o estado dos canais P1 e P2
```



```

trama[22] = acBuf[2];
trama[23] = acBuf[3];
trama[24] = acBuf[4];
trama[25] = acBuf[5];

char acBuf1[6 + 1]; // adiciona 1 para termina\u00e7\u00e3o NULL
sprintf( acBuf1, "%6d", co2 ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[31] = acBuf1[0];
trama[32] = acBuf1[1];
trama[33] = acBuf1[2];
trama[34] = acBuf1[3];
trama[35] = acBuf1[4];
trama[36] = acBuf1[5];
// C\u00e1lculo do checksum
//checksum = 0x32;
for (int i = 3; i < sizeof(trama)-1; i++) {
checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}

trama[37] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento a 2
Serial.write(trama, sizeof(trama)); // Envia a trama pela porta s\u00e9rie
Serial.flush();
Serial.println("");
checksum = 0;
}

void co2_read(){
while(again==1)//caso houve falha na comunica\u00e7\u00e3o s\u00e9rie
{
while(buffer[ind-1] != 0x0A)
{
if(co2Serial.available())
{
buffer[ind] = co2Serial.read();
ind++;
}}
ind=1;
if(buffer[2]=='Z'&&buffer[10]=='z')//Se recebeu dados corretamente
{again=0;}
}
buffer[2]='a';
buffer[10]='a';
again=1;
for(int i=4;i<=8;i++) //Guarda o valor de CO2
{val += buffer[i]; }
co2 = 10*val.toInt(); //M\u00faltiplica pelo fator 10. \u00c9 espec\u00edfico deste sensor
ind=1;
val="";
if(co2<0) {co2=0;}
}

void vbat_read(){
int input =0;
input=analogRead(A6);
vbat = ((input * 1.1)/1023)*4; //valor em mV
}

```

# Anexo L – Programação em linguagem C do módulo de calibração

```
/*
*****
* Nome : modulocalibração.cpp
* Autor : Beto Silva
* Descrição : usado no Arduino Fio para o módulo de calibração
*****
#include <SPI.h> //Biblioteca spi
#include <SD.h> //Biblioteca cartão sd
#include "U8glib.h" //Biblioteca Ecrã NHD
U8GLIB_NHD_C12832 u8g(7, 8, 4, 6, 5); // SPI Com: SCK = 7, MOSI = 8, CS = 4, A0 = 6, RST = 5 Definição pinos ecrã
//Variáveis RTC
const int cs=9; //chip select do RTC
String datetime; //String com a hora e data
String date; //String com a data
//Variáveis sensor CO-B4
int op1 =A1;
int op2 = A2;
float we = 0;
float aux = 0;
float we_zero = 492; //mv
float aux_zero = 334; //mv
float sensitivity = 405; //mv/ppm
float we_we_zero = 0;
float aux_aux_zero = 0;
float we_aux = 0;
float ppm = 0.0;
float ppm_corrected;
//Variável bateria e estado cartão
float bat=0;
int sd_status = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  RTC_init(); // Inicia RTC
  //Acertar hora e data do RTC
  //day(1-31), month(1-12), year(0-99), hour(0-23), minute(0-59), second(0-59)
  //SetTimeDate(22,10,15,13,18,00);
  Serial.println(ReadTimeDate());
  pinMode(10, OUTPUT);
  if (!SD.begin(10)) {Serial.println("initialization failed!");return;}
  Serial.println("initialization done.");}

void loop() {
  File myFile; //Cria objeto cartao
  //Leitura e cálculo do CO
  we = ((analogRead(op1)*3.3)/1023)*2000;
  aux = ((analogRead(op2)*3.3)/1023)*2000;
  we_we_zero = we - we_zero;
  aux_aux_zero = aux - 334;
  ppm = we_we_zero / sensitivity;
  we_aux = we_we_zero - aux_aux_zero;
  ppm_corrected = we_aux / sensitivity;
  bat = (((analogRead(A0)*3.3)/1023)*4.545)+0.60; //Tensão bateria
  //Reconfiguração do SPI para o RTC, é necessário
  SPI.begin();
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  SPI.setDataMode(SPI_MODE1); // mode 1 ou 3 funciona
  ReadTimeDate(); //Lê o RTC
  //Reconfiguração do SPI para o cartão SD, é necessário
  SD.begin(10);
  myFile = SD.open("t.txt", FILE_WRITE);
}
```

