

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Dispositivo remoto para monitorização de VOCs

Luís Manuel Pereira Cardoso

VERSÃO FINAL

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

Orientador: Prof. Hélio Mendes de Sousa Mendonça

Janeiro de 2011

© Luís Manuel Pereira Cardoso, 2011

Resumo

A monitorização de VOCs (*Volatile Organic Compounds*) é actualmente feita em várias áreas. Estes compostos orgânicos voláteis encontram-se vulgarmente em combustíveis, solventes, pesticidas, entre outros, podendo como o nome sugere, libertar-se para a atmosfera e ocasionar problemas de saúde. O objectivo geral deste trabalho é desenvolver um dispositivo portátil capaz de detectar ou mesmo medir as concentrações de gases (VOCs) como o metano, etanol, monóxido de carbono presentes na atmosfera. Os dados recolhidos deverão ser armazenados numa memória local e enviados remotamente por uma infraestrutura de comunicação sem fios *ZigBee*. Já existem no mercado alguns sensores para o efeito, baseando-se em diferentes princípios, sendo pois um dos objectivos deste trabalho a elaboração de um estudo comparativo entre esses vários sensores. Esta comparação deverá focar-se não só a nível da gama e precisão dos gases detectados, mas também nas necessidades energéticas dos sensores, já que a autonomia pretendida para este dispositivo (a ser alimentado por pilhas) é pouco adequada aos níveis de corrente que alguns requerem.

Abstract

Monitoring of VOCs (volatile organic compounds) is now made in several areas. These volatile organic compounds commonly found in fuels, solvents, pesticides, among others, can be released into the air and cause health problems. The aim of this work is to develop a portable device capable of detecting or measuring the concentrations of gases (VOCs) such as methane, ethanol, and carbon monoxide in the atmosphere. The data collected should be stored in a local memory and sent remotely by a ZigBee wireless infrastructure. There are already some sensors on the market for this purpose, based on different principles and is therefore the objective of this work to prepare a comparative study between these various sensors. This comparison should focus not only on the range and accuracy of the detected gas, but also in the power consumption of the sensors, since autonomy desired for this device (to be powered by batteries) is poorly suited to current levels that some require.

Agradecimentos

Queria agradecer a todos aqueles que tornaram este trabalho possível. A toda a comunidade da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, especialmente ao meu orientador, professor Hélio Mendonça, por todo o apoio e incentivo dado ao longo deste tempo e à professora Gabriela Ventura, pela sua disponibilidade e tempo dispendido. Aos meus amigos Tiago Mendes, André Leite, Samuel Costa, Bruno Oliveira, André Reis e Rosário Santos por toda a confiança, amizade e ajuda prestada ao longo deste percurso académico. À minha família, que sempre confiou nas minhas decisões e sem a qual nunca chegaria a este ponto. Por último, um especial agradecimento à minha namorada, Bebiana Lopes, por toda a compreensão, ajuda e palavras de incentivo e confiança.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - VOCs.....	1
1.2 - Motivação e objectivos	2
1.3 - Descrição do sistema	2
1.4 - Estado da Arte.....	2
1.5 - Estrutura do Documento.....	4
Capítulo 2	5
Sensores de VOCs	5
2.1 - Tecnologias existentes.....	5
2.1.1 - Metal Oxide Semiconductor (MOS).....	5
2.1.1.1 - Princípio Químico.....	6
2.1.1.2 - Princípio de funcionamento	6
2.1.1.3 - Curva de Resposta ao CO.....	7
2.1.2 - Sensores de efeito de campo (FE)	7
2.1.2.1 - Princípio Químico.....	8
2.1.2.2 - Princípio de Funcionamento.....	8
2.1.2.3 - Curva de Resposta Típica	9
2.1.2.4 - Aspectos Importantes.....	9
2.1.3 - Quartz Microbalance (QMB)	9
2.1.3.1 - Princípio Químico.....	10
2.1.3.2 - Princípio de Funcionamento	10
2.1.4 - Photoionization Detector (PID)	10
2.1.4.1 - Princípio de Funcionamento.....	11
2.2 - Estudo de mercado	12
2.3 - Comparação entre sensores e escolha	12

Capítulo 3	15
Tecnologias de Comunicação sem Fios.....	15
3.1 - Tecnologias sem fios de baixo consumo existentes.....	15
3.1.1 - Dash7.....	15
3.1.2 - Miwi	16
3.1.3 - Z-Wave.....	16
3.1.4 - ZigBee	16
3.1.5 - Bluetooth.....	16
3.2 - Comparação entre tecnologias	17
3.3 - Motivo da escolha.....	17
3.4 - Descrição da tecnologia usada ZigBee	18
3.4.1 - Principais Características Técnicas	18
3.4.2 - Arquitectura	18
3.4.3 - Tipos de Dispositivos Presentes na Rede	20
3.4.4 - Topologias de Rede.....	22
3.4.5 - Formato das Tramas de Dados.....	22
3.4.5.1 - Trama de Beacons.....	23
3.4.5.2 - Trama de Dados	24
3.4.5.3 - Trama de Reconhecimento de Dados	25
3.4.5.4 - Trama de Comandos MAC	25
3.4.6 - Super Trama	26
3.4.7 - Segurança	27
Capítulo 4	31
Apresentação do Sistema.....	31
4.1 - Descrição da arquitectura do sistema.....	31
4.2 - Descrição do hardware usado	32
4.2.1 - Microcontrolador Usado	32
4.2.1.1 - Estudo de Mercado	32
4.2.1.2 - RC2300AT	33
4.2.2 - Sensores usados	37
4.2.3 - Outros componentes	38
4.2.4 - Coordenador	39
4.2.5 - Dispositivo portátil	42
4.2.6 - PCB de acoplamento dos Sensores.....	44
4.3 - Descrição do Software/Firmware desenvolvido	44
4.3.1 - Desenvolvimento do Firmware	44
4.3.1.1 - Coordenador.....	47
4.3.1.2 - Dispositivo portátil	49
4.3.1.3 - Software para o Computador.....	53
Capítulo 5	59
Resultados	59
5.1 - Descrição dos Testes	59
5.2 - Dados e Resultados Obtidos Durante os Testes.....	60
5.2.1 - Primeira fase de testes	61
5.2.1.1 - Sensor TGS2602.....	61
5.2.1.2 - Sensor TGS2620.....	64
5.2.1.3 - Conclusão	66
5.2.2 - Segunda Fase de Testes	67
5.2.2.1 - Gray Wolf TG-502	68
5.2.2.2 - Tenax	68
5.2.2.3 - Primeiro Dia	69
5.2.2.4 - Segundo Dia	71
5.2.2.5 - Terceiro Dia	74
5.2.2.6 - Quarto Dia	78
5.2.3 - Conclusão	81
5.3 - Estudo do consumo energético.....	84

5.4 - Teste de alcance	85
5.5 - Interferências com redes IEEE802.11.....	86
Capítulo 6	89
Conclusão e Trabalho Futuro	89
6.1 - Trabalho Futuro	91
Anexo A.....	93
PCBs	93
A.1 - PCB do módulo Coordenador	93
A.2 - PCB do dispositivo portátil	94
A.3 - PCB de acoplamento dos sensores	94
Referências	95

Lista de figuras

Figura 2.1 - Esquema eléctrico de um sensor MOS [30]	6
Figura 2.2 - Resposta de um sensor MOS ao CO [30].....	7
Figura 2.3 - Curva de resposta típica de um sensor Si-MOSFET ao amoníaco [30]	9
Figura 2.4 - Esquema de um sensor QMB demonstrando o princípio de detecção [30]	10
Figura 2.5 - Configuração típica de um sensor PID [29]	11
Figura 2.6 - Sensor TGS2602 da <i>Figaro</i>	13
Figura 2.7 - Sensor TGS 2620 da <i>Figaro</i>	14
Figura 3.1 - Divisão por Camadas IEEE 802.15.4 e <i>ZigBee</i> [25]	19
Figura 3.2 - Tipos de dispositivos em redes <i>ZigBee</i> [25]	21
Figura 3.3 - Topologias de rede <i>ZigBee</i> [25]	22
Figura 3.4 - Formato da Trama de <i>Beacons</i> [26]	24
Figura 3.5 - Formato da Trama de Dados [26]	25
Figura 3.6 - Formato da Trama de Reconhecimento de Dados [26].....	25
Figura 3.7 - Formato da Trama de Comandos MAC [26].....	26
Figura 3.8 - Formato das super tramas [26].....	27
Figura 3.9 - Trama protegida [24]	28
Figura 3.10 - Trama protegida 2 [24].....	29
Figura 4.1 - Arquitectura do Sistema.....	31
Figura 4.2 - Diagrama de blocos do CC2430 [5]	34
Figura 4.3 - Disposição dos pinos do RC2300AT [22].....	35
Figura 4.4 - Área restrita a materiais condutores [22]	37
Figura 4.5 - PCB de acoplamento do RC2300AT	37

Figura 4.6 - TUSB3410 [11]	38
Figura 4.7 - Esquema eléctrico da montagem do TUSB3410	39
Figura 4.8 - Módulo Coordenador	40
Figura 4.9 - Esquema eléctrico do módulo Coordenador	41
Figura 4.10 - Dispositivo portátil e PCB de acoplamento dos sensores	42
Figura 4.11 - Esquema eléctrico do módulo End Device	43
Figura 4.12 - Esquema eléctrico do PCB de acoplamento dos sensores.....	44
Figura 4.13 - Arquitectura do software de um dispositivo <i>ZigBee</i> [18]	45
Figura 4.14 - Diagrama de funcionamento do módulo Coordenador.....	47
Figura 4.15 - Modo de funcionamento do dispositivo portátil	50
Figura 4.16 - Ecrã inicial do software para PC	54
Figura 4.17 - File menu	54
Figura 4.18 - Menu de selecção de comandos a enviar	55
Figura 4.19 - Separador <i>Preferences</i>	56
Figura 4.20 - Botão “Apply” e respectivo indicador de sucesso	56
Figura 4.21 - Caminho de dados.....	57
Figura 5.1 - Câmara de testes	60
Figura 5.2 - Resultados Teste nº1 Sensor TGS2602 nº1.....	61
Figura 5.3 - Startup do Sensor TGS2602 nº1	62
Figura 5.4 - Resultados Teste nº1 Sensor TGS2602 nº2.....	63
Figura 5.5 - Startup do Sensor TGS2602 nº1	64
Figura 5.6 - Resultados Teste nº1 Sensor TGS2620 nº1.....	65
Figura 5.7 - Resultados Teste nº1 Sensor TGS2620 nº2.....	66
Figura 5.8 - Dispositivo Gray Wolf TG-502 [20].....	68
Figura 5.9 - TGS2602 nº1 Câmara em Branco	69
Figura 5.10 - TGS2602 nº2 Câmara em Branco	70
Figura 5.11 - TGS2620 nº1 Câmara em Branco	70
Figura 5.12 - TGS2620 nº2 Câmara em Branco	71
Figura 5.13 - TGS2602 nº1 Tolueno	72
Figura 5.14 - TGS2602 nº2 Tolueno	72

Figura 5.15 - TGS2620 nº1 Tolueno	73
Figura 5.16 - TGS2620 nº2 Tolueno	73
Figura 5.17 - TGS2602 nº1 Tolueno e Xileno	75
Figura 5.18 - TGS2602 nº2 Tolueno e Xileno	75
Figura 5.19 - TGS2620 nº1 Tolueno e Xileno	76
Figura 5.20 - TGS2620 nº2 Tolueno e Xileno	76
Figura 5.21 - TGS2602 nº1 Tolueno, Xileno e Octano.....	78
Figura 5.22 - TGS2602 nº2 Tolueno, Xileno e Octano.....	79
Figura 5.23 - TGS2620 nº1 Tolueno, Xileno e Octano.....	79
Figura 5.24 - TGS2620 nº2 Tolueno, Xileno e Octano.....	80
Figura 5.25 - Evolução dos sensores ao longo dos dias	82
Figura 5.26 - Frequência de operação dos canais IEEE802.11 e IEEE802.15.4 [21]	87
Figura A.1 - PCB do módulo Coordenador	93
Figura A.2 - PCB do dispositivo portátil	94
Figura A.3 - PCB de acoplamento dos sensores.....	94

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Comparação de Sensores de VOCs	12
Tabela 3.1 - Características das diferentes redes sem fios	17
Tabela 4.1 - Microcontroladores	32
Tabela 4.2 - Características Técnicas do RC2300AT	35
Tabela 4.3 - Descrições dos pinos do RC2300AT	36
Tabela 5.1 - Comparação de resultados ao fim do terceiro dia	77
Tabela 5.2 - Comparação de resultados ao fim do terceiro dia	81
Tabela 5.3 - Consumo energético	84
Tabela 5.4 - Duração aproximada de uma bateria 9V, 150mAh	84
Tabela 5.5 - Duração do conjunto de 4 baterias AA, 1200mAh	85
Tabela 5.6 - Resultados do teste de alcance nº 1	86
Tabela 5.7 - Resultados do teste de alcance nº 2	86
Tabela 5.8 - Resultados do teste da interferência de redes IEEE802.11.	87

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
CAP	<i>Contention Access Period</i>
CBC	<i>Cipher Block Chaining</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CFP	<i>Contention Free Period</i>
CO	Monóxido de Carbono
SoC	<i>System on Chip</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CTR	Contador
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ED	<i>Energy Detector</i>
FE	<i>Field Effect</i>
FFD	<i>Full Function Devices</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slot</i>
HR	Humidade Relativa
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
JTAG	<i>Joint Test Action Group</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LQI	<i>Link Quality Indicator</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MOS	<i>Metal Oxide Semiconductor</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PC	Computador Pessoal
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>

PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PID	<i>Photoionization Detector</i>
QMB	<i>Quartz Microbalance</i>
RFD	<i>Reduced Function Devices</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SSP	<i>Security Services Provider</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VOCs	<i>Volatile Organic Compounds</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>

Lista de símbolos

bps	Bits por segundo
°C	Graus Centígrados
dm ³	Decímetro cúbico
GHz	Giga Hertz
h	Horas
I	Intensidade de corrente
Kbit/s	Kilo bits por segundo
m	metros
mA	miliampere
min	minutos
MHz	Mega Hertz
ml	mililitro
ms	milissegundos
mV	mili Volts
mW	mili Watts
ppb	partes por bilhão
ppm	partes por milhão
R	Resistência
μm	micrómetro
V	Volt

Capítulo 1

Introdução

É fundamental prevenir e reduzir os efeitos directos e indirectos das emissões de compostos orgânicos voláteis para o ambiente, com o intuito de salvaguardar o direito do homem a um ambiente saudável e isento de potenciais riscos para a saúde. Pelo que, é facilmente entendida a necessidade de monitorização contínua destes compostos em instalações de fabrico de produtos químicos voláteis, calçado, produtos farmacêuticos, revestimentos, vernizes, tintas e adesivos, além de actividades que envolvam limpezas a seco. Em virtude da diversidade de factores de risco para a saúde humana deste tipo de indústrias e actividades, e uma vez que a relação do Homem com o Ambiente não é passiva, torna-se imperativo investir em medidas que permitam monitorizar e melhorar a qualidade do ar interior, diminuindo, desta forma, a exposição ocupacional a factores nocivos à saúde do homem.

1.1 - VOCs

Volatile Organic Compounds (VOCs) [12] são um grupo de substâncias químicas que inclui várias classes de compostos, tais como hidrocarbonetos aromáticos, alifáticos, halogenados, aldeídos, cetonas e álcoois. Estas substâncias são amplamente utilizadas em diversos sectores industriais e fazem parte da composição de vários produtos de consumo, como refrigerantes, cosméticos, aerossóis, tintas, combustíveis e pesticidas. Este grupo de substâncias constitui uma importante classe de poluentes, podendo ser encontrados na atmosfera e em ambientes confinados, sendo nestes últimos os lugares mais comuns de os encontrar.

Estes compostos apresentam efeitos nocivos tanto para a atmosfera como para a saúde humana, daí ser importante a sua monitorização. Para isso, existe a necessidade de serem desenvolvidos dispositivos capazes de efectuar medições contínuas e em tempo real.

1.2 - Motivação e objectivos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito da Dissertação intitulando-se “Dispositivo remoto para monitorização de VOCs” e tem como objectivo, o desenvolvimento de um dispositivo portátil capaz de fazer medições em tempo real de VOCs.

Este é um tema que sempre suscitou interesse devido à crescente preocupação com o meio ambiente e saúde humana. Assim sendo, pretende-se desenvolver uma ferramenta funcional, capaz de monitorizar e avaliar a qualidade do ar, recorrendo à medição da concentração de VOCs presentes na atmosfera em análise.

1.3 - Descrição do sistema

Pretende-se desenvolver um sistema capaz de ser operado e configurado remotamente através de um protocolo de comunicação sem fios, que efectue a monitorização de VOCs em tempo real. O dispositivo deverá ser portátil e a sua alimentação feita por simples baterias que se encontrem facilmente à venda em qualquer superfície comercial para garantir o máximo de portabilidade do dispositivo. Para além de possibilitar o controlo remoto, este deverá permitir um controlo local através do mesmo. O armazenamento de informação de leituras efectuadas em memória, para posterior tratamento, será de extrema importância uma vez que nem sempre será possível o tratamento dos dados no local, principalmente quando se operar o dispositivo localmente sem disponibilidade de qualquer tipo de material informático e de análise de dados.

O dispositivo portátil irá comunicar, através da sua ligação sem fios, com uma central que estará ligada a um computador, através de uma ligação com fios USB, e que irá funcionar como uma ponte de comunicação entre o computador e o dispositivo portátil.

Para complementar o sistema, irá ser desenvolvida uma aplicação para computador para análise e tratamento de dados recolhidos pelos sensores.

Todo o sistema deverá ser de simples integração e utilização. Pretende-se ainda que o mesmo tenha boa capacidade de utilização em diferentes meios e diferentes aplicações.

Para isso irá ser feito um estudo aprofundado sobre as tecnologias viáveis de utilização bem como hardware. O estudo irá ter em conta que o dispositivo deverá ser portátil e alimentado a baterias. Assim sendo, um aspecto de grande relevo será o consumo energético de microcontroladores, tecnologias de comunicação sem fios e sensores a serem utilizados na concepção do dispositivo móvel.

1.4 - Estado da Arte

Actualmente a monitorização de VOCs já é frequentemente efectuada em vários locais. A crescente preocupação com o ambiente obriga a serem tomadas medidas de

contenção de emissões de poluentes para atmosfera, monitorizando e avaliando as quantidades emitidas diariamente. A monitorização de VOCs é de grande importância, pois estes gases são altamente tóxicos e prejudiciais à saúde humana. A acumulação de VOCs é de principal preocupação em ambientes fechados pois são onde estes gases têm tendência em se depositar. Por exemplo na indústria química é de extrema importância a monitorização destes gases nas instalações de uma fábrica. Para isso são necessários instrumentos de medida e detecção. Actualmente existe no mercado uma vasta gama de instrumentos de detecção e medição de concentrações de gases VOCs. Existem dispositivos de monitorização fixa e mesmo portátil de algumas empresas especialistas em monitorização de gases. Empresas como a *Ion Science* [1], *GrayWolf* [4], *RAE Systems* [3], já disponibilizam vários dispositivos móveis e alguns deles já com comunicação sem fios integrada para comunicação e transferência de dados.

A *Ion Science* possui uma gama de produtos específicos para a monitorização de VOCs, todos eles baseados em sensores do tipo PID (*Photoionization Detector*). Esta empresa oferece soluções tanto fixas como móveis, mas concentra-se com maior particularidade nas soluções móveis. Essas soluções possuem uma boa capacidade de transporte, autonomias até 30 horas, memória interna para armazenamento de dados, e comunicação com o PC através de USB. A gama de concentração que estas soluções conseguem detectar varia entre 1ppb e 20.000ppm.

Por outro lado a *GrayWolf*, apresenta apenas uma solução de monitorização portátil, sendo também baseada em sensores do tipo PID. Esta solução, para funcionar, necessita de estar ligada permanentemente a um PDA ou PC através de uma ligação com fios, o que torna a sua portabilidade e comodidade um pouco mais reduzida em relação a outras soluções oferecidas por outras empresas. De destacar a sua autonomia que pode chegar às 120 horas, e a sua gama de concentração, que consegue detectar, varia entre 0.005 e 20.000ppm.

A *RAE Systems* já oferece soluções portáteis com comunicação sem fios, sendo estas também baseadas em sensores do tipo PID. Algumas destas soluções já têm a funcionalidade de controlo remoto usando a sua ligação sem fios, mas para isso terá de ser adquirido à parte o software para o computador, pois sem o último esta funcionalidade não será de possível utilização. Estas características aumentam assim a sua comodidade e portabilidade em relação às soluções apresentadas pelas empresas mencionadas anteriormente. Estas soluções possuem também memória interna para armazenamento de dados. Em contrapartida as autonomias apresentadas são um pouco mais baixas rondando as 16 horas. Também a gama de concentrações que os seus produtos portáteis apresentam varia entre 0 a 15.000ppm, o que se revela um pouco inferior do que as soluções anteriormente referidas.

Mas a grande maioria destes dispositivos têm algumas limitações. Alguns destes dispositivos são volumosos, pesados e as suas autonomias nem sempre são as melhores. Assim conclui-se que existe ainda uma lacuna por preencher no mercado de dispositivos económicos

de detecção portátil de VOCs. Pretende-se criar um dispositivo o mais portátil possível, que seja capaz de medir concentrações de VOCs presentes no local em análise, e que este tenha uma boa autonomia. Pretende-se ainda que este possa ser ligado via comunicação sem fios a uma pequena central transferindo os dados recolhidos e armazenados em memória local, para que estes possam ser futuramente tratados.