```

if (myFile) { //Se abriu corretamente
myFile.print("2,"); //ID sensor
myFile.print(ppm_corrected); //Valor do CO
myFile.print(","); //Separador
myFile.print(bat); //Valor da bateria
myFile.print(","); //Separador
myFile.println(datetime); //data e hora
myFile.close();
sd_status = 1; //indicação de ok do cartão
} else {
sd_status = 0; //se não abriu correctamente, o cartão falhou
}
u8g.firstPage();
do {
draw();
} while( u8g.nextPage() );
delay(1000);
}

void draw(void) {
// exibição no ecrã
u8g.setFont(u8g_font_unifont);
u8g.setPrintPos(0, 10);
u8g.print("CO:");
u8g.setPrintPos(23, 10);
u8g.print(mg_m3);
u8g.setPrintPos(70, 10);
u8g.print("B:");
u8g.setPrintPos(85, 10);
u8g.print(bat);
u8g.setPrintPos(115, 10);
u8g.print("V");
u8g.setPrintPos(0, 25);
u8g.print(date);
u8g.setPrintPos(70, 25);
if(sd_status==1){
u8g.print("SD OK");
}
else{
u8g.print("NO SD");
}
}

int RTC_init(){ //Inicialização do rtc
pinMode(cs,OUTPUT); // chip select:
SPI.begin();// Inicia o protocolo SPI
SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
SPI.setDataMode(SPI_MODE1); // Modo 1 ou 3 funciona
digitalWrite(cs, LOW); //configure o registo de controlo
SPI.transfer(0x8E);
SPI.transfer(0x60);
digitalWrite(cs, HIGH);
delay(10);
}

int SetTimeDate(int d, int mo, int y, int h, int mi, int s){ //Configuração data e hora
int TimeDate [7]={s,mi,h,0,d,mo,y};
for(int i=0; i<=6;i++){
if(i==3)
i++;
int b= TimeDate[i]/10;
int a= TimeDate[i]-b*10;
if(i==2){
if (b==2)
b=B00000010;
else if (b==1)
b=B00000001;
}
TimeDate[i]= a+(b<<4);
digitalWrite(cs, LOW);
}

```

```

SPI.transfer(i+0x80);
SPI.transfer(TimeDate[i]);
digitalWrite(cs, HIGH);
}}
String ReadTimeDate(){//LÊ data e hora
String temp;
datetime = "";
date="";
int TimeDate [7]; //segundo,minutos,hora,null,dia,mês,ano
for(int i=0; i<=6;i++){
if(i==3)
i++;
digitalWrite(cs, LOW);
SPI.transfer(i+0x00);
unsigned int n = SPI.transfer(0x00);
digitalWrite(cs, HIGH);
int a=n & B00001111;
if(i==2){
int b=(n & B00110000)>>4; //formato 24 horas
if(b==B00000010)
b=20;
else if(b==B00000001)
b=10;
TimeDate[i]=a+b;
}
else if(i==4){
int b=(n & B00110000)>>4;
TimeDate[i]=a+b*10;
}
else if(i==5){
int b=(n & B00010000)>>4;
TimeDate[i]=a+b*10;
}
else if(i==6){
int b=(n & B11110000)>>4;
TimeDate[i]=a+b*10;
}
else{
int b=(n & B01110000)>>4;
TimeDate[i]=a+b*10;
}}
datetime.concat(TimeDate[2]);
date.concat(TimeDate[2]);
datetime.concat(",");
date.concat(".");
datetime.concat(TimeDate[1]);
date.concat(TimeDate[1]);
datetime.concat(",");
date.concat(".");
datetime.concat(TimeDate[0]);
date.concat(TimeDate[2]);
datetime.concat(",");
datetime.concat(TimeDate[4]);
datetime.concat(TimeDate[5]);
datetime.concat(TimeDate[6]);
//Serial.println(date);
return(datetime);
}

```

## Anexo M – Alterações feitas à aplicação Java

Seguidamente apresenta-se as alterações efetuadas ao Java uma\_xbee\_parser no NetBeans, no que diz respeito à função que aplica o *time stamp* de acordo com a data e hora armazenada no nó sensor.

De modo a colocar o *time stamp* de acordo com a data e hora existente na mensagem, na classe **Msg\_parser.java** onde se encontra a função **private void calibrateAndSave**. Na figura M.1 apresentam-se as alterações feitas.