Será de extrema importância a implementação do controlo remoto e à distância no dispositivo portátil, aumentando desta maneira a sua capacidade de integração em diferentes aplicações como por exemplo, em locais de difícil acesso ou de extrema contaminação e nocivos para a saúde humana. Colmata-se desta forma uma lacuna ainda não muito explorada pelo mercado de soluções portáteis de sistemas de monitorização de gases.

1.5 - Estrutura do Documento

Este documento encontra-se dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo é feita uma breve introdução, o estudo da arte, uma descrição dos que são os VOCs e a descrição do sistema.

No segundo capítulo é feito um estudo sobre as diferentes tecnologias de sensores para a detecção de gases pertencentes à família dos VOCs, um estudo do mercado de sensores das várias tecnologias e finalmente a escolha dos sensores bem como o motivo que levou a essa mesma escolha.

No terceiro capítulo encontra-se um estudo sobre as tecnologias sem fios de baixo débito e consumo, a apresentação e análise pormenorizada da tecnologia escolhida bem como o motivo da sua escolha.

No quarto capítulo é apresentado o hardware escolhido e criado, bem como o *firmware* desenvolvido. É ainda descrito e apresentado o *software* para PC elaborado.

No quinto capítulo são apresentados e estudados os resultados obtidos durante as fases de testes, às quais o sistema desenvolvido foi sujeito.

Por último, no sexto capítulo, são feitas as conclusões gerais do trabalho e as propostas para o possível trabalho futuro a desenvolver para o sistema desenvolvido.

Capítulo 2

Sensores de VOCs

Existem, hoje em dia, diferentes sensores de VOCs baseados em diferentes tecnologias e princípios. De seguida é feita uma referência e uma análise às tecnologias e princípios mais comuns da actualidade, bem como as razões para as escolhas feitas.

2.1 - Tecnologias existentes

2.1.1 - Metal Oxide Semiconductor (MOS)

Actualmente é a tecnologia mais usada e consiste na variação da resistência de uma camada de óxido de metal, quando induzida à interacção de gases do ambiente. O sensor responde às mudanças na composição da atmosfera ambiente com uma mudança na resistência da camada de detecção. Um grande número de substâncias tóxicas e gases explosivos podem ser detectados, mesmo em concentrações muito baixas.

Os sensores MOS detectam uma vasta gama de gases, incluindo CO, NO₂, NH₃, H₂S, CH₄, e uma grande variedade de compostos orgânicos voláteis (VOCs). Estes sensores livres de manutenção possuem alta sensibilidade, boa estabilidade, vida longa, e um curto tempo de resposta ou recuperação. Estes sensores podem operar dentro de uma larga gama de temperatura (-40°C a 70°C) e de humidade (0 a 100%) sem condensação.

2.1.1.1 - Princípio Químico

A camada de detecção é constituída por um filme poroso de Dióxido de Estanho (SnO_2) poli cristalino. Na atmosfera ambiente normal, as espécies de oxigénio e vapor de água são absorvidos pela superfície de SnO_2 . A detecção de gases ocorre da seguinte forma:

Para reduzir os gases como o Monóxido de Carbono (CO) e Hidrogénio (H_2), ocorre uma reacção entre o pré-absorvido oxigénio e vapor de água, diminuindo a resistência do sensor. Para os gases oxidantes, tais como NO_2 e O_3 , a resistência aumenta.

A magnitude das mudanças dos valores da resistência, depende da microestrutura e composição ou dopagem do material base, da morfologia e características geométricas da camada de detecção, bem como da temperatura em que a detecção ocorre. As alterações destes parâmetros permitem o ajuste da sensibilidade para diferentes gases ou classes de gases.

2.1.1.2 - Princípio de funcionamento

As alterações na composição da atmosfera ambiente irão determinar as alterações da resistência da camada de detecção. Na prática a relação entre a resistência do sensor e a concentração do gás alvo normalmente segue a lei da potência. Através de uma vasta gama de concentrações, esta pode ser descrita da seguinte forma:

$$R \cong K * c^{\mp n} \quad (2.1)$$

Em que:

- “c” é a concentração do gás alvo;
- “K” é uma constante de medida;
- “n” tem valores entre 0.3 e 0.8 (+ para gases oxidantes e - para gases redutores)

A figura seguinte apresenta um esquema eléctrico básico que pode ser encontrado num sensor MOS:

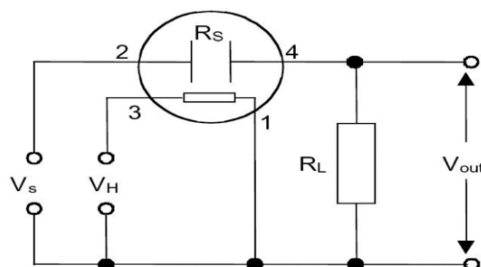


Figura 2.1 - Esquema eléctrico de um sensor MOS [30]

- A tensão de aquecimento V_H é aplicada entre 1 e 3 e tipicamente varia entre 2 e 5V.
- A tensão de medida é aplicada entre 2 e 4 e é recomendado que esta não exceda os 5V.
- Para a determinação de R_S , V_{out} é medido e R_L é conhecido.

A relação entre R_S e V_{out} é:

$$R_S = R_L \left(\frac{V_S}{V_{out}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

2.1.1.3 - Curva de Resposta ao CO

A figura abaixo mostra o comportamento típico de um sensor MOS quando exposto a uma série de impulsos de Monóxido de Carbono (CO). A resistência do sensor cai rapidamente depois da exposição ao CO e depois da remoção do CO da atmosfera ambiente, a resistência do sensor recupera o seu valor original num curto espaço de tempo. A velocidade de resposta e recuperação irá variar de acordo com a temperatura de operação, tipo de camada de detecção e gases envolvidos.

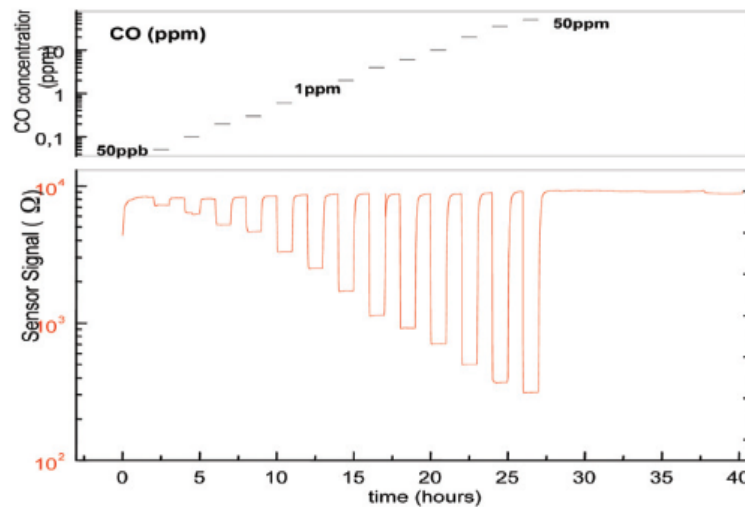


Figura 2.2 - Resposta de um sensor MOS ao CO [30]

2.1.2 - Sensores de efeito de campo (FE)

Este tipo de sensor tem por base a variação da tensão da Porta de um transistor MOSFET quando exposto a um gás para teste. A escolha da temperatura de operação, tipo de metal da Porta, e a estrutura do metal da Porta, determinam a selectividade da reacção do gás.

Para dispositivos baseados em Silício (Si), como o Si-MOSFET, a temperatura de funcionamento varia entre 150 e 200° C. Para dispositivos baseados em Carbeto de Silício (SiC), como o SiC-MOSFET, a temperatura de funcionamento varia entre 200 e 600° C.

2.1.2.1 - Princípio Químico

Num sensor FE, a interacção de gases com a Porta de metal catalítico induz dipolos ou cargas, que originam uma tensão adicional ao contacto da Porta. A escolha da temperatura de funcionamento, o tipo de metal catalítico e a estrutura do metal, influenciam as reacções químicas na porta do sensor, e assim, a selectividade e sensibilidade do sensor. O uso de SiC em vez de semicondutores de silício torna possível usar sensores FE em temperaturas elevadas. Isto permite tempos de resposta na ordem de milissegundos devido às rápidas reacções químicas. Além disso, o metal catalítico permanece limpo, mesmo em ambientes altamente contaminados.

2.1.2.2 - Princípio de Funcionamento

Um sensor MOSFET é baseado num transístor de efeito de campo com um contacto de metal catalítico na Porta. A tensão da Porta controla a corrente através do dispositivo MOSFET. As moléculas de gás afectam a tensão no contacto da Porta e alteram assim a corrente que atravessa o transístor. O Dreno e a Porta do transístor estão ligados ficando este a operar como um dispositivo de dois terminais. A tensão (à volta de 2V) com uma corrente constante (100mA) é registada. A resposta do gás é registada quando a tensão se altera no sinal do sensor.

2.1.2.3 - Curva de Resposta Típica

A figura abaixo representa a curva de resposta típica de um sensor Si-MOSFET ao Amoníaco (NH_3).

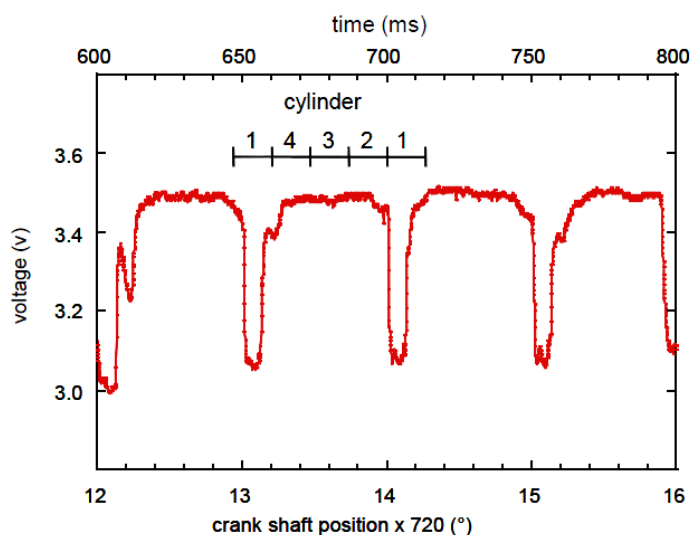


Figura 2.3 - Curva de resposta típica de um sensor Si-MOSFET ao amoníaco [30]

À temperatura de funcionamento de 600°C , o sinal de um dispositivo SiC-MOSFET é rápido o suficiente para seguir as variações da razão ar/combustível de cilindros individuais medindo os gases de escape do coletor de um carro.

2.1.2.4 - Aspectos Importantes

Os sensores FE respondem a gases como o hidrogénio, amoníaco, aminas, etanol, acetona, hidrocarbonetos, CO e NO_2 . A sensibilidade dos sensores é normalmente alta para baixas concentrações de gases, enquanto este fica saturado para altas concentrações de gases. A temperatura de funcionamento varia entre 100 e 200°C para sensores FE baseados em Si e 200 a 300°C para sensores FE baseados em SiC. O SiC é um material quimicamente muito inerte e é um semicondutor mesmo a altas temperaturas. Os sensores FE baseados em SiC podem resistir a ambientes corrosivos.

2.1.3 - Quartz Microbalance (QMB)

Microbalanças de quartzo (QMB) são sensores que medem a frequência de uma vasta gama de polímeros usados como materiais de revestimento. Cristais de quartzo revestidos de polímeros são influenciados pela absorção de moléculas com VOCs. Diferentes modos de revestimento produzem padrões de respostas distintas em moléculas orgânicas. Usando

diferentes polímeros de revestimento, a sensibilidade e a selectividade dos sensores QMB podem variar e atender a múltiplas aplicações.

2.1.3.1 - Princípio Químico

A absorção de moléculas com VOCs aumenta a massa do cristal de quartzo, resultando num decréscimo da frequência de ressonância. O processo de absorção é inteiramente reversível. Uma vez que são usadas camadas muito finas, o processo de difusão limitado é muito rápido (na ordem de milissegundos).

Seleccionando diferentes revestimentos de polímeros, os sensores QMB podem ser sensibilizados para propriedades moleculares particulares, tais como polaridade, polarizabilidade, forma e volume.

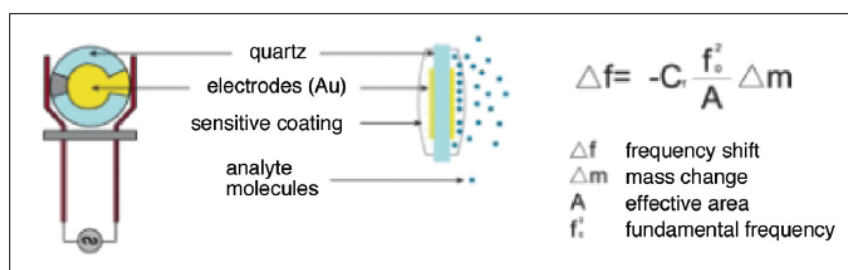


Figura 2.4 - Esquema de um sensor QMB demonstrando o princípio de detecção [30]

A frequência de oscilação do cristal de quartzo diminui quando as moléculas são absorvidas na camada de revestimento sensível.

2.1.3.2 - Princípio de Funcionamento

Um sensor QMB consiste num cristal de quartzo revestido com uma fina camada de polímero. A espessura da camada é tipicamente abaixo de 1µm e a frequência de ressonância é tipicamente 16 MHz ou 30 MHz. A frequência de ressonância é influenciada pela massa do polímero de revestimento, pela sua propriedade viscoelástica e pela temperatura ambiente.

2.1.4 - Photoionization Detector (PID)

O sensor PID detecta uma vasta variedade de VOCs e alguns gases inorgânicos no ar. Um composto pode ou não ser detectado por um PID dependendo da energia da lâmpada e da energia necessária para remover um electrão de uma molécula do composto em análise. Se a energia da lâmpada for maior que o potencial de ionização do composto, o PID irá detectá-lo.

Devido à sua sensibilidade, um PID não é recomendado para altas concentrações de gases para análise. No entanto, um PID não necessita de oxigénio para funcionar o que o torna numa boa escolha para ambientes onde os níveis de oxigénio são imprevisíveis. Um PID reage também a um número de substâncias inorgânicas, incluindo amoníaco, carbono dissulfeto de carbono, tetracloreto de carbono, clorofórmio, etilamina, formaldeído e de sulfeto de hidrogénio.

No entanto este apresenta algumas limitações. Um sensor PID pode efectuar falsas leituras do vapor de água. A chuva também afecta a performance. A elevada humidade pode embaciar a lâmpada, diminuindo a sensibilidade. Concentrações elevadas de metano podem também afectar o desempenho. Variações bruscas de temperatura e campos eléctricos fortes podem também afectar o desempenho do sensor. O sensor tem que ser frequentemente calibrado.

2.1.4.1 - Princípio de Funcionamento

O sensor encontra-se dentro de uma sonda e consiste numa fonte de luz ultra violeta selada, que emite fotões com um certo nível de energia suficientemente alto para ionizar vestígios orgânicos, mas não o suficiente para ionizar os principais compostos do ar como o oxigénio e o dióxido de carbono. A câmara de ionização exposta à fonte de luz, contém um par de eléctrodos, um dos quais ligado a uma fonte de alta tensão de corrente contínua e o outro (colector) ligado a um amplificador de sinal sendo aí onde vão ser adquiridas as medições. Quando uma tensão positiva é aplicada ao primeiro eléctrodo, um campo electromagnético é criado dentro da câmara. Os iões formados pela absorção dos fotões são guiados para o eléctrodo colector. A corrente produzida é depois medida e a concentração correspondente obtida desta forma.

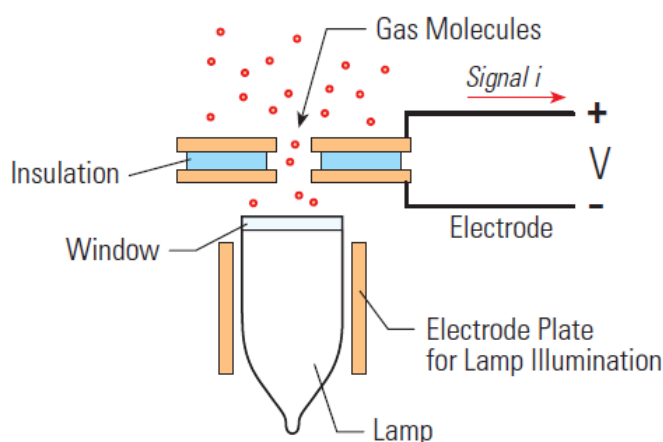


Figura 2.5 - Configuração típica de um sensor PID [29]

2.2 - Estudo de mercado

Pelo estudo efectuado, a oferta no mercado de sensores de VOCs não é alta. Ainda assim foram encontradas vários modelos de sensores de VOCs, de vários fabricantes, capazes de serem usados no dispositivo portátil. Os fabricantes encontrados foram os seguintes:

- AppliedSensor [13];
- Ogam Technology [15];
- Synkera Technologies, Inc [16];
- Figaro USA, Inc. [14].

Todos estes fabricantes produzem sensores do tipo MOS uma vez que, após a conclusão do estudo sobre sensores e respectivas tecnologias, reparou-se que os sensores que mais facilmente se encontram no mercado são do tipo MOS e que foi praticamente nula a existência no mercado de sensores de outra tecnologia, para integração no sistema a desenvolver. Apenas foram encontradas soluções que possuíam sensores de outras tecnologias já integradas.

Sendo assim, focaram-se os sensores que se sabiam que a sua aquisição não iria levantar tantas dificuldades. Daí a pesquisa de sensores ter recaído sobre sensores MOS uma vez que, estes são os mais utilizados na actualidade e mais fáceis de encontrar.

2.3 - Comparação entre sensores e escolha

De seguida vai ser apresentada uma tabela comparativa dos sensores de VOCs disponibilizados pelas empresas encontradas no decorrer do estudo de mercado.

Tabela 2.1 - Comparação de Sensores de VOCs

Sensor	Fabricante	Potência Consumida	Tensão de Alimentação	Temperatura de funcionamento
AS-MLV	AppliedSensor	40mW	2.7V	-40° a 120°C
GSBT11	Ogam Technology	420mW	<12V	-10° a 60°C
P/N 707	Synkera Technologies, Inc	400mW	5V	-
TGS2602	Figaro USA, Inc	210mW	5V	20°C
TGS2620	Figaro USA, Inc	210mW	5V	20°C

A escolha do sensor a usar deverá ter como principal condicionante o seu consumo energético uma vez que se pretende maximizar a autonomia do dispositivo móvel.

Depois de várias tentativas de contacto com as várias empresas surgiram alguns problemas para a aquisição de sensores de alguns fabricantes. Como se pode verificar na tabela acima o sensor da *AppliedSensor* é o sensor que menos energia consome. Logo a sua escolha para implementação no dispositivo móvel era a mais indicada. Mas as dificuldades no contacto com a empresa e a forma de aquisição dos sensores tornaram a implementação dos mesmos, inviável. Assim sendo, houve a necessidade de entrar em contacto com outras empresas e a que se mostrou mais prestável foi a *Figaro* uma vez que, esta empresa possui um representante em Portugal, tornando a aquisição dos sensores mais fácil e conveniente. Logo como se pode concluir o sensor escolhido para o sistema é o TGS2602 da *Figaro*.



Figura 2.6 - Sensor TGS2602 da Figaro

Para além do sensor TGS 2602 optou-se por adquirir um outro sensor, o TGS2620, embora este último não seja especificamente para a detecção de VOCs, mas sim para a detecção de vapores de solventes orgânicos e testes de álcool. Este último sensor servirá para testes complementares e para avaliar as diferentes respostas dos diferentes sensores aos diferentes meios em que irão ser testados.



Figura 2.7 - Sensor TGS 2620 da *Figaro*

Capítulo 3

Tecnologias de Comunicação sem Fios

As tecnologias de comunicação sem fios actualmente existentes são várias e para este trabalho foram destacadas, as tecnologias de baixo consumo, baixo débito e baixo custo. Pois pretendeu-se que o dispositivo tivesse uma boa autonomia e não seria necessário um alto débito de transmissão de dados.

Após o estudo e pesquisas efectuadas, foram encontradas algumas tecnologias que correspondem aos requisitos acima referidos, as quais irão ser analisadas de seguida.

3.1 - Tecnologias sem fios de baixo consumo existentes

3.1.1 - Dash7

Dash7 [8], baseada na norma SO/IEC 18000-7, é uma tecnologia sem fios de ultra-baixo consumo, bastante famosa pelo seu desempenho e fiabilidade, utilizada pela NATO para fins militares, estando cada vez mais a ser usada para fins comerciais e não militares.

DASH7 tem um alcance de mais de 2 quilómetros, duração de baterias até 10 anos, capacidades de rede emalhada, penetra betão e água, opera no espectro de 433 MHz e possui uma taxa de transmissão de dados de 28 kbps.

Seria de interesse utilizá-la mas ainda não se encontram facilmente módulos no mercado com esta tecnologia, optando-se assim por não a usar.

3.1.2 - Miwi

A tecnologia *MIWI* [9], de características idênticas ao *ZigBee* (referido mais adiante), criada pela empresa *Microchip*, baseada na norma IEEE 802.15.4 *Wireless PAN*, foi desenhada para baixos débitos, consumos e custos, operando à frequência de 2.4 GHz.