```
private void calibrateAndSave(long nodeAddress, String [][] dataMatrix,MySQL db, int msgType){

    if(dataMatrix != null){
        String [] sensorData = new String[7]; // Campos com: Nome Valor Expressão precisão Tabela Data nodeId
        String ts = "";
        try{
            sensorData[6] = getNodeId(db, nodeAddress); // Verifica se o nó com este endereço já foi registado
            // Para cada sensor busca a sua tabela e expressão de calibração e aplica-a
            for(int i=0;i<dataMatrix.length;i++){

                sensorData[0] = dataMatrix[i][0]; // Nome
                sensorData[1] = dataMatrix[i][1]; // Valor

                sensorData = getSensorInfo(db,sensorData); // Busca na base de dados o nome da tabela para este sensor
                if(msgType=="*"){
                    ts = dataMatrix[0][1];
                    sensorData[5] = "2"+"0"+ts.substring(4,6)+"-"+ts.substring(2,4)+"-"+ts.substring(0,2)
                        + " "+ts.substring(6,8)+" "+ts.substring(8,10)+" "+ts.substring(10,12);
                }
                else
                {sensorData[5] = ""+DateUtils.GetCurrentDateTime();}

                // Aplica expressao de calibracao
                if(!(sensorData[2].compareToIgnoreCase("1") == 0 | sensorData[2].compareToIgnoreCase("x")==0 )){
                    ScriptEngineManager mgr = new ScriptEngineManager();
                    ScriptEngine engine = mgr.getEngineByName("JavaScript");
                    String curva = "importPackage (java.lang); "+sensorData[2]; // Carrega expressão

                    engine.put("x", sensorData[1]); // Carrega valor do sensor
                    try{
                        sensorData[1] = ""+ (Double) engine.eval(curva); // Avalia expressao
                    }catch(Exception e){
                        e.printStackTrace();
                    }
                }
                // Arredonda à precisão indicada pela tabela de sensores
                sensorData[1] = Msg_parser.roundValue(sensorData[1],sensorData[3]);

                // regista o novo valor do sensor na tabela respectiva na BD
                saveSensorValue (db,sensorData);

            }
            sensorData = null;
            dataMatrix = null;

        }catch(Exception e){
            e.printStackTrace();
        }
    }
}
```

Figura M.1 – Aplicação do *time stamp* nos parâmetros dos nós sensores móveis na base de dados.

# Anexo N – Código fonte PHP da página Web

```
*****
*****Ficheiro "index.php"*****
*****
<!DOCTYPE html PUBLIC "-//W3C//DTD XHTML 1.0
Strict//EN" "http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-strict.dtd">

<html xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml" lang="en" xml:lang="en">
<head>
<title>Wireless Sensor Networks - by Exact Sciences and Engineering Faculty, University of Madeira</title>
<meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=utf-8" />
<META name="description" content="Results of gathered data from a Wireless Sensor Network implemented by students
of the Exact Sciences and Engineering Faculty of University of Madeira.">
<META name="keywords" content="Publications,CEE,UMa,University,Madeira, Wireless Sensor
Networks,ZigBee,XBee,Sensors">
<link type="text/css" href="calendar/css/smoothness/jquery-ui-1.7.2.custom.css" rel="stylesheet" />
<script type="text/javascript" src="calendar/js/jquery-1.3.2.min.js"></script>
<script type="text/javascript" src="calendar/js/jquery-ui-1.7.2.custom.min.js"></script>
<script type="text/javascript">
$(function){
// Datepicker
$('#datepicker1').datepicker({
inline: true
});
// Datepicker 2
$('#datepicker2').datepicker({
inline: true
});
// Datepicker 3
$('#datepicker3').datepicker({
inline: true
});
// Datepicker 4
$('#datepicker4').datepicker({
inline: true
});
});
</script>
<style>
BODY {
background-color: #DCDDCB;
text-align: left;
font-family: "Century Gothic", Verdana, Arial, sans-serif;
font-size: small;
margin: 0px;
border: 0px solid White;
}
#wrapper {
width:1000px;
background-color: White;
margin-left: auto;
margin-right: auto;
border:10px solid white;
}

#header {
background-color: #219CD5;
margin: 0px;
border: 0px solid gray;
}

#header #title {
color:White;
font-weight:bolder;
text-align:left;
font-size:20px;
}
#header #title a {
color:White;
font-size:small;
font-weight:normal;
font-stretch:condensed;
text-decoration: none;

```

```

font-size:small;
}

#header #title a:hover {
color: #456699;
text-decoration: underline;
}

#navigation {
background-color: #456699;
border-bottom: 4px solid White;
border-top: 4px solid White;
color: white;
font-size: small;
padding: 3px 5px;
text-align: left;
}
</style>
</head>
<body>

<TABLE id="wrapper" align="center" cellpadding="0" cellspacing="0" border="0">
<tr>
<td colspan="2">

<TABLE id="header" width="100%" border="0">
<TR>
<TD>

</TD>
<TD id="title" width="60%">
Redes de Sensores Sem Fios <br /><a href="http://www.uma.pt">UNIVERSIDADE DA MADEIRA</a>
</TD>
<TD id="title">
<a href="mailto:jara@uma.pt" title="Project leader">J. Am&acirc;ndio Azevedo</a><br />
<a href="mailto:betoandrefernandes@gmail.com" title="Developer">Beto Andr e</a><br />
</td>
</TR>
</TABLE>
<TABLE id="navigation" width="100%" border="0" cellpadding="0" cellspacing="0">
<TR>
<td> Project - Urban Ambient Monitoring System using ZigBee </td>
</TR>
</TABLE>
</td>
</tr>
<?php
include('dbinfo.php');
require('mysql4.php');
$dbObject = new sql_db($serverIP, $username, $password, $database, false);

$sensorsList2 = array();
$aQueryResult = $dbObject->sql_query("SELECT * FROM Sensors ORDER BY idSensor ASC;");
while($row = mysql_fetch_array($aQueryResult, MYSQL_ASSOC)){
    $sensorsList2[$row['idSensor']] = $row;
}
$sensorsList = array();
$aQueryResult = $dbObject->sql_query("SELECT Sensors.*,Nodes.name as node, Projects.title FROM Sensors, Nodes, Projects
WHERE Projects.idProject = 10 AND Projects.idProject = Nodes.idProject AND Nodes.idNode = Sensors.idNode ORDER BY
Projects.title ASC, Sensors.friendlyName ASC;");
$projectTitleOld = "";
while($row = mysql_fetch_array($aQueryResult, MYSQL_ASSOC)){
    if($projectTitleOld == $row['title']){
        $sensorsList[$row['title']][$row['idSensor']] = $row; // $sensorsList[$row['idSensor']] = $row;
    }else{
        $sensorsList[$row['title']][$row['idSensor']] = $row;
    }
}
?>
<tr>
<td style="width:45%" valign="top">
<table cellpadding="0" cellspacing="0" border="0" style="width:100%;margin-left: auto; margin-right: auto;">
<tr>
<td valign="top" style="text-align:center;padding-top:10px;">

```



```

        &nbsp;
    </td>
</tr>
</table>

</td>
</tr>
</table>
</td>
</tr>
<tr>
<td style="width:55%;" valign="top">
<table cellpadding="0" cellspacing="0" border="0" style="margin-left: auto; margin-right: auto;">
<tr>
<td valign="top">
<table cellpadding=0 cellspacing=0 border=0>
<tr>
<td>
<?php

    echo '<div align="right">
    <form name="form1" id="form1" action="graph.php" method="get" target="graph">

        Start <input id="datepicker1" type="text" name="data" value="'.date("d-m-Y").'" class="textBox" style="margin-
        bottom:3px;"size="10" style="text-align:center;border:1px solid #606060;" /><br />
        End <input id="datepicker2" type="text" name="enddata" value="'.date("d-m-Y").'" class="textBox" style="margin-
        bottom:3px;"size="10" style="text-align:center;border:1px solid #606060;" />;

    echo '<br />Sensor <br />';
    echo '
    
    
    
    
    <br />;

    echo '<select id="sensor" name="sensor" onchange="submit();" class="textBox" style="margin-bottom:3px;">;

    $sensor = 172;
    if(isset($_POST['sensor'])){
        $sensor = $_POST['sensor'];
    }
    foreach ($sensorsList as $title => $sensorsArray){
        echo '<optgroup label="'.$title.'">;
        foreach ($sensorsArray as $indice => $sensorInfo){
            if($indice == $sensor){
                echo '<option value=".'.$indice.'" selected>'.$sensorInfo['friendlyName'].'</option>;
            }else{
                echo '<option value=".'.$indice.'" >'.$sensorInfo['friendlyName'].'</option>;
            }
        }
        echo '</optgroup>;
    }
}

echo '</select>;

    echo '<br />Values <input type="checkbox" name="excel" value="1" /><br />
    <input type="submit" value="Search >>" style="border:1px solid gray;" class="textBox" />
    </form>
    </div>;