MiWi foi criada com vista a fornecer uma pequena alternativa ao padrão *ZigBee*, também baseado na norma IEEE 802.15.4, apresentando em relação a este uma optimização no consumo, sendo também um protocolo de baixo débito, intitulando-se como sendo uma solução relativamente mais barata.

Esta apenas pode ser única e exclusivamente usada por micro controladores da *Microchip*. Caso contrário, terá que ser paga uma licença para uso noutro micro controlador. Logo a integração desta tecnologia no dispositivo móvel tornava-se inviável.

3.1.3 - Z-Wave

Uma tecnologia interessante de usar seria a *Z-Wave* [10]. Esta é uma tecnologia bem aceite actualmente em redes domésticas (domótica, etc.), foi concebida para ter um baixo consumo e um custo reduzido, conseguindo mesmo consumir menos que *ZigBee*.

Possui uma taxa de transmissão de dados de 40 kbps, um alcance de cerca de 30 metros em espaço aberto e opera à frequência de 900 MHz.

3.1.4 - ZigBee

Baseada na norma IEEE 802.15.4 foi criada para ter um baixo débito de transmissão de dados a curtas distâncias e um consumo reduzido. Opera à frequência de 2.4 GHz e 868/915 MHz, possui uma taxa de transmissão de dados de 250 kbps a 2.4 GHz, 40 kbps a 915 MHz, e 20 kbps a 868 MHz.

3.1.5 - Bluetooth

Bluetooth é um protocolo de comunicação que define uma camada sobre a norma IEEE 802.15.1 [10], muito usual hoje em dia para troca de informações entre dispositivos como telemóveis, portáteis, computadores, impressoras e câmaras digitais através de uma frequência de rádio de curto alcance [12]. O *Bluetooth* foi um padrão de comunicação inicialmente projectado para aplicações de baixo consumo de energia, baixo alcance e que não necessitem de um débito considerável de transferência de dados.

3.2 - Comparação entre tecnologias

Qualquer uma destas tecnologias, referidas anteriormente, iria satisfazer as necessidades do dispositivo móvel uma vez que, não é pretendida uma elevada taxa de transmissão de dados mas sim um baixo consumo. Assim sendo, a escolha deveria recair na tecnologia que consumisse menos energia.

De seguida irá ser feito um breve estudo comparativo entre as diferentes tecnologias, o qual ajudou a perceber qual a melhor escolha a fazer para este trabalho.

Tabela 3.1 - Características das diferentes redes sem fios

	Frequência	Encriptação	Consumo	Débito	Alcance
Zigbee	868/915MHz, 2.4GHz	Sim	Baixo	250 Kbit/s	10 a 75m
Z-Wave	900MHz	Não	Muito Baixo	40 Kbit/s	30m
MIWI	2.4GHz	Sim	Baixo	250 Kbit/s	-
Dash7	433MHz	Sim	Muito Baixo	28 Kbit/s	1000m
Bluetooth 2.0	2.4GHz	Sim	Baixo	3 Mbit/s	1 a 100m

Como se pode verificar na tabela acima, todas as tecnologias diferem nas características.

A taxa de transmissão de dados mais baixa é de 28 kbit/s, a qual seria o suficiente para o pretendido neste trabalho, logo à partida isto não seria motivo para pôr de parte alguma das tecnologias apresentadas.

Apenas o Z-Wave não possui encriptação de dados mas isso não faz parte dos requisitos do trabalho pois não há necessidade de encriptar os dados enviados.

O alcance das diferentes tecnologias varia bastante. Como se pode verificar quem possui mais alcance é a Dash7 sendo a Z-Wave a que possui menos. Esta característica é de real interesse na medida em que haja a possibilidade do controlo à distância do dispositivo portátil. Isto é importante para ambientes altamente contaminados nos quais a presença humana corra risco.

3.3 - Motivo da escolha

A tecnologia escolhida foi o ZigBee. A escolha, para além de ter tido em conta as características apresentadas anteriormente, também teve de ter em conta factores económicos. Uma vez que já existia um Kit de desenvolvimento ZigBee nomeadamente o CC2430ZDK [7] da Texas Instruments, este foi usado para desenvolver o trabalho.

Uma tecnologia interessante de usar seria a Z-Wave, devido ao seu baixo consumo, mas isto implicava a aquisição de outro Kit de desenvolvimento e se assim fosse, não se estariam a aproveitar os recursos já existentes na Faculdade de Engenharia.

Por outro lado a Dash7, que era a tecnologia que apresentava os menores consumos de energia, teve que ser posta de parte pelos mesmos motivos da Z-Wave, mais ainda pelo facto de ainda ser muito difícil de encontrar à venda no mercado módulos com esta tecnologia.

3.4 - Descrição da tecnologia usada ZigBee

3.4.1 - Principais Características Técnicas

- Dupla banda de frequência (2.4GHz e 868/915 MHz);
- Taxas de transmissão de dados de 250 kbps a 2.4 GHz, 40 kbit/s a 915 MHz, e 20 kbps a 868 MHz;
- Optimizado para aplicações com um baixo duty-cycle (<0.1%);
- Acesso a canais por CSMA-CA;
- Suporte para duas classes de dispositivos físicos (definidos na norma IEEE 802.15.4), podendo ambos coexistir numa mesma rede: *Full Function Device* (FFD) e *Reduced Function Device* (RFD);
- Rendimentos elevados e baixa latência para dispositivos com um baixo duty-cycle como sensores e controlos;
- Baixo consumo (vida das baterias variam de meses até anos);
- Múltiplas topologias: estrela, emalhada, peer-to-peer;
- Espaço de endereçamento até: 18,450,000,000,000,000 dispositivos (endereçamento de 64 bit IEEE);
- 65,535 Redes;
- Posição de tempo opcional garantida para aplicações que requerem uma baixa latência;
- Alcance típico entre 10 a 75 metros (podendo chegar aos 500 metros, dependendo do ambiente e de alterações de hardware);

3.4.2 - Arquitectura

A arquitectura de uma rede sem fios “*low rate*” como o ZigBee, é definida em termos de número de blocos de forma a simplificar o padrão. Estes blocos são chamados por camadas. Cada camada é responsável por uma parte do padrão e oferece serviços às camadas

superiores. A disposição dos blocos é baseada em sistemas abertos de interconexão (OSI), modelo de sete camadas.

As interfaces entre as camadas servem para definir as ligações lógicas as quais são descritas neste padrão.

Um dispositivo sem fios “*low rate*” é composto por uma camada PHY, que contém um *transceiver* de rádio frequência (RF) juntamente com o seu mecanismo de controlo de baixo nível, e uma subcamada MAC que permite o acesso ao canal físico para todos os tipos de transferência.

As camadas superiores consistem numa camada de rede, que fornece a configuração da rede, manipulação e seguimento de mensagens, e uma camada de aplicação que fornece a função pretendida do dispositivo. A definição destas camadas superiores não pertence ao âmbito do padrão.

A norma IEEE 802.15.4, na qual o *ZigBee* é baseado, é uma tecnologia de rede sem fios ideal para a implementação numa vasta gama de aplicações de baixo custo, baixo consumo, de controlo e monitorização dentro de casa e ambiente industrial.

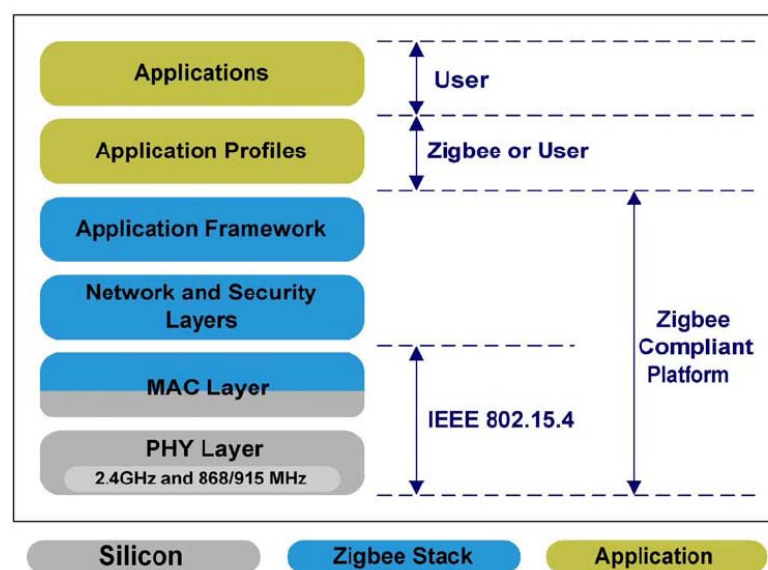


Figura 3.1 - Divisão por Camadas IEEE 802.15.4 e ZigBee [25]

A norma IEEE 802.15.4 especifica camada física (PHY) e a camada de controlo de acesso (MAC) com bandas ISM de 868MHz na Europa, 915MHz nos Estados Unidos e 2.4GHz mundialmente, permitindo a implementação global ou regional.

A interface aérea é feita por *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) usando BPSK para 868/915MHz, e O-QPSK para 2.4GHz. A norma IEEE 802.15.4 PHY possui um detector da energia de recepção (ED), indicador da qualidade da ligação (LQI) e um *clear channel assesement* (CCA).

A camada MAC da norma IEEE 802.15.4 controla o acesso ao canal do rádio usando o método CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) lida com a associação/dissociação e com a camada MAC de segurança (baseada na encriptação AES-128).

Esta é ainda responsável pelo controle de fluxo através de reconhecimento e retransmissão de pacotes de dados, validação de tramas e sincronização em rede, bem como o apoio das camadas superiores para ligação de operação robusta.

O *ZigBee*, tecnologia sem fios, especifica a rede, segurança, e as camadas de aplicação PHY IEEE 802.15.4 e MAC.

A camada de rede *ZigBee* é responsável pela procura de dispositivos, configuração da rede e suporta três tipos de topologia, i.e., Estrela, Emalhada (*peer-to-peer/mesh*) e Árvore (*cluster-tree*) [25].

3.4.3 - Tipos de Dispositivos Presentes na Rede

Existem dois tipos diferentes de dispositivos físicos: *full function devices* (FFD) e *reduced function devices* (RFD) [24].

Um dispositivo FFD, pode funcionar com qualquer topologia de rede, pode agir como o coordenador na rede e pode ainda comunicar com qualquer outro dispositivo.

Um dispositivo RFD, está limitado à topologia de rede em estrela, não pode funcionar como coordenador a rede, apenas comunica com o coordenador e a sua implementação é simples.

Uma rede IEEE 802.15.4/*ZigBee* precisa de pelo menos um dispositivo FFD sendo este o Coordenador, mas por outro lado, os *End Devices*, podem ser do tipo RFD, ou seja, com funcionalidades reduzidas, diminuindo desta maneira os custos do sistema.

Todos os dispositivos devem possuir um endereço IEEE de 64 bits. Os endereços curtos (16 bits) podem ser usados para reduzir o tamanho dos pacotes.

As redes baseadas em *ZigBee* empregam uma combinação de vários tipos de dispositivos.

A figura seguinte mostra os vários tipos de dispositivos que podem ser encontrados na rede e as suas funções:

Physical device type distinguishes the device hardware complexity and capability.	Logical device type distinguishes the physical devices deployed in a specific Zigbee network.		
	Coordinator Network establishment and control.	Router Support data routing functionality. Can talk to other routers, coordinator, and end devices.	End Device Can only talk to routers or the coordinator.
Full Function Device (FFD): Adequate resources and memory capacity to handle all designated tasks.	Yes	Yes	Yes
Reduced Function Device (RFD): Modest resources and memory capacity compared to FFD.	No	No	Yes

Figura 3.2 - Tipos de dispositivos em redes ZigBee [25]

Como constado na figura acima podem ser encontrados três tipos de dispositivos diferentes numa rede *ZigBee*. São eles:

- *Coordinator* - do tipo FFD, tem como função formar a rede, atribuir endereços e suporta *binding table*. Apenas existe um por rede.
- *Router* - do tipo FFD, permite que mais nós se juntem à rede, ao aumentar o seu alcance físico. Pode também efectuar funções de controlo ou monitorização. A sua existência é opcional.
- *End Device* - do tipo RFD ou FFD, efectua acção de controlo ou monitorização através do dispositivo que lhe esteja associado (sensor, controlador...).

3.4.4 - Topologias de Rede

A figura seguinte mostra diferentes tipologias de redes *ZigBee* empregando os diferentes tipos de dispositivos:

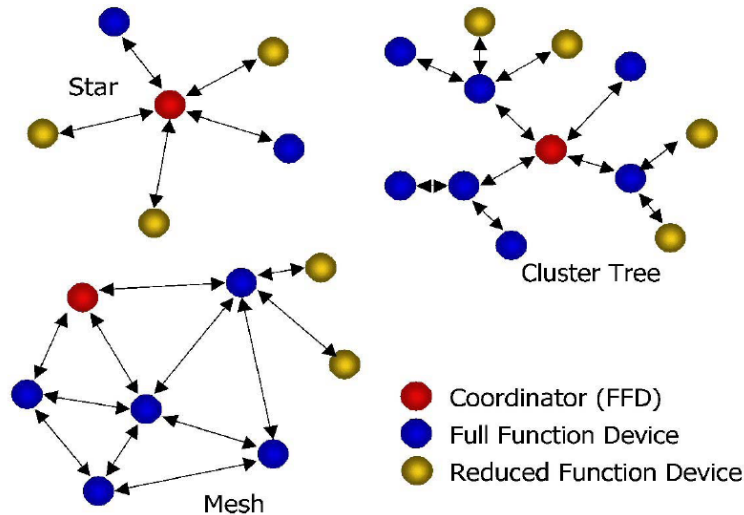


Figura 3.3 - Topologias de rede *ZigBee* [25]

Como se pode verificar pela figura acima, existem três tipos de topologias diferentes em redes *ZigBee*. Estas são, Estrela (*Star*), Árvore (*Cluster Tree*) e Emalhada (*Mesh*).

Numa topologia em Estrela, o Coordenador possui todo o controlo da rede, inicia e mantém os dispositivos na rede. Toda a informação que circula na rede passa pelo Coordenador.

Numa topologia de rede Emalhada os dispositivos do tipo FFD, ou seja, Coordenador e Routers, são livres de comunicarem com outros dispositivos FFD. Isto possibilita, quando necessária, a expansão física da rede facultando-lhe um maior alcance. O Coordenador regista toda a entrada e saída de dispositivos, mas não assume um papel tão importante, em termos de fluxo de informação, como numa topologia em Estrela.

Finalmente numa topologia em Árvore, de características semelhantes à topologia de rede Emalhada, são igualmente usados dispositivos do tipo Router. No entanto, nesta topologia de rede, efectua-se a distribuição de dados e mensagens de controlo numa estrutura hierárquica, onde o Coordenador assume o papel de nó principal da rede [23].

3.4.5 - Formato das Tramas de Dados

O formato das tramas foi desenhado para manter a complexidade num nível baixo enquanto ao mesmo tempo as torna suficientemente robustas para a transmissão num canal

ruidoso. Cada camada protocolar sucessiva adiciona à estrutura, com uma camada específica, cabeçalhos e rodapés.

A norma IEEE 802.15.4 define quatro tipos de tramas:

- Uma trama de *beacons*, usada por um coordenador para transmitir *beacons*;
- Uma trama de dados, usada por todas as transferências de dados;
- Uma trama de reconhecimento, usada para confirmar a recepção de dados com sucesso;
- Uma trama de comando MAC, usada para trabalhar com controlo de transferências de todas as entidades MAC.

A unidade física do protocolo de dados é a informação total enviada para o ar. A camada física adiciona o seguinte cabeçalho:

- Sequência Preambulo – 4 Octetos;
- Início do delimitador da trama – 1 Octeto;
- Tamanho da trama – 1 Octeto.

A camada MAC adiciona o seguinte cabeçalho:

- Controlo de trama – 2 Octetos;
- Número de sequência de dados – 1 Octeto;
- Informação de endereço – 4 a 20 Octetos;
- Sequência de verificação da trama – 2 Octetos.

Em suma, o cabeçalho total para um único pacote é então de 15 a 31 octetos (120 bits) dependendo do esquema de endereçamento utilizado (curto ou de 64 bits). De notar que estes números não incluem nenhum cabeçalho de segurança [24].

3.4.5.1 - Trama de Beacons

A figura abaixo mostra a estrutura de uma trama de *beacons* a qual tem origem na subcamada MAC. Um Coordenador pode transmitir *beacons* numa rede que permita este tipo de tramas.

A unidade de serviço de dados MAC (MSDU) contém a especificação da Super trama, especificação de endereços pendentes, lista de endereços e campos *Beacon Payload*. O MSDU é determinado com um cabeçalho MAC (MHR) e anexado com um rodapé MAC (MFR). O MHR contém os campos de controlo da trama MAC, número de sequência de *Beacon* e campos de

informação de endereçamento. O MFR contém uma sequência de controlo da trama (FCS) de 16 bit. O MHR, MSDU e MFR juntos criam a trama MAC de *Beacons* (MPDU).

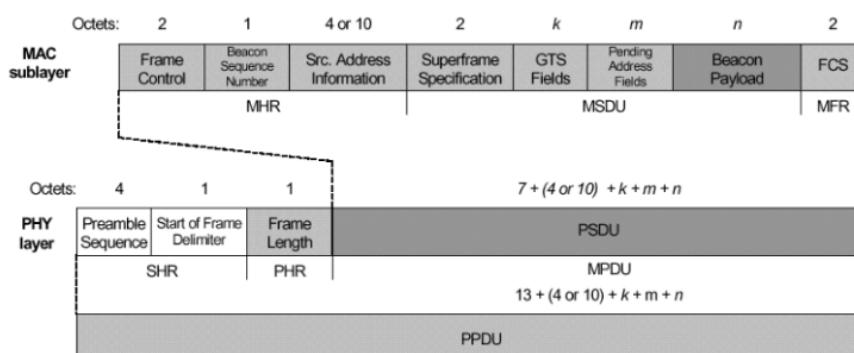


Figura 3.4 - Formato da Trama de Beacons [26]

O MPDU é então passado para a camada PHY como sendo a carga do pacote de *Beacons* (unidade de serviço de dados PHY, PSDU). O PSDU é composto por um cabeçalho de sincronização (SRH), contendo os campos de sequência de preâmbulo, o delimitador de início de trama (SFD) e um cabeçalho PHY (PHR), contendo o tamanho do PSDU em octetos. A sequência de preâmbulo activa o receptor para atingir a sincronização do símbolo. O SHR, PHR e o PSDU juntos formam o pacote de *Beacons* PHY (PPDU).

3.4.5.2 - Trama de Dados

A carga de dados é passada para a subcamada MAC e é referenciada como o MSDU. O MSDU é composto por o MHR e anexado com um MFR. O MHR contém campos de controlo de trama, número de sequência e informação de endereçamento. O MFR é composto por um FCS de 16 bits. O MHR, MSDU e o MFR juntos formam a trama de dados MAC (MPDU).

A MPDU é passada para a PHY como a carga de dados da trama PHY (PSDU). A PSDU é composta por um SHR, contendo os campos de sequência de preâmbulo e SFD, e um PHR contendo o tamanho da PSDU em octetos. A sequência de preâmbulo e o SFD de dados, activam o receptor para atingir a sincronização do símbolo. O SRH, PHR, e a PSDU juntos formam o pacote de dados PHY (PPDU).

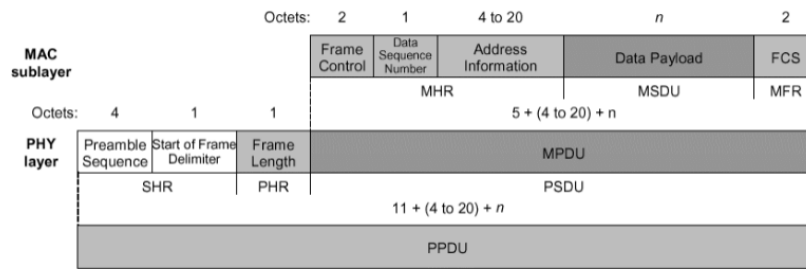


Figura 3.5 - Formato da Trama de Dados [26]

3.4.5.3 - Trama de Reconhecimento de Dados

A trama de reconhecimento de dados é construída a partir de um MHR e um MFR. O MHR contém os campos de controlo de trama MAC e número de sequência de dados. O MFR é composto por um FCS de 16 bits. O MHR e MFR juntos formam a trama de reconhecimento MAC (MPDU).

A MPDU é passada para a PHY como sendo a carga da trama de reconhecimento PHY (PSDU). A PSDU é composta pelos campos SHR, contendo a sequência de preâmbulo, SFD, e PHR contendo o tamanho da PSDU em octetos. O SHR, PHR, e PSDU juntos formam o pacote de reconhecimento PHY (PPDU).

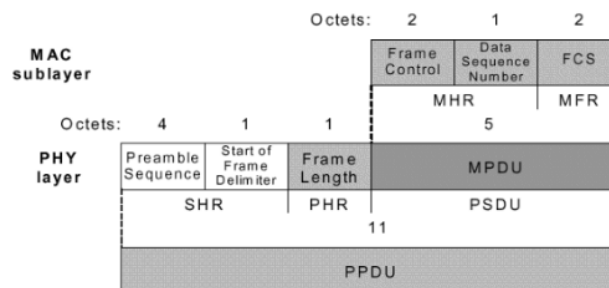


Figura 3.6 - Formato da Trama de Reconhecimento de Dados [26]

3.4.5.4 - Trama de Comandos MAC

A MSDU contém o campo tipo de comando e comando de dados específico, denominado carga de comando. A MSDU é composta por um MHR anexado com um MFR. O MHR contém os campos de controlo de trama MAC, número de sequência de dados, e informação de endereçamento. O MFR contém um FCS de 16 bits. O MHR, MSDU e MFR juntos formam a trama de comandos MAC (MPDU).

O MPDU é depois passado para a PHY como sendo a carga da trama de comandos PHY (PSDU). A PSDU é composta pelos campos SHR, contendo a sequência de preâmbulo, SFD e

PHR contendo o tamanho da PSDU em octetos. A sequência de preâmbulo activa o receptor para atingir a sincronização do símbolo. O SHR, PHR e PSDU juntos formam o pacote de comandos PHY (PPDU).

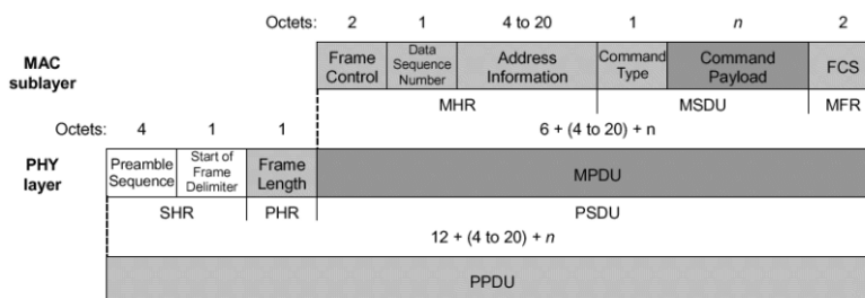


Figura 3.7 - Formato da Trama de Comandos MAC [26]

3.4.6 - Super Trama

A norma LR-WPAN permite o uso opcional de uma estrutura de super trama. O formato de uma super trama é definido pelo coordenador. A super trama é delimitada pelos *Beacons* da rede, enviada pelo coordenador e é dividida em 16 posições de tamanho igual. A trama de *Beacon* é transmitida na primeira posição de cada super trama. Se um coordenador não desejar o uso de uma estrutura de super trama, este deverá desligar a transmissão de *Beacons*. Os *Beacons* são usados para sincronizar os dispositivos ligados, identificar a PAN, e para descrever a estrutura das super tramas. Se algum dispositivo desejar comunicar durante o período de contenção de acesso (CAP) entre dois *Beacons*, este deve competir com outros dispositivos usando um mecanismo CSMA-CA. Todas as transições devem ser concluídas antes do tempo do próximo *Beacon* na rede.

Para aplicações de baixa latência ou aplicações que requerem uma taxa de transmissão de dados específica, o coordenador PAN deve dedicar pequenas porções da super trama activa para essa aplicação. Essas porções são denominadas por posições de tempo garantidas (GTS's). As posições de tempo garantidas compreendem o período livre de contenção (CFP), que aparece sempre no fim de uma super trama activa a partir da posição imediatamente seguinte ao CAP. O coordenador PAN deve alocar até sete destes GTS's e um GTS deve ocupar mais que um período de posição. No entanto, deve restar uma porção suficiente do CAP, para acessos baseados em contenção de outros dispositivos de rede ou de novos dispositivos de rede que se desejem ligar à rede. Todas as transacções baseadas em contenção devem estar terminadas antes do início do CFP. Cada dispositivo que esteja a transmitir num GTS deve assegurar que a sua transacção está terminada antes do tempo do próximo GTS ou antes do fim do CFP [24].

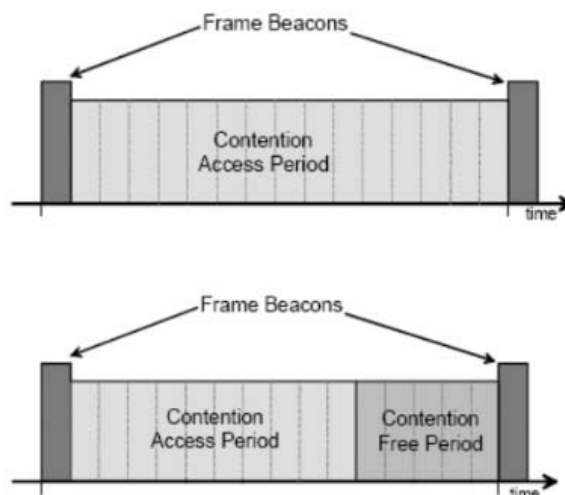


Figura 3.8 - Formato das super tramas [26]

3.4.7 - Segurança

Quando a segurança de uma camada de tramas MAC é desejada, o *ZigBee* usa a camada de segurança MAC para assegurar os comandos MAC, avisos, e tramas de reconhecimento. O *ZigBee* deve proteger as mensagens transmitidas num único salto usando tramas de dados MAC seguras, mas para mensagens multi-salto o *ZigBee* depende de camadas superiores (como a camada NWK) para a segurança. A camada MAC usa o sistema “*Advanced Encryption Standard*” (AES) como o seu núcleo de algoritmo encriptação e descreve uma variedade de pacotes de segurança que usam o algoritmo AES. Esses pacotes podem proteger a confidencialidade, integridade e autenticidade das tramas MAC. A camada MAC faz o processo de segurança, mas as camadas superiores, que configuram as chaves e determinam os níveis de segurança a usar, controlam este processo. Quando a camada MAC transmite ou recebe uma trama com segurança activa, esta olha para o destino ou origem da trama, retorna a chave associada a esse destino ou origem, e de seguida usa essa chave para processar essa trama de acordo com o pacote de segurança designado para essa chave. Cada chave é associada a um único pacote de segurança e o cabeçalho da trama MAC possui um bit que especifica se a segurança de uma trama está activa ou inactiva.

Durante uma transmissão de uma trama, se a integridade for necessária, o cabeçalho do MAC e a carga de dados são usados em cálculos para criar um código de integridade de mensagem (MIC) consistindo em 4, 8 ou 16 octetos. O MIC é anexado à carga do MAC. Se for requerida confidencialidade, a carga da trama MAC é também anexada com a trama e a sequência de contagem. Após a recepção de uma trama, se um MIC estiver presente, este é verificado e se a carga estiver encriptada, esta é desencriptada. Os dispositivos de envio irão aumentar o contador da trama com cada mensagem enviada e os dispositivos de recepção

irão acompanhar a ultima contagem recebida de cada dispositivo de envio. Se uma mensagem com uma contagem antiga for detectada, esta é marcada com um erro de segurança. As suites de segurança da camada MAC são baseadas em três modos de operação. A encriptação na camada MAC é feita usando AES no modo Contador (CTR) e a integridade é feita usando AES no modo *Cipher Block Chaining* (CBC-MAC). A combinação da encriptação e da integridade é feita usando uma mistura dos modos CTR e CBC-MAC sendo apelidado por modo CCM.

A camada NWK também faz uso do AES. No entanto, ao contrário da camada MAC, os pacotes de segurança são baseadas no modo de funcionamento CCM. O modo de funcionamento CCM consiste numa pequena modificação do modo CCM usado pela camada MAC. Este inclui todas as capacidades do CMM e adicionalmente oferece a capacidade de usar apenas encriptação ou apenas integridade. Estas capacidades extra simplificam a camada de segurança NWK eliminando a necessidade dos modos CTR e CBC-MAC. Para além disso o uso do CCM em todos os pacotes de segurança possibilita que uma chave única possa ser usada por pacotes diferentes. Uma vez que uma chave não está estritamente vinculada a um único pacote de segurança, uma aplicação tem flexibilidade para especificar o pacote de segurança actual a ser aplicado a cada trama NWK, não apenas se a segurança está activada ou desactivada.

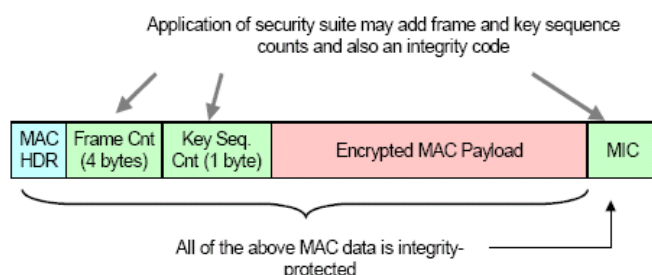


Figura 3.9 - Trama protegida [24]

Quando a camada NWK transmite ou recebe uma trama usando um pacote de segurança particular, esta usa o *Security Service Provider* (SSP) para processar a trama. O SSP olha para o destino ou origem da trama, retorna a chave associada àquele destino ou origem, e de seguida aplica o pacote de segurança à trama. O SSP fornece a camada NWK com uma primitiva para aplicar segurança às tramas de envio e uma primitiva para verificar e remover a segurança das tramas recebidas. A camada NWK é responsável pelo processamento da segurança, mas as camadas mais altas controlam o processamento criando chaves e determinando qual o pacote de segurança CCM que irá ser usado em cada trama.

Semelhante ao formato da trama da camada MAC, uma sequência de contagem de tramas e MIC deverão ser adicionados para proteger uma trama NWK [24].

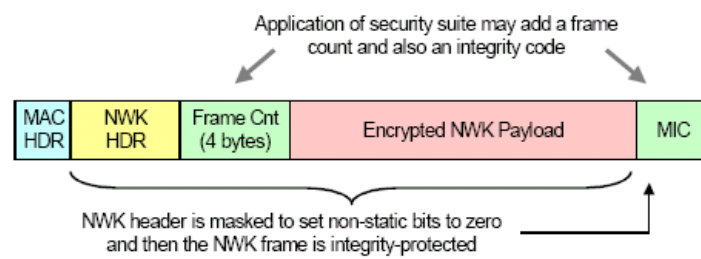


Figura 3.10 - Trama protegida 2 [24]

Capítulo 4

Apresentação do Sistema

4.1 - Descrição da arquitectura do sistema

Durante o desenvolvimento do sistema, foi necessário criar o *hardware* bem como o *software* e *firmware* necessários ao funcionamento do mesmo.

No que toca ao *hardware*, o sistema será composto por dois dispositivos denominados Coordenador e Dispositivo portátil. O dispositivo portátil será responsável pelo acoplamento, controlo e aquisição das leituras dos sensores, as quais posteriormente serão armazenadas em memória. O Coordenador servirá como uma ponte de comunicação entre o End Device e o computador, trocando comandos e dados entre os dispositivos anteriores.

Em relação ao software, será elaborada uma aplicação em Java que permitirá, o controlo e configuração do Dispositivo portátil remotamente, a aquisição de dados e tratamento dos mesmos, o traçado de gráficos temporais em tempo real, através das leituras dos sensores, e gerar ficheiros de texto com o registo dos valores das leituras e acções executadas.

Depois do estudo efectuado chegou-se ao seguinte esquema para a arquitectura global do sistema.



Figura 4.1 - Arquitectura do Sistema

4.2 - Descrição do hardware usado

Nesta secção será feita uma apresentação do hardware usado no projecto, análise das principais características e motivos das escolhas ou decisões tomadas.

4.2.1 - Microcontrolador Usado

Existe no mercado uma vasta gama de micro controladores capazes de processar toda a informação necessária do dispositivo a desenvolver. A escolha do micro controlador a usar deverá ter em conta características como o consumo de energia, facilidade de integração e custo.

Inicialmente foram propostas duas arquitecturas de micro controladores diferentes para implementação no dispositivo, nomeadamente um micro controlador MSP430 e 8051. A arquitectura escolhida foi a 8051 por preferência e também pelo facto de a tecnologia sem fios a usar ser ZigBee e a Faculdade já possuir microcontroladores 8051 com ZigBee integrado. O que é vantajoso ter as comunicações sem fios e o micro controlador num único chip pois, desta forma não é necessária a aquisição de módulos de comunicação sem fios e micro controladores em separado. Para além disso a faculdade já possui o kit de desenvolvimento CC2431DK [7], da *Texas Instruments*, o qual é especialmente útil para o desenvolvimento do *firmware* e que será da maior importância usa-lo.

4.2.1.1 - Estudo de Mercado

A pesquisa de micro controladores foi feita tendo em conta as possíveis tecnologias sem fios que poderiam ser usadas, e focou-se em modelos que já integrassem a respectiva comunicação sem fios, para simplicidade e facilidade de integração. A pesquisa focou-se ainda nos microcontroladores 8051.

A Tabela seguinte apresenta uma lista dos microcontroladores pesquisados e as suas respectivas tecnologias sem fios integradas.

Tabela 4.1 - Microcontroladores

Referência	Fabricante	Tecnologia sem fios
RC2300AT	Radiocrfts	Zigbee
PAN8550	Panasonic	Z-Wave
ZIC2410	California Eastern Labs	Z-Wave
ZW0301	Zensys	Z-Wave

Como já foi referido anteriormente a tecnologia sem fios escolhida foi o ZigBee. Assim sendo os microcontroladores com Z-Wave ficam descartados, embora estes serem tão

capazes como os microcontroladores com ZigBee integrado, pois o núcleo de processamento em todos eles se baseia no 8051.

O microcontrolador que irá ser utilizado para o desenvolvimento do dispositivo é o RC2300AT [6] da Radiocrafts. Esta escolha teve base no facto da faculdade já os ter disponíveis bem como o seu kit de desenvolvimento, assim não será necessária a encomenda de um outro tipo de microcontrolador com outro tipo de tecnologia sem fios. Desta forma serão aproveitados os recursos já existentes poupando-se nos custos.

4.2.1.2 - RC2300AT

O microcontrolador RC2300AT, como já referido anteriormente, é baseado no SoC (*System-on-Chip*) CC2430 [5].

O CC2430 é desenvolvido pela empresa *Chipcon*, sendo constituído por um módulo *ZigBee* que integra a camada PHY da norma IEEE802.15.4, um microcontrolador de baixo consumo e alta performance da família 8051 e uma memória flash de 128 KB. Este foi desenhado para aplicações *ZigBee* e possibilita a comunicação na banda de frequências dos 2.4 GHz.

A figura seguinte apresenta um diagrama de blocos do CC2430 e as suas principais funcionalidades.

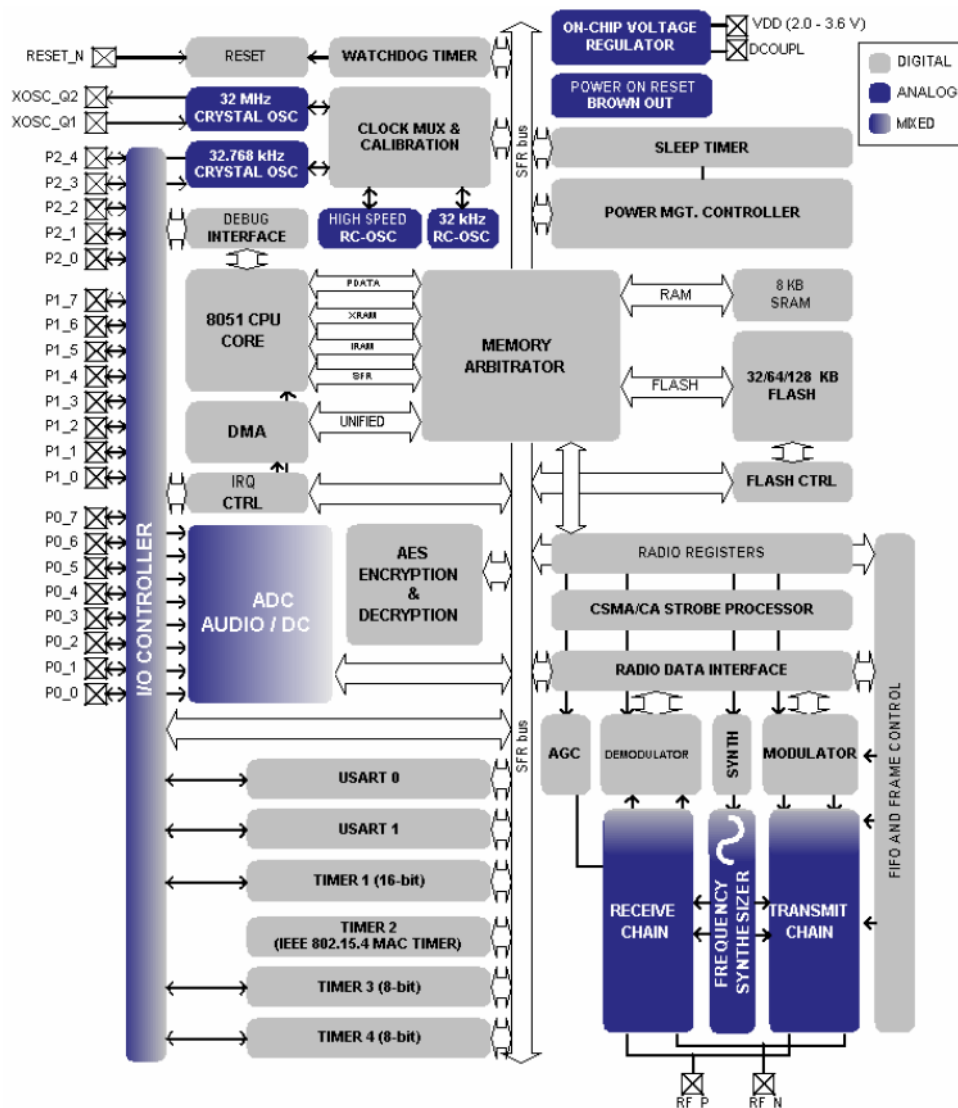


Figura 4.2 - Diagrama de blocos do CC2430 [5]

Na tabela seguinte são apresentadas as principais características técnicas no microcontrolador escolhido, RC2300AT.

Tabela 4.2 - Características Técnicas do RC2300AT

Parâmetro	RC2300AT
Banda de frequências	2.400 a 2.4835 GHz
Número de canais	16
Taxa de transmissão de dados	250 Kbit/s
Tensão de alimentação	2.0 a 3.6 V
Corrente consumida TX/RX	27 mA
Corrente consumida PD	0.9 μ A
Memoria Flash	128 Kb
Memoria Ram	8 Kb
EEPROM	4 Kb
Temperatura de funcionamento	-40 a 85 °C

A figura seguinte mostra a disposição dos pinos do módulo RC2300AT.

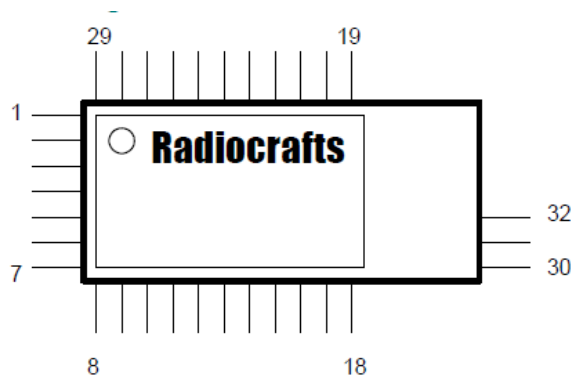


Figura 4.3 - Disposição dos pinos do RC2300AT [22]

A seguinte tabela mostra a descrição dos pinos do módulo RC2300AT.

Tabela 4.3 - Descrições dos pinos do RC2300AT

Pino	Nome	Descrição e ligação interna ao Microcontrolador
1	GND	System ground
2	VCC	Supply voltage input
3	P2_2	Debug Clock, P2.2. Debug interface is used for programming.
4	P2_1	Debug Data, P2.1. Debug interface is used for programming.
5	P2_0	Digital I/O, P2.1
6	RESET_N	Reset. Active low with internal pull-up.
7	GND	System ground
8	P0_0	Digital or analogue I/O, P0.0
9	P0_1	Digital or analogue I/O, P0.1
10	P0_2	Digital or analogue I/O, P0.2, I2C SDA
11	P0_3	Digital or analogue I/O, P0.3, I2C SCL
12	P0_4	Digital or analogue I/O, P0.4
13	P0_5	Digital or analogue I/O, P0.5
14	P0_6	Digital or analogue I/O, P0.6
15	P0_7	Digital or analogue I/O, P0.7
16	RXTX	Digital output, RX/TX control signal.
17	NC	Not connected. Reserved for future use.
18	GND	System ground
19	GND	System ground
20	32kHz_Q2	Internal 32 kHz oscillator. Do not connect. (P2.4)
21	32kHz_Q1	Internal 32 kHz oscillator. Do not connect. (P2.3)
22	P1_7	Digital I/O, P1.7
23	P1_6	Digital I/O, P1.6
24	P1_5	Digital I/O, P1.5
25	P1_4	Digital I/O, P1.4
26	P1_3	Digital I/O, P1.3
27	P1_2	Digital I/O, P1.2
28	P1_1	Digital I/O, P1.1, 20 mA sink/source capability
29	P1_0	Digital I/O, P1.0, 20 mA sink/source capability
30	GND	System ground
31	RF	RF I/O connection to antenna, 50 Ohm. Do not connect for integrated antenna variant (AT).
32	GND	System ground

Este módulo irá ser usado tanto no Coordenador como no “End Device” que irão ser apresentados mais adiante.

Para este módulo foi necessário o desenvolvimento de um PCB para o acoplamento do mesmo, uma vez que o módulo é do tipo montagem SMD. No desenvolvimento do PCB de acoplamento do módulo foi necessário ter em conta uma recomendação do fabricante, devido ao facto de este módulo possuir uma antena integrada. Como se pode verificar na figura seguinte, a parte a sombreado não deve ter nenhum tipo de material condutor para maximizar o desempenho da antena integrada.