?>

```

```

        </td>
        <td>
            <!-- GRAPH 1 -->
            <iframe height="260" width="410" src="graph.php?sensor=172" name="graph" scrolling=""
frameborder="0"></iframe>
        </td>
    </tr>
</table>
</td>
</tr>
<tr>
<td>
    <table cellpadding=0 cellspacing=0 border=0>
        <tr>
            <td>
                <?php
                echo '<div align="right"><!-- Select the data for graph 1: -->
                <form name="form2" id="form2" action="graph.php" method="get" target="graph2">

                Start <input id="datepicker3" type="text" name="data" value=".date("d-m-Y")."' class="textBox" style="margin-
                bottom:3px;"size="10" style="text-align:center;border:1px solid #606060;" /><br />
                End <input id="datepicker4" type="text" name="enddata" value=".date("d-m-Y")."' class="textBox" style="margin-
                bottom:3px;"size="10" style="text-align:center;border:1px solid #606060;" />;

                echo '<br />Sensor <br />';
                echo '
                
                
                
                
                
                <br />;
                echo '<select id="sensor2" name="sensor2" onchange="submit();" class="textBox" style="margin-bottom:3px;">;

                $sensor = 231;
                if(isset($_POST['sensor']))
                {
                    $sensor = $_POST['sensor'];
                }
                foreach ($sensorsList as $title => $sensorsArray){
                    echo '<optgroup label=".'$title.'">;
                    foreach ($sensorsArray as $indice => $sensorInfo){
                        if($indice == $sensor){
                            echo '<option value=".'$indice.'" selected>'.$sensorInfo['friendlyName'].'</option>;'
                        }else{
                            echo '<option value=".'$indice.'" >'.$sensorInfo['friendlyName'].'</option>;'
                        }
                    }
                    echo '</optgroup>;'
                }
                echo '</select>;

                echo '<br />Values <input type="checkbox" name="excel" value="1" /><br />
                <input type="submit" value="Search >>" style="border:1px solid gray;" class="textBox" />
                </form>
                </div>;

                ?>
            </td>
            <td>
                <!-- GRAPH 2 -->
                <iframe height="260" width="410" src="graph.php?sensor=231" name="graph2" scrolling="" frameborder="0"
></iframe>
            </td>
        </tr>
    </table>
</td>
</tr>

```



```

list($hi,$ii,$si) = explode(':', $hora);
list($he,$ie,$se) = explode(':', $endhora);

$idSensor = $sensorsList[$firstSensorIdFound]['idSensor'];
if(isset($_GET['sensor'])){
    $idSensor = $_GET['sensor'];
}

$tableName = $sensorsList[$idSensor]['tableName'];
$friendlyName = $sensorsList[$idSensor]['friendlyName'];
$unit = array($sensorsList[$idSensor]['unit'],$friendlyName);
$idNode = $sensorsList[$idSensor]['idNode'];

list($d,$m,$Y) = explode("-", $data);
list($de,$me,$Ye) = explode("-", $enddata);

$monthList = array(array('m'=>$m,'Y'=>$Y));
if($me > $m || $Ye > $Y){
    $maux = $m;
    $Yaux = $Y;
    while($Yaux.$maux!=$Ye.$me)
    {
        $maux++;
        if($maux == 13)
        {
            $maux = 1;
            $Yaux++;
        }
        if(strlen($maux)<2)$maux="0".$maux;
        $monthList[] = array('m'=>$maux,'Y'=>$Yaux);
    }
}
elseif(($m > $me) && $Y >=$Ye)
{
    echo "End date is smaller than start date!";
    exit;
}

$diai = $d;
$diaf = $de;

//echo $nomeTabelaDB;exit;
$anoa = $Y;
$mesa = $m;

// Calculo da hora inicial
$horai = date("Y-m-d H:i:s.001",mktime($hi,$ii,$si,$mesa,$diai,$anoa));
$horaiquinze = $horai;
$iH = 0;
$horafquinze = date("Y-m-d H:i:s.001",mktime($he,$ie,$se,$me,$de,$Ye)); //",mktime(23,59,59,$me,$de,$Ye));

// busca tabela da long e lat
$aQueryResult = $dbObject->sql_query("SELECT * FROM Sensors where idNode = '". $idNode. "'");
$tablesList = array();
while($row = mysql_fetch_array($aQueryResult, MYSQL_ASSOC)){
    $tablesList[$row['name']] = $row;
}
$tableLatitude = $tablesList['L'][$tableName];
$tableLongitude = $tablesList['I'][$tableName];

$dataMatrix = array();
$datax = array();

$sql = "SELECT UNIX_TIMESTAMP(t.`timestamp`) as ts, t.*, lg.`value` as lng, lt.`value` as lat
FROM ".$tableName." t, ".$tableLongitude." lg, ".$tableLatitude." lt
WHERE t.`timestamp` BETWEEN '". $horaiquinze.'"
AND '". $horafquinze.'" AND lg.`timestamp` = t.`timestamp` AND lt.`timestamp` = t.`timestamp`
ORDER BY t.`timestamp` ASC";

$aQueryResult = $dbObject->sql_query($sql);

$valor = 0;
$row = array();

```



```

<?php
if ($idSensor == 216) {echo"
if(array[i]['C']>=0 && array[i]['C']<0.49 ) color= 'lightgreen';
    if(array[i]['C']>=5 && array[i]['C']<6.99) color= 'green';
    if(array[i]['C']>=7 && array[i]['C']< 8.49) color= 'yellow';
    if(array[i]['C']>=8.5 && array[i]['C']<9.99) color= 'orange';
    if(array[i]['C']>=10) color= 'red';
";}
if ($idSensor == 217) {echo"
if(array[i]['C']>=0 && array[i]['C']<5 ) color= 'lightgreen';
    if(array[i]['C']>=5 && array[i]['C']<10) color= 'green';
    if(array[i]['C']>=10 && array[i]['C']< 22) color= 'yellow';
    if(array[i]['C']>=22 && array[i]['C']<22.5) color= 'orange';
    if(array[i]['C']>=22.5 && array[i]['C']<22.87) color= 'white';
    if(array[i]['C']>=22.87) color= 'red';
";}

?>
var marker = new google.maps.Marker({
position: {lat: array[i]['L'], lng: array[i]['I']},
map: map,
icon: {
    //path: google.maps.SymbolPath.Marker//
    path: google.maps.SymbolPath.CIRCLE,
    strokeColor: color,
    scale: 2,

},
title: array[i]['C']+ ' mg/m3',
});

};

}
</script>
<script async defer
src="https://maps.googleapis.com/maps/api/js?key=AlzaSyC0DDGSmmrbJdg2fF9wvBc9T_GaqnxFGfk&callback=initM
ap">
</script>
</body>
</html>
*****
*****Ficheiro "upload.php"*****
*****

<?php
$lines_at_once = 10;
$msg = "";
require('mysql4.php');
//require('file.php');
$dbObject = new sql_db('10.1.222.250', 'alunobeto', 'senhabeto', 'wsndatastudents', false);
$target_dir = "uploads/";
$filename = "";
if(isset($_FILES["fileToUpload"])){
$filename = basename($_FILES["fileToUpload"]["name"]);
$target_file = $target_dir . basename($_FILES["fileToUpload"]["name"]);
$uploadOk = 1;
$imageFileType = pathinfo($target_file,PATHINFO_EXTENSION);
// Check if image file is a actual image or fake image
if(isset($_POST["submit"])) {
    $check = getimagesize($_FILES["fileToUpload"]["tmp_name"]);
    if($check !== false) {
        //echo "File is an image - " . $check["mime"] . ". ";
        $uploadOk = 1;
    } else {
        //echo "File is not an image.";
        $uploadOk = 0;
    }
}
$msg = "";
// Check if $uploadOk is set to 0 by an error
if ($uploadOk == 0) {
    echo "Sorry, your file was not uploaded.";
// if everything is ok, try to upload file
} else {
    if (move_uploaded_file($_FILES["fileToUpload"]["tmp_name"], $target_file) {

```



```

}
?>
<html>
<?php
if($msg == ""){
    $msg = "Aguarde ainda est&aacute; a carregar o ficheiro <span style='color:green;'>". $filename. "</span>!";
}
    if(count($lines) > $end){
        echo '<head>
<meta http-equiv="refresh" content="1;url=?start='. $end. '&upload='. $filename. "' />
</head>';
    }else{
        $msg = "Terminado! <a href='file.php'>Voltar</a>";
    }
?>
<body style="font-family:arial;font-size:14px;">
<?php

echo $msg;
$total = $start+count($variaveis_e_valores);
$total = $total*100/count($lines);
echo " Foram introduzidas <span style='color:green;'>.round($total,1)."%</span> tramas de dados!<br />";

?>
</body>
</html>

```