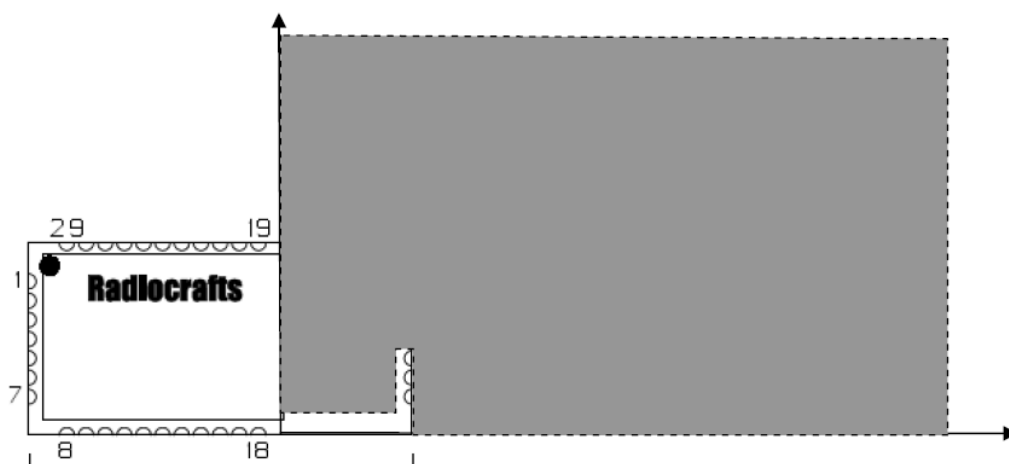


Figura 4.4 - Área restrita a materiais condutores [22]

Assim sendo, teve-se em conta essa recomendação. O PCB de acoplamento do módulo RC2300AT pode ser visto na figura seguinte.

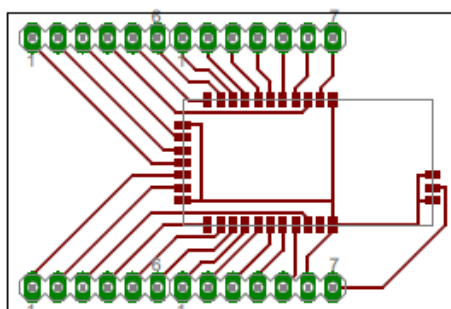


Figura 4.5 - PCB de acoplamento do RC2300AT

4.2.2 - Sensores usados

Como já foi referido no Capítulo 2, para o desenvolvimento do trabalho foram escolhidos dois tipos de sensores diferentes embora da mesma tecnologia e do mesmo fabricante. Os sensores usados são o TGS2602 e o TGS2620, ambos são do tipo MOS e o seu fabricante é a companhia Figaro USA, Inc.

4.2.3 - Outros componentes

Como se pretende que exista comunicação com o computador para análise e tratamento de dados tem-se de ter em atenção o tipo de ligação a usar. Actualmente o USB é o interface de comunicação mais utilizado em dispositivos portáteis logo, será de todo o interesse usa-lo no dispositivo a desenvolver. Neste ponto surgiu um problema. O módulo RC2300AT não suporta USB, apenas possui duas portas UART. Assim sendo para ser possível usar o USB para a comunicação com o computador será necessário recorrer a um conversor.

Verificou-se que o TUSB3410 [11] faz exactamente o que se pretende, ou seja, converte uma porta UART em USB logo, este irá ser usado para que a comunicação entre o computador seja feita através de USB.

O TUSB3410 possui um *firmware* pré-programado numa memória ROM interna que é responsável pela conversão do USB-UART. Para que o computador reconheça o dispositivo é necessária a instalação de uma memória EEPROM externa onde estarão os descritores USB. A EEPROM escolhida foi uma 24LC128P que é uma memória com interface I2C. Os identificadores utilizados são os pré-definidos do ficheiro de configuração do *firmware* da EEPROM, ou seja, o valor do VID (*Vendor ID*) é 0x0451 e o valor do PID (*Product ID*) é o 0x3410.



Figura 4.6 - TUSB3410 [11]

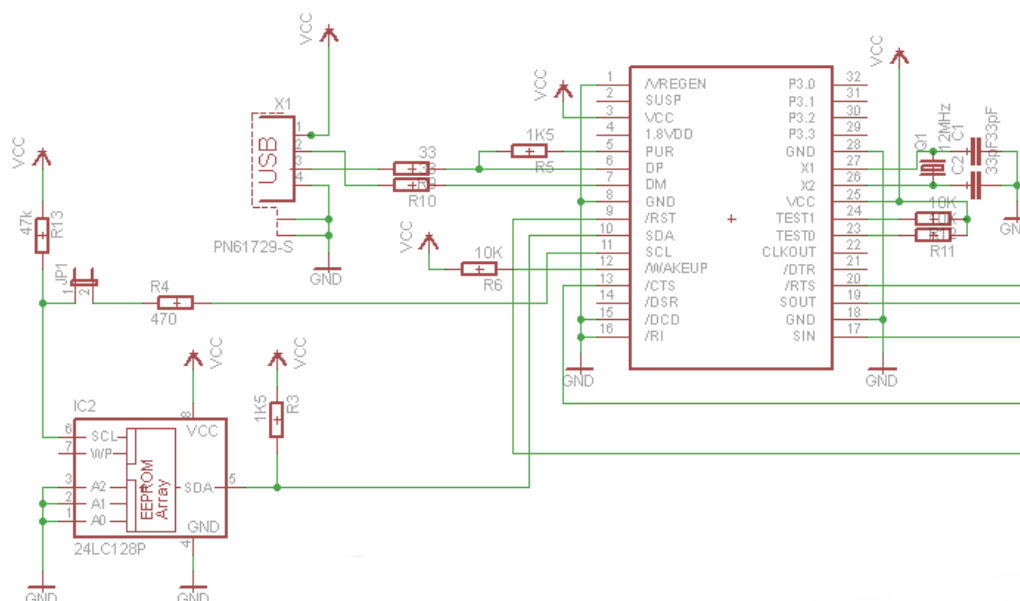


Figura 4.7 - Esquema eléctrico da montagem do TUSB3410

4.2.4 - Coordenador

O coordenador é o módulo responsável pela comunicação entre o computador e o *End Device* sendo baseado no *ZigBee Coordinator*.

Este possui um led de indicação de actividade, LED2, e um led de indicação de estado ligado ou desligado, LED1. Possui ainda dois botões de pressão que executam determinadas tarefas. O botão S2 envia um comando para o dispositivo portátil, para que este execute as leituras em tempo real, com as ultimas configurações enviadas. O botão S3 envia um comando para o dispositivo portátil, para que este pare de efectuar as leituras. Estão presentes ainda três jumpers. O jumper JP1 tem a função de ligar ou desligar o relógio da EEPROM, que apenas servirá para fins de programação do *firmware* da mesma. O jumper JP2 tem como função alternar a alimentação entre USB ou adaptador DC. O jumper JP3 servirá para ligar ou desligar a alimentação do módulo. Para além do já referido o módulo possui uma interface JTAG para a programação do mesmo. Para ser possível a instalação de uma antena externa, foi adicionado um conector para a mesma. A alimentação deste módulo poderá ser feita de duas maneiras como já referido. A primeira, e mais prática, é feita pela ligação USB e a segunda, através de um adaptador DC com uma tensão entre 5 a 15 volts.

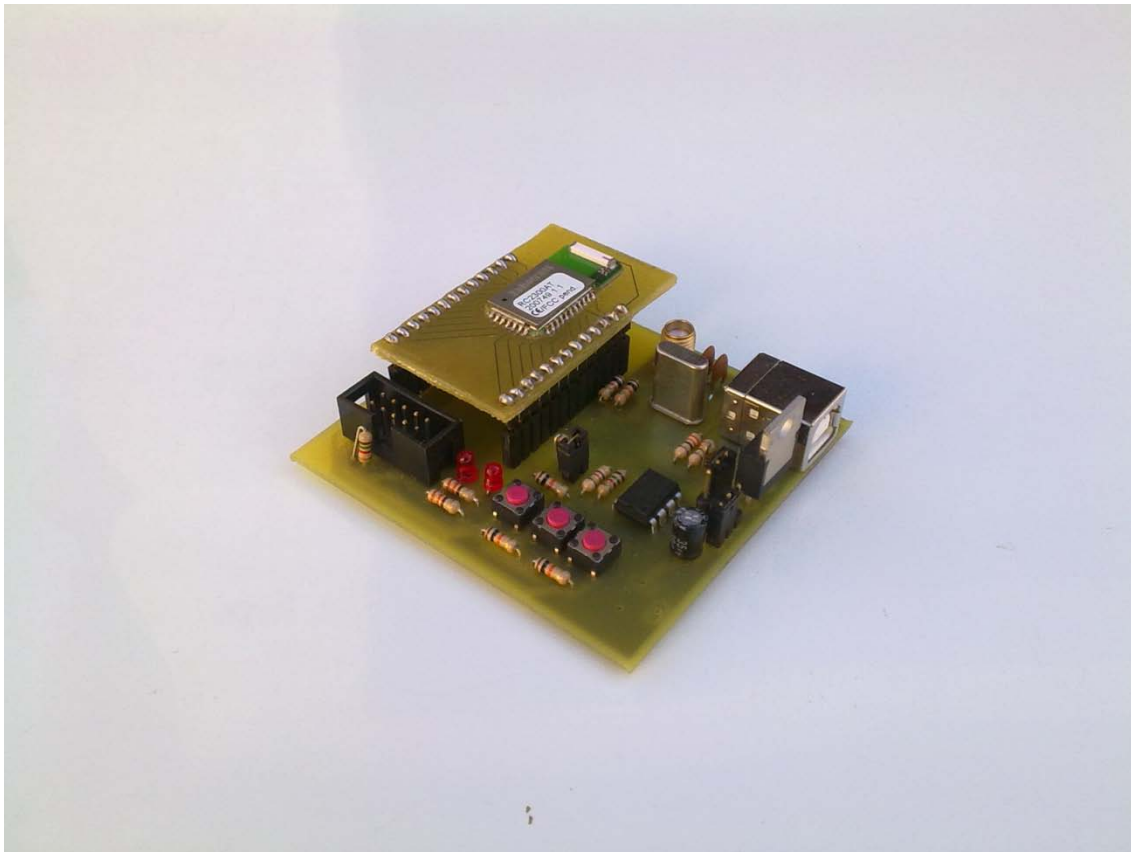


Figura 4.8 - Módulo Coordinador

Na figura seguinte encontra-se o esquema eléctrico do módulo Coordenador.

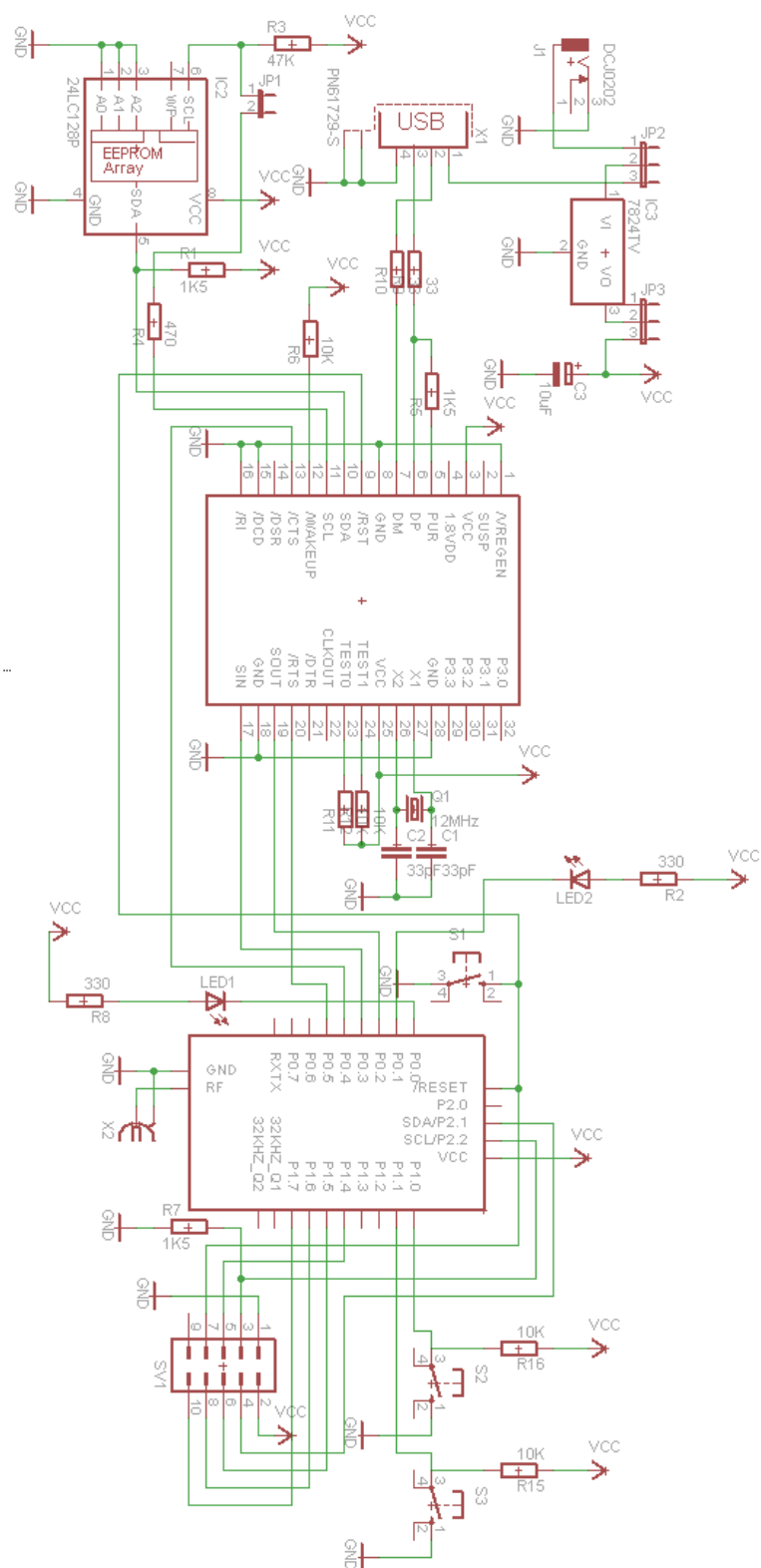


Figura 4.9 - Esquema eléctrico do módulo Coordenador

No Anexo A Figura A.1 é apresentado o PCB do módulo Coordenador.

4.2.5 - Dispositivo portátil

O dispositivo portátil é o módulo responsável por efectuar as leituras e armazená-las na memória interna para serem enviadas ao coordenador. Este tem como base o ZigBee *End Device* devido ao facto de este ser alimentado a baterias.

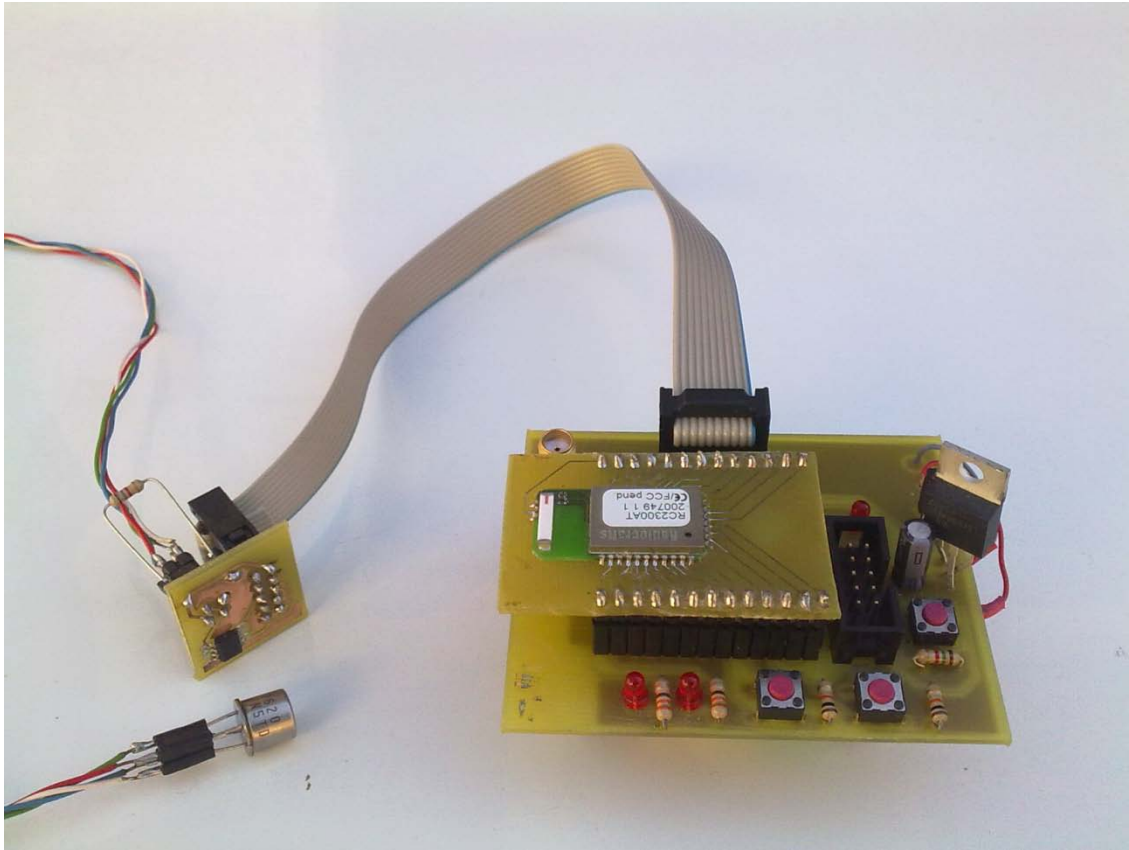


Figura 4.10 - Dispositivo portátil e PCB de acoplamento dos sensores

Este módulo possui dois leds de indicação de actividade, respectivamente LED2 e LED3, e um led de indicação de estado ligado ou desligado, LED1. Possui também dois botões de pressão que executam determinadas tarefas. O botão S1 inicia à execução de leituras periódicas e o botão S3 inicia as leituras em tempo real. Está também presente, como já acontece no módulo Coordenador, uma interface JTAG para a programação deste e um conector para a instalação de uma antena externa. Finalmente este módulo possui uma porta de expansão onde poderão ser ligadas placas de acoplamento de sensores. Esta porta de expansão é constituída por cinco pinos analógicos, dois pinos de alimentação a níveis de tensão diferentes e um pino de massa. Os pinos analógicos estão ligados aos pinos do módulo RC2300AT com funcionalidades de ADC (*Analog to Digital Converter*) e serão através destes pinos que serão feitas as leituras dos valores dos sensores. A porta de expansão permite desta maneira o uso do deste módulo em diferentes tipos de aplicações.

No Anexo A Figura A.2 e Figura A.3 são apresentados respectivamente o PCB do dispositivo portátil e o PCB de acoplamento dos sensores.



No Anexo A Figura A.2 e Figura A.3 são apresentados respectivamente o PCB do dispositivo portátil e o PCB de acoplamento dos sensores.

4.2.6 - PCB de acoplamento dos Sensores

O PCB (*Printed Circuit Board*) de acoplamento dos sensores é um pequeno circuito, constituído por uma interface com quatro pinos para o acoplamento dos sensores, um encaixe para a resistência destacável R_L do sensor e um regulador de tensão individual para a alimentação do sensor uma vez que, os sensores usados requerem um nível de alimentação diferente do resto do circuito.

Um aspecto importante a ter em conta aquando da realização de testes dos sensores com o sistema desenvolvido, deverá ser a resistência R_L do sensor, que tem que ser cuidadosamente escolhida para que não ocorra a saturação do ADC do RC2300AT, uma vez que o último é alimentado a 3.3 volts e o primeiro tem que ser alimentado a 5 volts.

Na figura seguinte encontra-se o esquema eléctrico do PCB de acoplamento dos sensores.

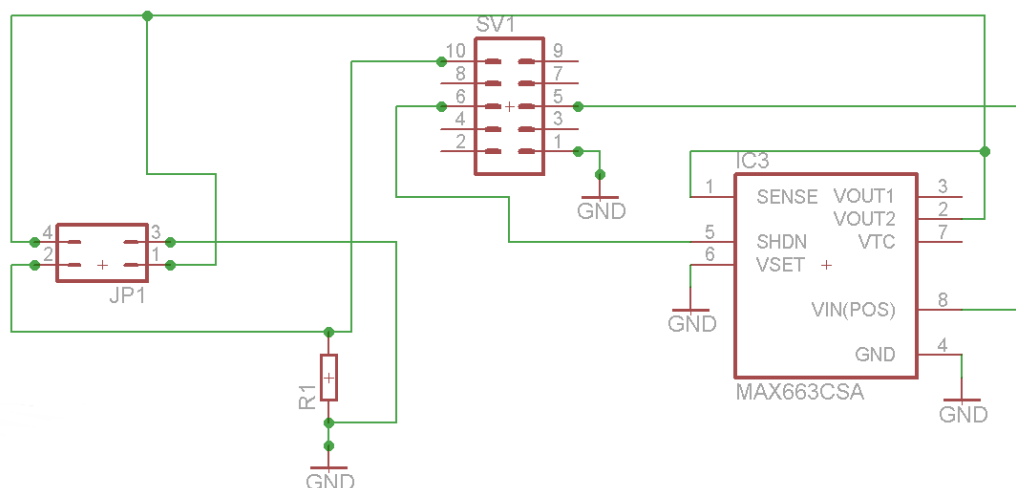


Figura 4.12 - Esquema eléctrico do PCB de acoplamento dos sensores

4.3 - Descrição do Software/Firmware desenvolvido

Nesta secção irá ser descrito o *firmware* desenvolvido para o Dispositivo portátil e para o Coordenador bem como o software desenvolvido para o computador.

4.3.1 - Desenvolvimento do Firmware

Para desenvolver o *firmware* do sistema, composto por dois dispositivos com módulos RC2300AT, recorreu-se ao kit de desenvolvimento CC2431DK [7] e ao *Z-Stack* [17] ambos da *Texas Instruments*. O *Z-stack* é uma implementação em software da pilha *ZigBee*, destinada a dispositivos baseados nos microcontroladores da família 8051 e MSP430 tendo como

linguagem de programação o C. O *Z-Stack* define todas as camadas da pilha *ZigBee*, excepto a camada PHY que está implementada ao nível do hardware. Para além das camadas *ZigBee*, foi também implementada uma camada HAL (*Hardware Abstraction Layer*) e uma camada OSAL (*Operating System Abstraction Layer*).

A camada HAL disponibiliza um vasto conjunto de funções que simplificam a configuração, utilização e gestão de energia dos periféricos do microcontrolador.

A camada OSAL é usada para proteger os componentes do software *Z-Stack* durante o processamento. Esta fornece as seguintes funcionalidades de uma forma independente do ambiente de processamento:

1. Registo, inicialização e começo de tarefas;
2. Troca de mensagens entre tarefas;
3. Sincronização de tarefas;
4. Tratamento de interrupções;
5. Temporizadores;
6. Alocação de memória.

O software do Coordenador e do dispositivo móvel foi desenvolvido no *endpoint* 1 da pilha *ZigBee*.

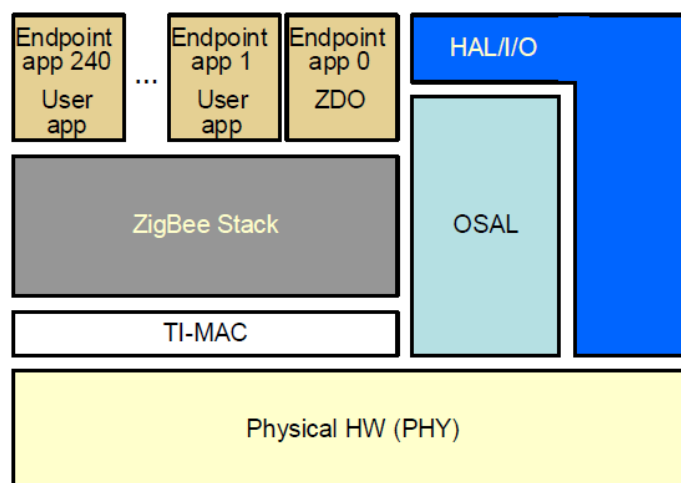


Figura 4.13 - Arquitectura do software de um dispositivo *ZigBee* [18]

Inicialmente para desenvolver o *firmware* para os dispositivos recorreu-se ao kit de desenvolvimento CC2431DK. Começou-se por tentar compreender como se processava a troca de mensagens entre um *ZigBee Coordinator* e um *ZigBee End Device* e principalmente como

se enviavam dados de um dispositivo para o outro. Concluiu-se que para isso eram necessários serem definidos *clusters* de entrada e saída para cada dispositivo ZigBee.

Os *clusters* funcionam como um identificador da mensagem recebida pela interface ZigBee. Depois de recebida a mensagem o dispositivo ZigBee verifica o *cluster* e de seguida irá decidir o que fazer com o conteúdo da mensagem. Existem dois tipos de *clusters*, um de entrada e outro de saída. Um *cluster* é de entrada quando o dispositivo ZigBee recebe uma mensagem, ou seja, o *cluster* contido na mensagem recebida é de entrada. Um *cluster* é de saída quando um dispositivo ZigBee envia uma mensagem, ou seja, o *cluster* contido na mensagem enviada é de saída.

Depois de concluído o estudo sobre o envio e troca de mensagens entre dispositivos, seguiu-se para a compreensão do funcionamento do ADC (*Digital to Analog Converter*) presente no CC2430 uma vez que, a leitura dos sensores irá ser feita através do mesmo. Concluiu-se que o ADC suportava o uso de resoluções de 8, 10, 12 e 14 bits. Inicialmente e ainda numa fase de testes do software, foi utilizada uma resolução de 8 bits para simplificação. Isto facilitava o envio das leituras por ZigBee uma vez que o tamanho do conteúdo dos dados das mensagens é de 8 bits. Concluído o estudo do funcionamento do ADC com 8 bits de resolução, iniciou-se o processo de transição para a resolução de 14 bits. Esta transição foi feita uma vez que se pretende a maior precisão e resolução permitido pelo hardware disponível. Assim sendo deu-se início ao estudo de uma forma de envio das leituras de 14 bits, efectuadas pelo ADC, para o outro dispositivo ZigBee.

Para o envio das leituras do ADC com 14 bits de resolução foi necessário “dividir” as leituras em duas partes. Uma vez que as leituras são guardadas num inteiro de 16 bits, depois de efectuado o processo divisão, fica-se com dois inteiros de 8 bits, respectivamente a parte mais significativa e menos significativa do inteiro de 16 bits, que poderão ser enviados por ZigBee para outro dispositivo.

Existe também a necessidade do armazenamento das leituras efectuadas em memória local, para posterior tratamento. Para isso, estudou-se também o acesso à memória não volátil existente no CC2430. A leitura e escrita de dados na memória são feitas através de funções presentes no OSAL que simplificam estas operações.

Foram ainda estudadas e activadas as interrupções nos pinos das portas do CC2430 uma vez que foram implementados botões de pressão nos dispositivos que desempenham determinadas tarefas. Assim, quando é pressionado um botão de pressão, é activada uma interrupção na respectiva porta e executadas as tarefas programadas para o mesmo.

O uso de uma das duas interfaces USART para a comunicação com o computador é essencial. Logo foi também recorrendo ao kit de desenvolvimento CC2431DK que foram inicialmente estudadas o uso e configuração da porta 0.

Depois de efectuada a montagem iniciou-se uma fase de testes dos dispositivos seguida do desenvolvimento e programação do *firmware* final.

4.3.1.1 - Coordenador

O Coordenador como o próprio nome indica é baseado no *ZigBee Coordinator* o qual tem como função formar a rede e a atribuição de endereços. Uma vez que só irá existir um dispositivo na rede este só irá atribuir um endereço ao dispositivo portátil. O coordenador é ainda responsável pela comunicação entre o computador e o dispositivo portátil uma vez que o primeiro foi equipado com um conversor USART/USB para a ligação ao computador, como já tinha sido referido anteriormente.

Na figura seguinte é apresentado um diagrama do modo de funcionamento do Coordenador.

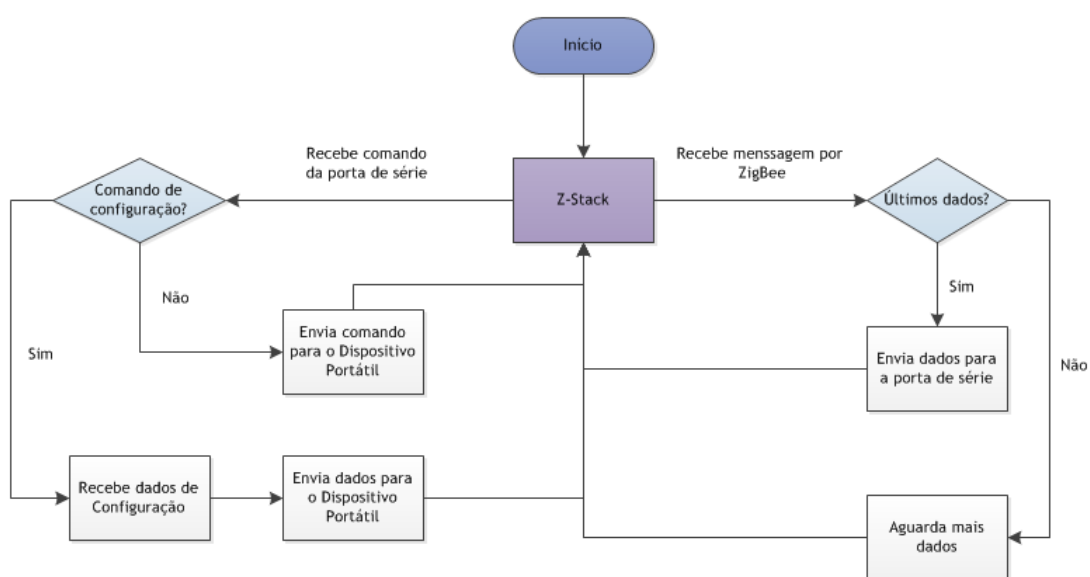


Figura 4.14 - Diagrama de funcionamento do módulo Coordenador

A porta de série utilizada para a comunicação com o computador é a número 0 e configurada a 38400 bits por segundo (bps). Por esta poderão ser recebidos comandos mas também dados. Os únicos dados recebidos pela porta de série serão para, única e exclusivamente, posterior configuração do dispositivo portátil. Qualquer outro tipo de dados recebidos será ignorado. Por sua vez, os comandos recebidos pela porta de série, representam pedidos de execução de determinadas tarefas por parte do dispositivo portátil. Estes comandos serão enviados para o dispositivo portátil através de uma mensagem contendo um determinado *cluster*. Cada comando tem associado um *cluster* de saída exclusivo.

Estão definidos seis comandos que poderão ser recebidos pela porta de série os quais estão apresentados a seguir:

- Comando 1 – Quando o comando 1 é recebido, o Coordenador envia uma mensagem devidamente identificada para o dispositivo portátil para que este efectue uma única leitura do sensor e envie de volta o resultado da mesma.
- Comando 2 – O comando 2 é recebido quando se pretende apagar a memória do dispositivo portátil. O coordenador envia uma mensagem para o dispositivo portátil para que o último apague os dados contidos na memória.
- Comando 3 – O coordenador envia uma mensagem para o dispositivo portátil, quando recebe este comando, para que sejam enviados os resultados das leituras efectuadas e guardadas em memória.
- Comando 4 – Quando este comando é recebido o Coordenador envia uma mensagem ao dispositivo portátil, para que este efectue um determinado número de leituras durante um determinado período de tempo.
- Comando 5 – Este comando é o que activa o modo de configuração do dispositivo portátil. Depois de recebido, são enviados os dados de configuração que são constituídos pelo período entre leituras e o número de leituras a efectuar pelo dispositivo portátil. Terminada a recepção dos dados de configuração, o Coordenador envia uma mensagem para o dispositivo portátil com os mesmos para que o último seja configurado.
- Comando 6 – O comando 6 é recebido quando se pretende fazer uma leitura do sensor em tempo real. O coordenador envia para o dispositivo portátil uma mensagem com o pedido para que este efectue um número de leituras, durante um determinado intervalo de tempo, previamente definido. Sempre que é efectuada uma leitura, esta é imediatamente enviada para o Coordenador.

Como já tinha sido referido anteriormente a cada comando está associado um *cluster* de saída exclusivo mas, o Coordenador possui ainda *clusters* de entrada. Os *clusters* de entrada são os identificadores das mensagens enviadas do dispositivo portátil para o Coordenador. Os *clusters* de entrada, saída e respectivas funções estão apresentados a seguir:

- READ_ADC – Este é um *cluster* de entrada, está associado à mensagem enviada pelo comando 1 para o dispositivo portátil, tendo a função de pedir a este que efectue uma leitura do sensor e a envie de seguida.

- ERASE_MEMORY - *Cluster* de saída, está associado à mensagem enviada pelo Coordenador, quando recebe o comando 2, para o dispositivo portátil, e tem a função de pedir ao último que apague os dados contidos na sua memória.
- GET_DATA - É um *cluster* de saída, associado ao comando 3, tendo como função pedir que o dispositivo portátil envie os dados guardados na sua memória.
- GRADUAL_READ - Este é mais um *cluster* de saída que está associado ao comando 4, e tem como função pedir ao dispositivo portátil que efectue um determinado número de leituras durante um determinado período de tempo.
- CONFIG - *Cluster* de saída associado ao comando 5, tendo a função de enviar para dispositivo portátil as configurações do número de leituras e período entre leituras.
- REAL_TIME_READ - É um *cluster* de saída que está associado ao comando 6, tendo a função de pedir ao dispositivo portátil que inicie um determinado número de leituras em tempo real durante um determinado período de tempo.
- GENERICAPP_CLUSTERID - É um *cluster* de entrada que recebe os dados de uma única leitura efectuada pelo dispositivo portátil.
- GET_FRAG_END_DATA - *Cluster* de entrada que recebe os dados guardados na memória do dispositivo portátil à excepção dos últimos 60 bytes.
- GET_FRAG_END_DATA_FINISH - *Cluster* de entrada que recebe os últimos 60 bytes dos dados guardados na memória do dispositivo portátil. Após a recepção de últimos 60 bytes, são enviados todos os dados recebidos das leituras efectuadas para a porta de série.
- REAL_TIME_MEASURE - *Cluster* de entrada que recebe os dados das leituras efectuadas em tempo real encaminhando-os de seguida para a porta de série cada vez que recebe uma leitura nova.

Depois de uma fase de testes mais extensiva, surgiu um problema. O *buffer* da porta de série só permitia o envio de 64 bytes em simultâneo e na maioria dos casos, pretendia-se enviar um valor maior do que o referido. O problema foi resolvido dividindo o *buffer*, que continha os dados das leituras recebidas, em *buffers* de 60 bytes e enviados um a um em intervalos de 100ms.

4.3.1.2 - Dispositivo portátil

O Dispositivo portátil tem a particularidade de a sua alimentação ser feita através de baterias. Por esse motivo este é baseado no *ZigBee End Device* pois este possui modos de baixo consumo que permitem aumentar a durabilidade das baterias usadas na alimentação. Este dispositivo tem como função receber os comandos enviados pelo Coordenador, interpreta-los e responder aos mesmos caso assim seja necessário.

Na figura seguinte é demonstrado o modo de funcionamento do dispositivo portátil.

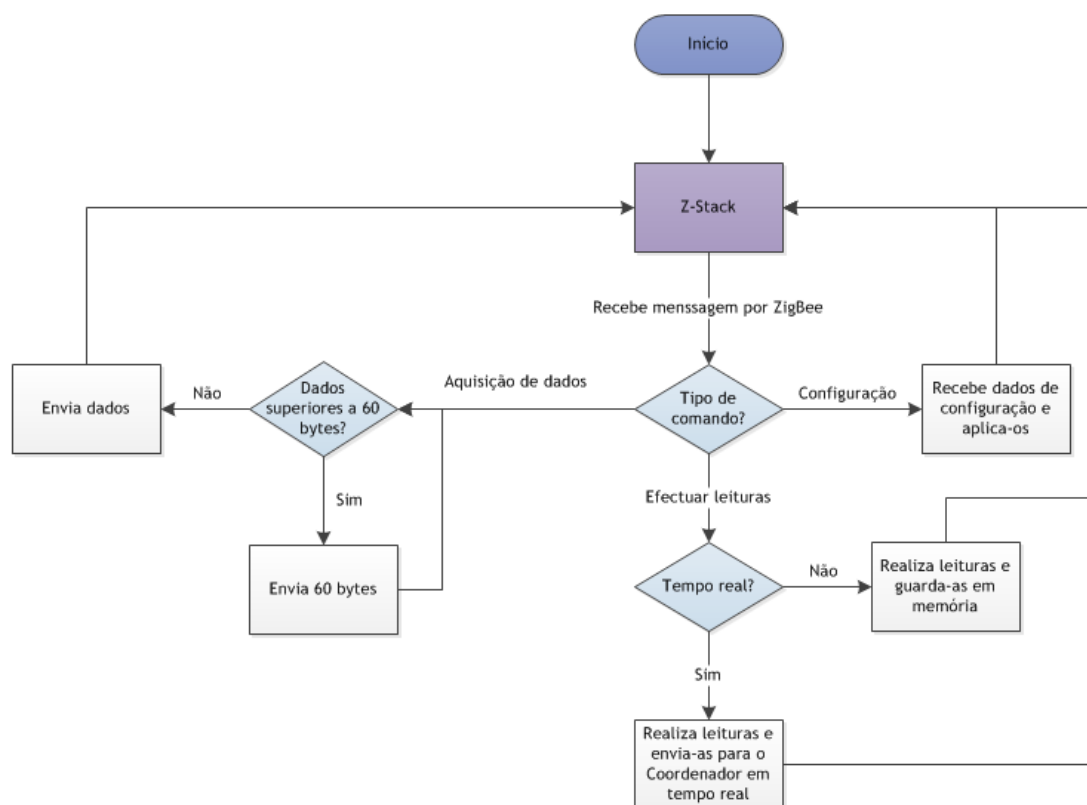


Figura 4.15 - Modo de funcionamento do dispositivo portátil

Como se pode verificar o dispositivo portátil passa a maioria do tempo a executar funções do *Z-Stack*, sendo interrompido quando recebe uma mensagem proveniente da rede. Essas mensagens contêm os vários comandos que este poderá receber. Para além dos comandos são também várias as tarefas que este tem de executar após a recepção dos comandos.

Para efectuar a configuração do dispositivo portátil, é recebida uma mensagem contendo o comando a executar e os dados da configuração pretendida, sendo os últimos, o período entre medições e o número de medições a efectuar. Após a recepção deste comando o dispositivo analisa os dados recebidos e guarda-os na sua memória interna não volátil. Isto é útil na medida em que caso ocorra uma falha na alimentação, ou seja necessário reiniciar o dispositivo portátil, este ao iniciar-se, configurar-se-á automaticamente com os dados da última configuração recebida, não havendo necessidade de o reconfigurar novamente. Terminada a configuração, o dispositivo portátil envia uma mensagem para o Coordenador para que este informe o computador que o primeiro está configurado.

Existem três comandos que o dispositivo portátil pode receber com instruções para efectuar medições. O primeiro é um comando simples que pretende que o dispositivo portátil

efectue apenas uma leitura do sensor e envie de seguida o resultado da mesma. Para isso o dispositivo portátil activa a alimentação do sensor e agenda uma tarefa para ser executada um determinado tempo depois de ser activada a alimentação. Este tempo é o mesmo que foi guardado aquando da configuração. A tarefa é agendada por meio de um temporizador e tem como objectivo recolher a informação do sensor, desligando de seguida a alimentação do mesmo e enviando a leitura efectuada para o Coordenador que por sua vez a irá enviar para o computador.

O segundo comando pretende que o dispositivo portátil efectue leituras periódicas do sensor. Para isso, após a recepção do comando o dispositivo verifica as configurações recebidas que contêm o número de leituras a efectuar e o intervalo de tempo entre elas. De seguida activa a alimentação do sensor e agenda uma tarefa para ser executada um número de vezes quantas as leituras pretendidas, com um intervalo de tempo entre elas, igual ao intervalo de tempo definido aquando da configuração. Cada vez que é executada esta tarefa o dispositivo efectua uma leitura do sensor e guarda o seu resultado numa posição da sua memória interna não volátil e assim sucessivamente até à última leitura. Desta maneira os dados das leituras efectuadas estão salvaguardados mesmo em caso de falha na alimentação do dispositivo. Depois de serem efectuadas todas as leituras, a tarefa previamente agendada tem ainda a função de desligar a alimentação do sensor e enviar uma mensagem ao Coordenador para que este informe o computador que o dispositivo portátil terminou a tarefa com sucesso.

O terceiro e último comando correspondente à realização de leituras em tempo real, ou seja, pretende que o dispositivo portátil efectue leituras do sensor e as envie para o computador sempre que é realizada uma nova leitura. De forma idêntica ao comando referido anteriormente, o dispositivo portátil irá verificar as últimas configurações recebidas, activar a alimentação do sensor e irá agendar uma tarefa que se irá repetir o número de vezes quantas as leituras pretendidas, em intervalos de tempo iguais ao definido aquando da configuração. Assim que é executada a tarefa, o dispositivo portátil irá efectuar uma leitura do sensor, enviando de seguida o resultado da mesma para o Coordenador, que posteriormente a irá enviar para o computador. Assim que se atinja o final das leituras, a tarefa desliga a alimentação do sensor e envia uma mensagem para o Coordenador para que este informe o computador que o dispositivo portátil terminou a tarefa com sucesso.

Para recolher ou apagar os dados contidos na memória do dispositivo portátil este irá receber dois comandos diferentes. O primeiro, referente à eliminação dos dados, é um simples comando que após a sua recepção, o dispositivo portátil irá reiniciar a posição de memória que contém o índice de posições de memória ocupadas. Assim da próxima vez que seja executada uma operação de escrita na memória, os novos dados serão escritos na posição de memória apontada pelo índice de posições de memória ocupadas.

Quando é recebido o comando que pretende recolher os dados contidos na memória, o dispositivo portátil irá consultar a posição de memória que contém o índice de posições de memória ocupadas e a posição de memória que contém o endereço onde estão guardados os dados da primeira leitura. Desta maneira ele irá calcular o número de leituras presentes na memória. Uma vez que as leituras efectuadas têm uma resolução de 14 bits, e que por *ZigBee* só se poderão enviar dados de 8 bits, teve-se de recorrer à “divisão” das leituras em pares de dois bytes, um byte para a parte mais significativa e um byte para a parte menos significativa. Para além do referido anteriormente o *buffer* de dados a enviar tem o tamanho de 64 bytes havendo a necessidade do envio dos dados ser feito de forma fragmentada, caso o número de leituras ultrapasse as 30. Assim sendo, é agendada uma tarefa que verifica o número de leituras que ainda faltam enviar e caso ultrapasse o número 30, são enviadas as primeiras 30 leituras para o Coordenador, através de uma mensagem com um *cluster*, que identifica as leituras a receber, como não sendo as últimas, e assim sucessivamente excepto para as últimas leituras presentes na memória. Caso o número de leituras por enviar seja menor que 30, estas são enviadas com um *cluster* diferente, que as identifica como sendo as últimas leituras a receber pelo Coordenador. Caso na memória do dispositivo portátil apenas estejam presentes um número de leituras igual ou inferior a 30, estas serão enviadas com o mesmo *cluster* que as identifica como sendo as últimas leituras a receber pelo Coordenador. Cada vez que se preenche um *buffer* e se efectua o pedido de envio do mesmo, é necessário terminar a tarefa agendada e agendar uma nova tarefa para tratar do envio das restantes leituras. Isto acontece uma vez que o *Z-Stack* necessita de processar o envio dos dados recorrendo a uma tarefa agendada por ele próprio, existindo a necessidade de parar de executar a tarefa criada e agendar uma outra para que seja executada depois de o *Z-Stack* ter enviado a mensagem pedida. Se esta regra não for seguida, só serão enviadas as primeiras 30 leituras e as outras serão descartadas por não caberem no *buffer* de saída.

A comunicação com o módulo Coordenador é feita através de um *endpoint* constituído por 13 *clusters*. Os *clusters* de entrada, saída e respectivas funções estão apresentados a seguir:

- READ_ADC - *Cluster* de entrada, tem como função pedir ao dispositivo portátil que efectue uma leitura do sensor, após o intervalo de tempo pré configurado, e a envie de seguida para o módulo Coordenador.
- ERASE_MEMORY - *Cluster* de entrada, cuja função é pedir ao dispositivo portátil que apague os dados das leituras contidos na sua memória interna.
- ERASE_DONE - *Cluster* de saída que tem como função enviar uma mensagem para o Coordenador, confirmando que a memória foi devidamente apagada.

- GET_DATA - *Cluster* de entrada, tem como função pedir ao dispositivo portátil que envie todos os dados das leituras, que se encontram armazenados na sua memória interna.
- GRADUAL_READ - *Cluster* de entrada tendo como função pedir ao dispositivo portátil que efectue um determinado número de leituras, com um determinado intervalo de tempo entre elas, previamente definidos, e que armazene os resultados dessas mesmas leituras na sua memória interna.
- REAL_TIME_READ - *Cluster* de entrada, tem como função pedir ao dispositivo portátil que efectue um determinado número de leituras, com um determinado intervalo de tempo entre elas, previamente definidos, e que envie o resultado de cada leitura logo após esta ter sido efectuada.
- CONFIG - *Cluster* de entrada, tem como função receber e definir os valores do intervalo de tempo entre leituras bem como o número de leituras a efectuar.
- CONFIG_DONE - *Cluster* de saída que tem como função enviar uma mensagem ao módulo Coordenador, confirmando a configuração bem sucedida do dispositivo portátil.
- STOP_READ - *Cluster* de entrada que dá ordem ao dispositivo portátil para interromper quaisquer medições que o último esteja a realizar naquele momento.
- GENERICAPP_CLUSTERID - *Cluster* de saída que tem a função de enviar o valor de uma única leitura do sensor para o módulo Coordenador.
- REAL_TIME_MEASURE - *Cluster* de saída, tem como função enviar, para o Coordenador, o valor de uma leitura logo após esta ter sido efectuada. Este *cluster* é usado quando se pretende efectuar medições em tempo real.
- GET_FRAG_END_DATA - *Cluster* de saída que tem como função enviar, para o módulo Coordenador, os dados de 30 medições contidos na memória interna do dispositivo portátil. Tem ainda a função de informar o módulo Coordenador que ainda existem mais dados de medições na memória interna do dispositivo portátil, e que estas irão ser enviadas de seguida.
- GET_FRAG_END_DATA_FINISH - *Cluster* de saída, que tem como função enviar, para o módulo Coordenador, os dados das últimas ou únicas 30 medições presentes na memória interna do dispositivo portátil, e informa ainda o primeiro de que já não existem mais dados de medições, na memória interna do dispositivo portátil, para serem enviadas.

4.3.1.3 - Software para o Computador

O software para o computador foi realizado em *Java*, para que este pudesse ser instalado e executado em qualquer sistema operativo que possua o *Java Runtime*

Environment instalado. Assim, esta aplicação poderá ser executada em praticamente qualquer computador independentemente do sistema operativo instalado (*Mac OSX, Windows, Linux, etc.*).

Esta aplicação tem o objectivo de se ligar ao módulo Coordenador por USB, controlar e configurar o dispositivo portátil, adquirir dados de leituras efectuadas, traçar gráficos com as medidas recebidas, traçar gráficos de leituras em tempo real e gerar ficheiros de texto com o registo das acções ocorridas (*Log Files*). A janela principal tem o aspecto apresentado na figura a seguir.

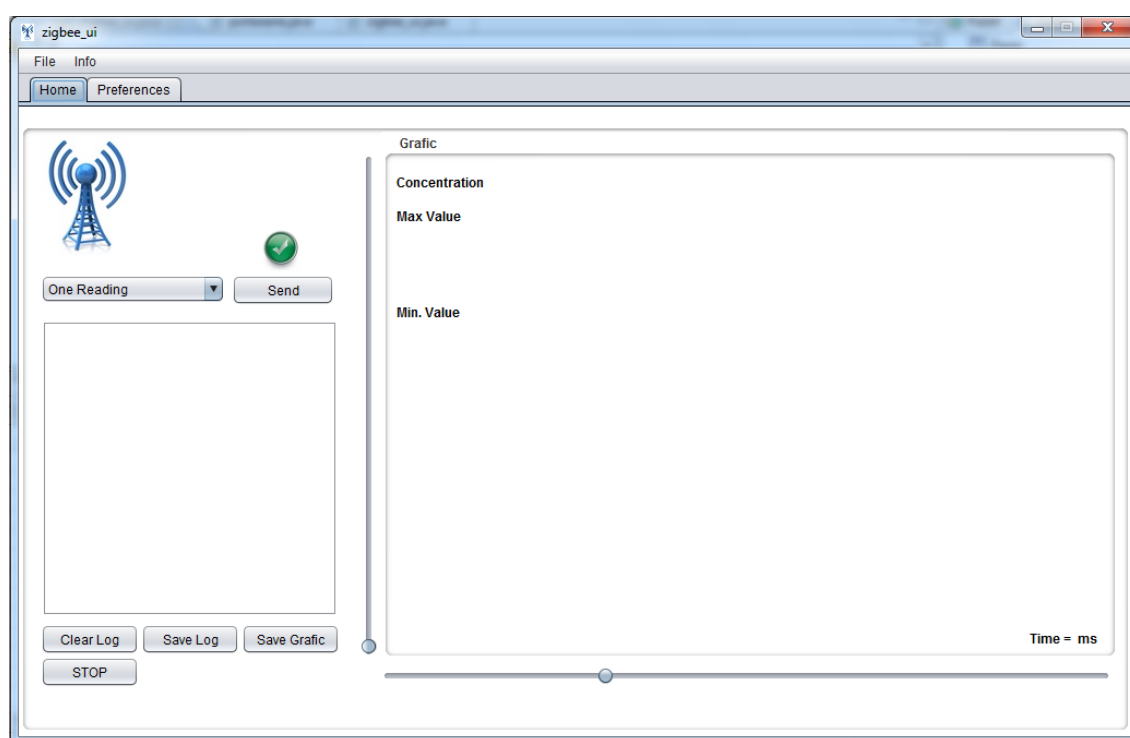


Figura 4.16 - Ecrã inicial do software para PC

Como se pode verificar a janela principal apresenta dois menus e dois separadores, sendo eles respectivamente, “*File*”, “*Info*”, “*Home*” e “*Preferences*”. Ao iniciar a aplicação, esta irá estar no separador “*Home*”. No primeiro menu, o utilizador pode estabelecer a ligação ao módulo Coordenador, desligar-se do mesmo e sair da Aplicação. No segundo menu, o utilizador pode encontrar informações sobre a aplicação (versão, autor, etc.).

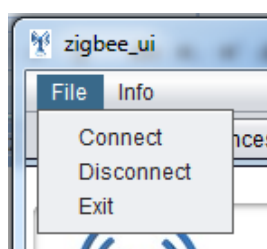


Figura 4.17 - File menu

No separador “Home” encontram-se duas caixas, uma denominada “Grafic”, onde serão visualizados o traçado dos gráficos, e outra denominada “Log”, onde poderão ser visualizados os registos das acções ocorridas.

No mesmo separador é ainda possível enviar vários comandos para o dispositivo portátil, recorrendo ao menu situado no lado esquerdo do botão “Send”, escolhendo aí o comando pretendido, e clicando de seguida nesse mesmo botão, para enviar o comando escolhido.

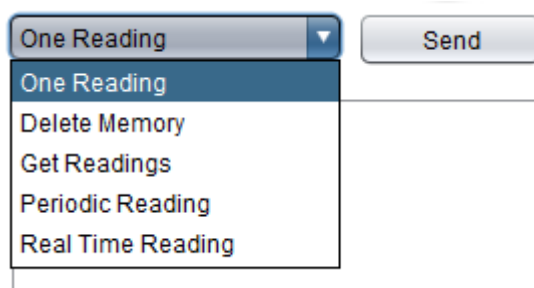


Figura 4.18 - Menu de selecção de comandos a enviar

Estão também disponíveis os botões “Stop”, “Clear Log”, “Save Log” e “Save Grafic”. O botão “Stop” tem a função pedir ao dispositivo portátil que termine a realização das medições a decorrer naquele momento. O botão “Clear Log” tem como função limpar a caixa “Log”, apagando desta maneira o registo das acções ocorridas. O botão “Save Log” tem como função gerar um ficheiro de texto, com o registo das acções ocorridas e guarda-lo automaticamente numa localização do computador escolhida pelo utilizador (referido mais adiante). Por último o botão “Save Grafic” tem a função de gerar um ficheiro de imagem com o gráfico traçado pela aplicação e guardar esse mesmo ficheiro numa localização do computador escolhida pelo utilizador.

Para além dos botões referidos estão também disponíveis duas barras de controlo deslizante, uma na horizontal e outra na vertical. A barra vertical tem a função alterar a escala do gráfico, podendo o utilizador ajusta-la para uma melhor visualização dos valores do mesmo. A barra horizontal tem a função de alterar o número de medições possíveis de visualizar na caixa onde se encontra o traçado do gráfico. Esta última opção só se encontra disponível no modo de leituras em tempo real.

Por sua vez, no separador “Preferences” é possível definir o número da porta de comunicação usada pelo módulo Coordenador, definir a localização, no computador, onde serão guardados os ficheiros de registo e as imagens dos gráficos gerados pela aplicação e, por último, configurar o dispositivo portátil.

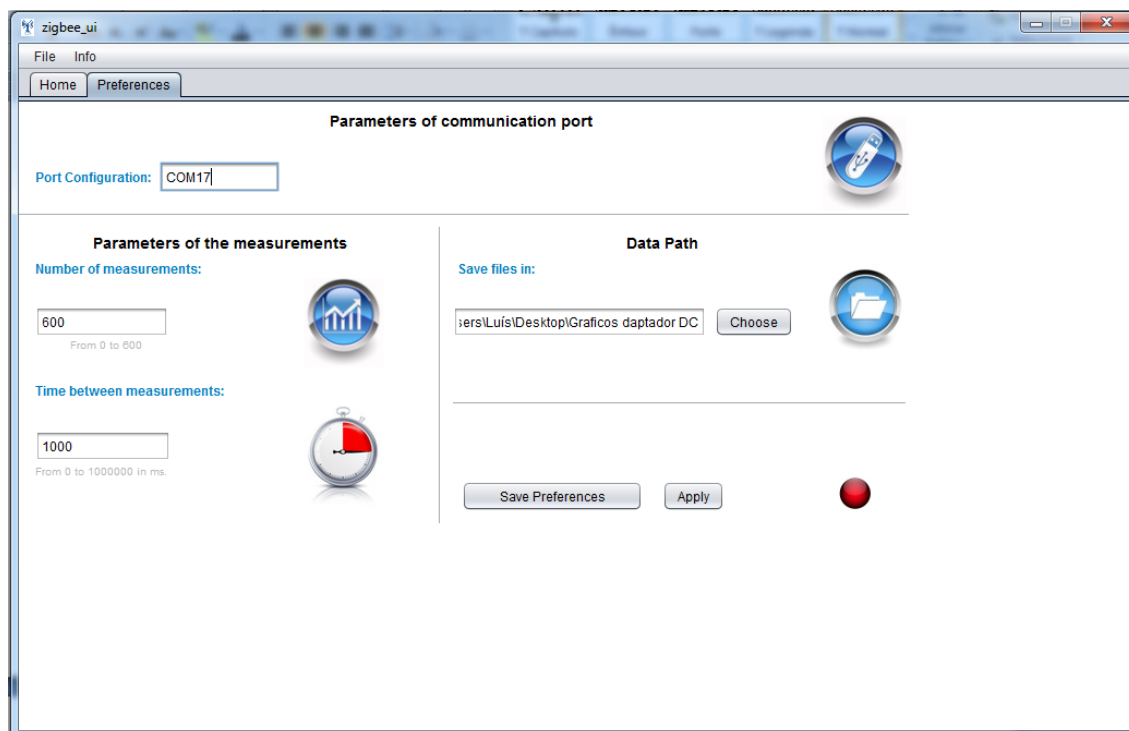


Figura 4.19 - Separador *Preferences*

Como se pode verificar na figura acima, o separador “*Preferences*” está dividido em três secções, sendo elas, “*Parameters of communication port*”, “*Parameters of the measurements*” e “*Data Path*”.

Na secção “*Parameters of communication port*”, o utilizador poderá definir a porta de comunicação. Para isso, o utilizador deverá preencher o campo “*Port configuration*” no formato COMXX, onde XX será o número da porta COM a usar. É de notar que a comunicação do software com o módulo Coordenador é feita pela virtualização de uma porta de série, através de USB, daí se usar COMXX como nome da porta de comunicação, pois aos olhos do software ele estará a comunicar com uma porta de série.

Já na secção “*Parameters of the measurements*”, o utilizador poderá definir as configurações a serem enviadas para o dispositivo portátil. Para isso o utilizador deverá preencher os campos “*Number of measurements*” e “*Time between measurements*” com os valores pretendidos e de seguida deverá clicar em “*Apply*”. Se a configuração for realizada com sucesso, o indicador vermelho ficará verde assinalando o sucesso da operação de configuração.



Figura 4.20 - Botão “*Apply*” e respectivo indicador de sucesso

Por último, na secção “*Data Path*”, o utilizador poderá escolher a localização, no computador, onde pretende guardar os registos e os traçados dos gráficos. Para isso, o utilizador deverá clicar no botão “*Choose*” o qual fará surgir uma janela, onde este poderá escolher a directoria onde pretende guardar os dados.

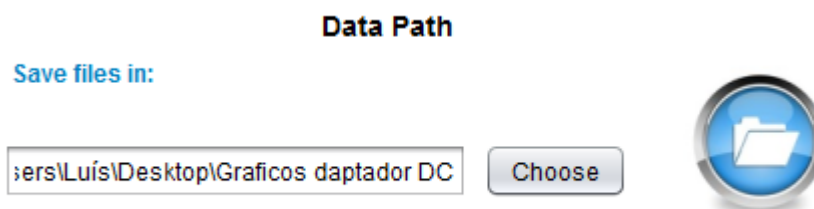


Figura 4.21 - Caminho de dados

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo são apresentados os testes realizados ao sistema bem como os seus resultados e estudo comparativo. Esses testes passaram por submeter os sensores a um teste simples acabando mais tarde em testes laboratoriais mais rigorosos em ambientes controlados. Foram também realizados testes de consumo e de alcance, de forma a avaliar a portabilidade e funcionalidade do sistema desenvolvido.

5.1 - Descrição dos Testes

Os testes de funcionamento do sistema foram efectuados gradualmente ao longo do desenvolvimento do mesmo. Assim, foram efectuados vários testes ao sistema e aos sensores de forma a se poder avançar para a fase final de testes realizada em laboratório. Optou-se por realizar um primeiro teste, que teve como objectivo expor cada sensor a um ambiente não controlado, com valores de concentrações desconhecidas, registando a resposta dos sensores. Para realizar este teste recorreu-se a uma garrafa de uma bebida alcoólica, a qual possibilitasse a inserção de um sensor dentro da mesma. A escolha de uma bebida alcoólica para a realização deste teste teve como base a presença de etanol na mesma, uma vez que o etanol pertence à classe dos VOCs. Este foi um teste meramente experimental, indicativo, mas necessário, para a avaliação da funcionalidade e operacionalidade do sistema desenvolvido, antes de se dar início à realização de testes num ambiente controlado em laboratório.

Um segundo teste foi realizado em laboratório, recorrendo a um câmara especial onde foram colocados os gases para teste com os valores de concentrações teóricas [31], temperatura, humidade e caudal de ar, dentro da mesma, conhecidos. Este teste teve a duração de quatro dias consecutivos.



Figura 5.1 - Câmara de testes

No primeiro dia foram realizadas leituras com a câmara em branco, ou seja, com a câmara livre de qualquer gás. A cada dia que passou foi adicionado um gás à câmara, sendo necessário deixa-la repousar durante 24 horas para estabilizar o ambiente dentro da mesma. Passadas essas 24 horas foram realizadas novas leituras e assim sucessivamente até ao quarto dia. Neste último dia estariam então presentes três tipos de gases diferentes com concentrações teóricas conhecidas. Nesta altura deu-se por terminado a fase de testes em laboratório.

5.2 - Dados e Resultados Obtidos Durante os Testes

Como já foi referido foram realizadas duas fases de testes e recolhidos dados da resposta de cada sensor. De seguida são apresentados esses dados que traduzem os resultados obtidos.

5.2.1 - Primeira fase de testes

Nesta fase cada sensor foi sujeito a um teste com a duração de 10 minutos ao longo do qual foram recolhidas leituras do valor do pino do ADC ao qual o sensor está ligado, e traçados gráficos com a evolução de cada sensor.

Os gráficos foram gerados pela aplicação para PC desenvolvida e guardados para análise. No eixo horizontal e vertical dos gráficos encontra-se respectivamente o número das leituras e os valores retornados pelos ADC.

De notar que nesta primeira fase foi usada uma garrafa de uma bebida alcoólica, logo está-se perante um ambiente não controlado.

5.2.1.1 - Sensor TGS2602

Como já foi referido, existiam dois sensores TGS2602. Logo foram realizados testes para cada um dos sensores para se poder verificar possíveis variações dos resultados em sensores iguais. Para se identificarem os sensores, estes foram denominados como sendo o TGS2602 nº1 e o TGS2602 nº2.

Para o TGS2602 nº1 foi utilizada uma resistência R_L de 620Ω e os resultados obtidos estão presentes na figura abaixo.

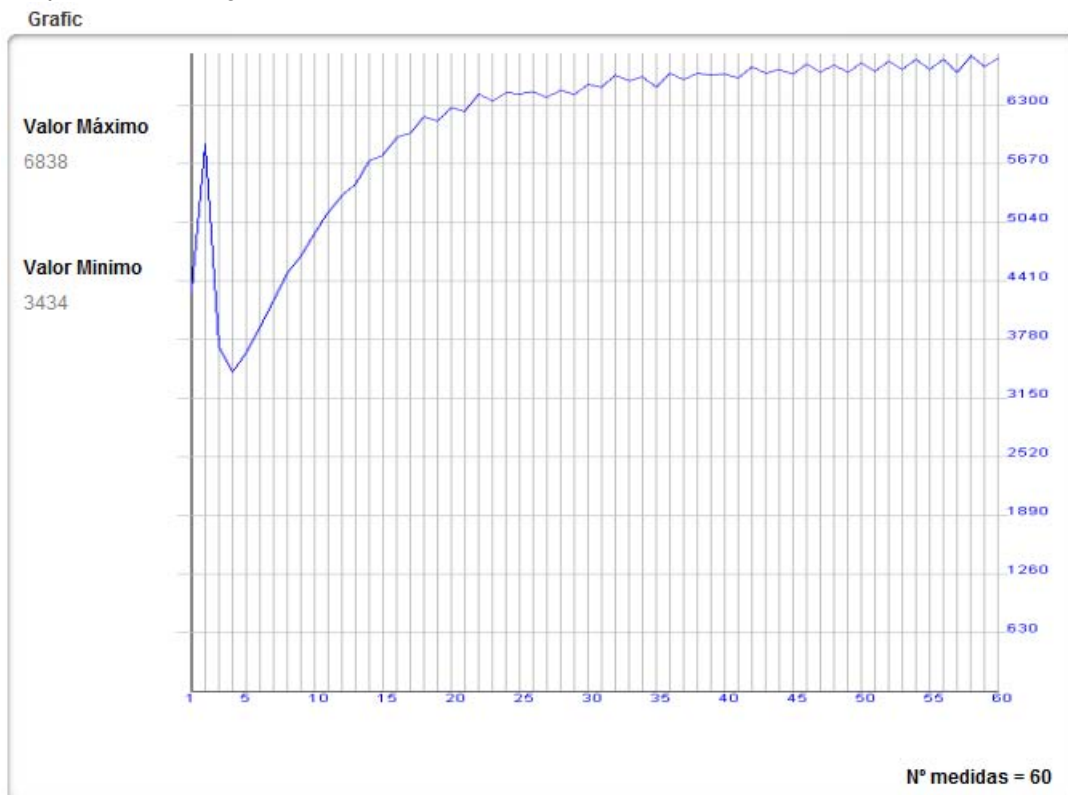


Figura 5.2 - Resultados Teste nº1 Sensor TGS2602 nº1

Como se pode verificar na figura anterior, o sensor não estabiliza ao fim de 10 minutos. Isto deve-se ao facto do sensor ter sido inserido dentro da garrafa e os testes serem realizados segundos depois. Ou seja, não houve tempo para o ambiente dentro da garrafa estabilizar verificando-se a concentração a aumentar ao longo do tempo.

Na figura é ainda visível um pico inicial nos valores lidos pelo ADC. Este pico inicial é típico nestes sensores denominando-se como “*Startup*”[19] ou arranque inicial, que ocorre durante o primeiro minuto e que deverá ser ignorado. A figura seguinte apresenta um teste com a duração de um minuto onde se pode verificar mais detalhadamente este fenómeno.

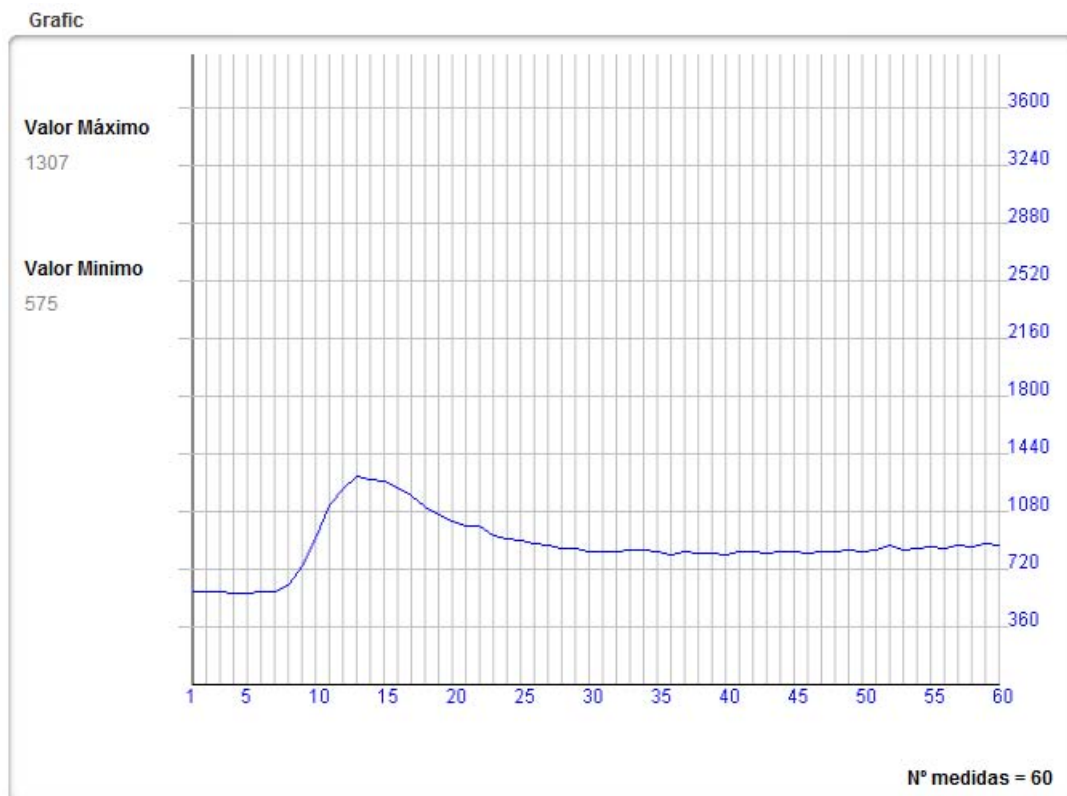


Figura 5.3 - Startup do Sensor TGS2602 nº1

Durante este teste foram recolhidas 60 leituras, que deram origem à curva apresentada na figura acima.

Já no caso do sensor TGS2602 nº2 usou-se uma resistência R_L de 510Ω. Isto deveu-se ao facto de não ter sido possível visualizar resultados durante o teste. Logo conclui-se que sensores do mesmo modelo podem ter comportamentos diferentes mesmo estando submetidos a ambientes iguais.

A figura abaixo apresenta os resultados obtidos para o TGS2602 nº2.

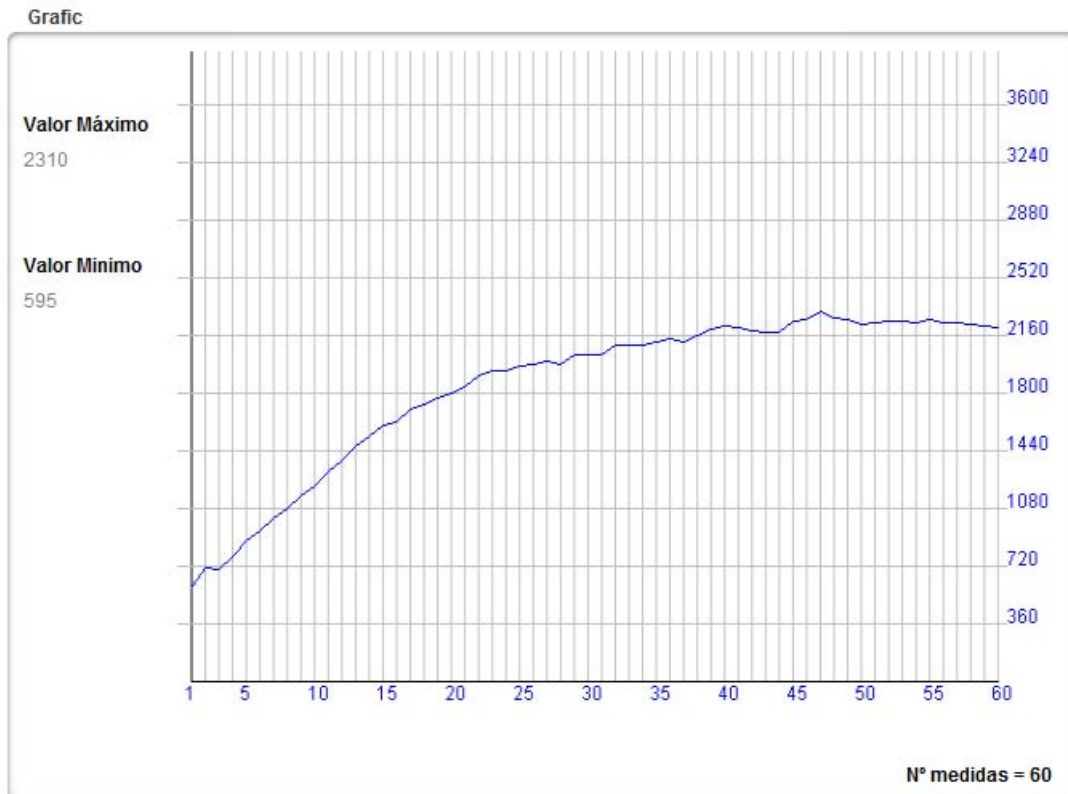


Figura 5.4 - Resultados Teste nº1 Sensor TGS2602 nº2

Como se pode verificar na figura acima, este sensor ao fim de 10 minutos começou a estabilizar. Assim, se conclui que o ambiente dentro da garrafa já estava praticamente estabilizado. Outro factor a ter em conta é o facto de o sensor ter permanecido dentro da garrafa durante mais tempo do que o sensor anterior, assim os níveis de concentração ao fim desse período de tempo já estavam quase estabilizados.

Também para este sensor foi realizado um teste de um minuto para se visualizar o “Startup” do mesmo.

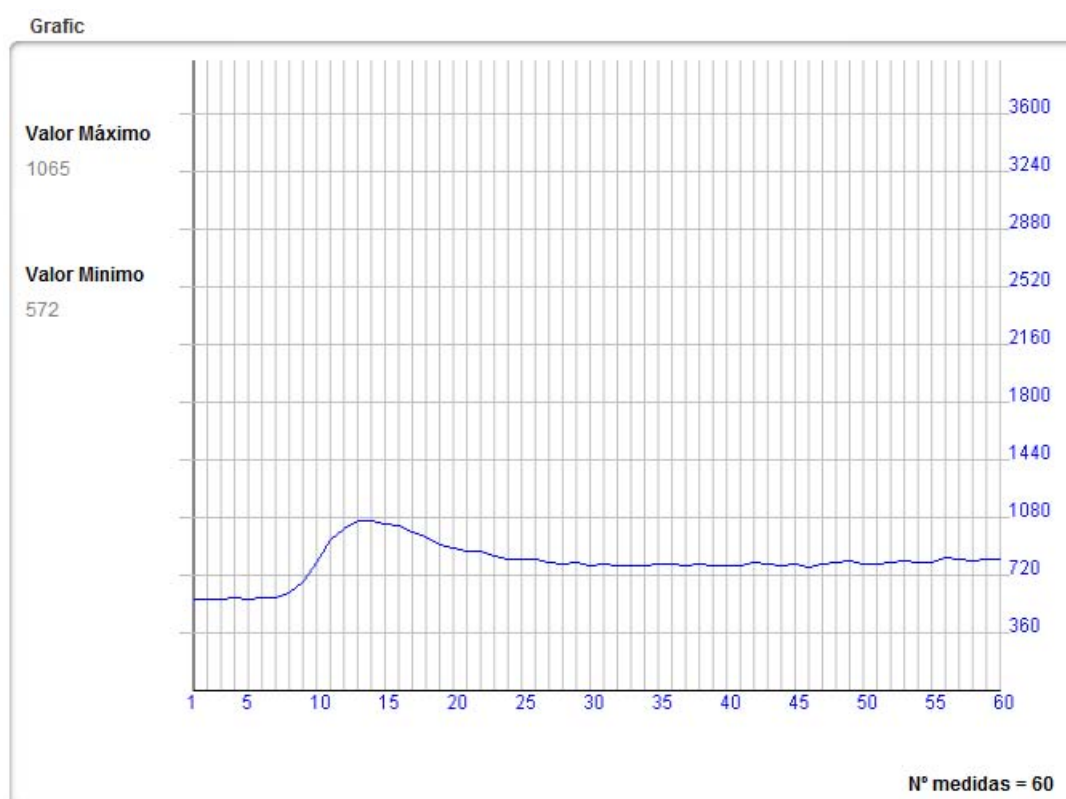


Figura 5.5 - Startup do Sensor TGS2602 n°1

5.2.1.2 - Sensor TGS2620

Para o TGS2620 foram seguidos os mesmos procedimentos do TGS2602 e recolhidos os resultados. Como se possui dois sensores TGS2620, para os distinguir estes foram nomeados por TGS2620 n°1 e TGS2620 n°2.

Para o TGS2620 nº1 foi utilizada uma resistência R_L de 1,8K Ω e os resultados obtidos foram os apresentados pela figura seguinte.

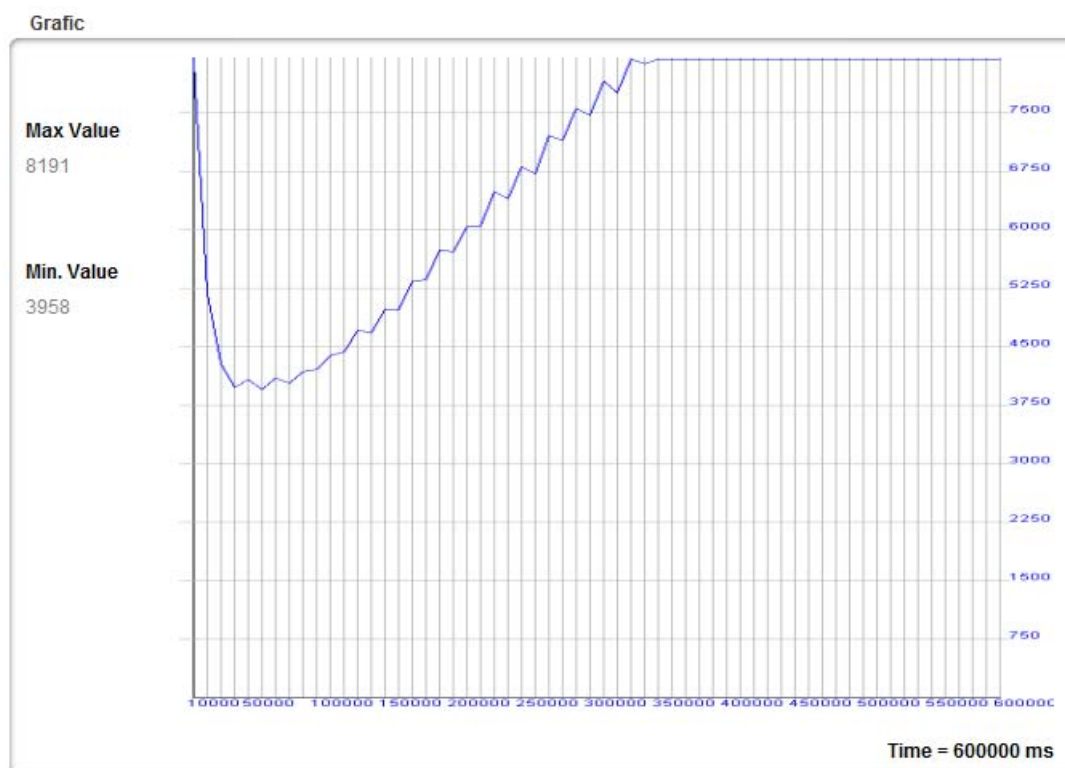


Figura 5.6 - Resultados Teste nº1 Sensor TGS2620 nº1

Como se pode verificar ao fim de aproximadamente 6 minutos de teste o valor da tensão lida pelo ADC atingiu o máximo não sendo possível verificar uma estabilização do sensor. O que provoca esta situação é o facto de o sensor e o microcontrolador usados serem alimentados a tensões diferentes. O sensor é alimentado a 5 volts e, por sua vez, o microcontrolador é alimentado a 3.3 volts. Isto faz com que caso o valor da queda de tensão na resistência R_L ultrapasse os 3.3 volts o ADC irá retornar o seu valor máximo, ou seja, para uma resolução de 14 bits o valor máximo será de 8191, como se pode verificar na figura acima.

Para corrigir esta situação deverá ser escolhida uma resistência R_L adequada para que isso não aconteça. Esta situação irá ser analisada mais adiante com maior detalhe.

Também este sensor possui uma fase inicial, a qual foi já denominada por “*Startup*”. Mas neste caso e devido ao facto do sensor e o microcontrolador serem alimentados a tensões diferentes, não foi possível visualizar com detalhe esse fenómeno uma vez que o ADC fica saturado durante o acontecimento referido.

Para o caso do sensor TGS2620 nº2 foi necessário usar uma resistência R_L de 690Ω . Logo como já se tinha verificado para o sensor TGS2602, sensores do mesmo modelo têm comportamentos diferentes quando sujeitos a condições de teste iguais. Ou seja a escolha do valor da resistência R_L é da maior importância para ser possível a visualização de resultados.

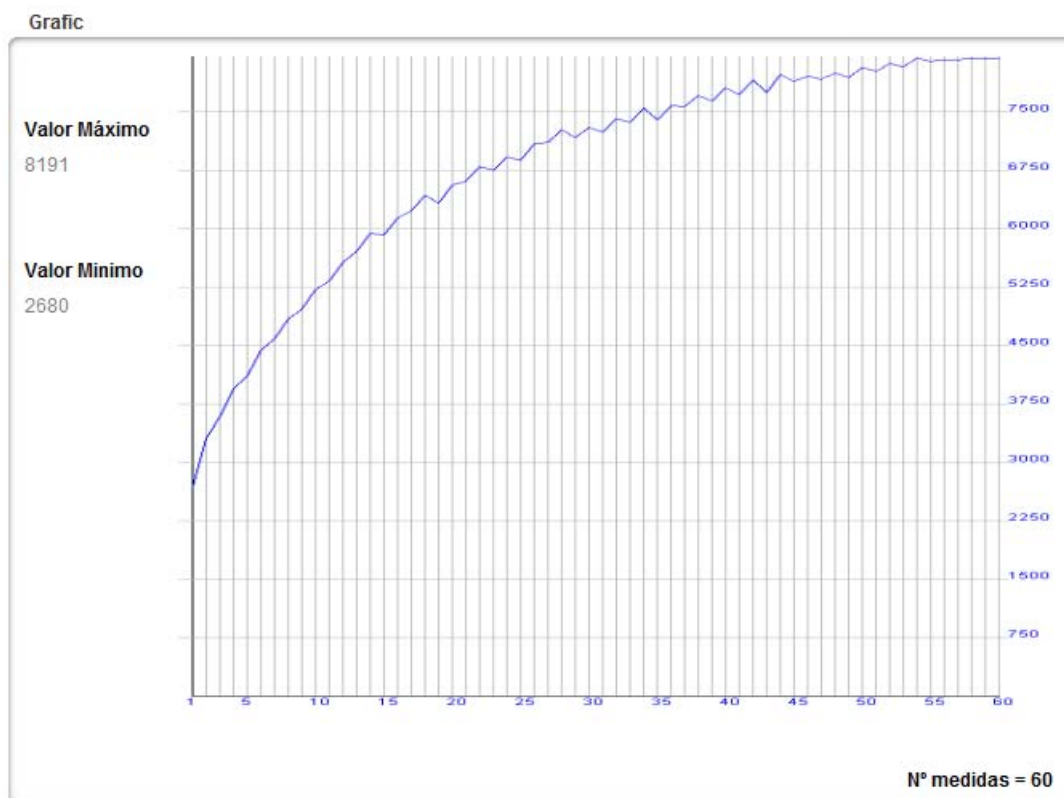


Figura 5.7 - Resultados Teste nº1 Sensor TGS2620 nº2

Como se pode verificar este sensor também satura o ADC, mas ao fim de um período de tempo superior ao do sensor TGS2620 nº1. Mais uma vez não foi possível verificar o “Startup” deste sensor pelos mesmos motivos já referidos para o sensor anterior.

5.2.1.3 - Conclusão

Com esta primeira fase de testes foi possível avaliar o sistema, de forma a corrigir qualquer erro de implementação que iria prejudicar e afectar de forma negativa a segunda fase de testes em laboratório. Os resultados obtidos até agora mostram que os sensores reagem quando submetidos a ambientes que contêm gases pertencentes à classe dos VOCs. Um bom exemplo disso é a curva inicial denominada por “Startup” que é bem visível nos testes realizados para o sensor TGS2602. Isto mostra que o sistema até este ponto estaria a ter um desempenho positivo.

Durante esta fase surgiu um problema relacionado com a escolha da resistência R_L , a qual não poderia ter o mesmo valor para todos os sensores testados. Assim, para cada sensor deveria ser escolhida uma resistência diferente, de maneira a ser possível a visualização dos resultados. Reparou-se ainda que o valor da resistência a usar varia com o valor da concentração presente no ambiente para teste. Esta verificação foi feita quando se trocou a garrafa utilizada nesta fase de testes por uma outra garrafa contendo também uma bebida alcoólica. Esta última garrafa estava praticamente cheia ao contrário da primeira, concluindo-se desta forma que as concentrações dentro da garrafa seriam diferentes. Assim, para ser possível a visualização de resultados houve a necessidade de alterar o valor das resistências para cada sensor, concluindo-se desta forma que o valor da resistência escolhida irá depender da concentração de gases presente no ambiente para teste.

Assim, terminada esta primeira fase e analisados os resultados obtidos, concluiu-se que estavam reunidas as condições para se prosseguir para a próxima fase, tendo em conta todos os factores que surgiram durante esta fase.

5.2.2 - Segunda Fase de Testes

A segunda fase de testes foi realizada num laboratório situado no edifício do INEGI com a ajuda da responsável pelo mesmo. Como já foi referido esta fase de testes teve a duração de quatro dias, ao longo dos quais foram feitas medições e registados os resultados das mesmas. Cada teste teve a duração de 10 minutos, recorrendo ao software para PC desenvolvido, usando a funcionalidade de leitura em tempo real. Ao longo de cada teste foram recolhidas 600 leituras as quais foram utilizadas para gerar os gráficos que foram posteriormente guardados para análise. Como os gráficos gerados possuem uma dimensão elevada, apenas se irão apresentar excertos dos mesmos. Em todos os gráficos apresentados, no eixo horizontal encontra-se o tempo das leituras em milissegundos e no eixo vertical o valor retornado pelo ADC.

Depois de realizados os testes com os sensores adquiridos, foram realizados testes com um dispositivo portátil da *Gray Wolf* TG-502 [20] e *Tenax*, descritos adiante.

O controlo do caudal de ar dentro da câmara era efectuado através da regulação do caudal de ar à saída do compressor, através de um rotâmetro *Cole-Parmer*, com escala de 0 a 7590 ml/min, e precisão de 0.25%. Parâmetros como a temperatura e humidade relativa (HR) foram monitorizados por meio de sensores apropriados colocados na parte superior da câmara. O sensor de temperatura e HR é um sensor capacitivo da Testo, com precisão de $\pm 2\%$ HR e $\pm 0.5\%$ °C.

5.2.2.1 - Gray Wolf TG-502

O dispositivo TG-502 da *Gray Wolf* é baseado num sensor do tipo PID e foi desenhado para a detecção de VOCs. Este vem acompanhado por um PDA (*Personal digital assistant*) o qual tem instalado o software de controlo do mesmo. Ou seja, para este sistema funcionar é necessária a ligação do dispositivo portátil ao PDA através de um cabo.



Figura 5.8 - Dispositivo Gray Wolf TG-502 [20]

Para a medição de gases dentro da câmara com este dispositivo, ligou-se um tubo proveniente de dentro da câmara a uma espécie de cúpula que encaixava na parte superior do dispositivo. Assim, desta maneira e com a circulação de ar dentro da câmara, o ar era encaminhado para dentro do dispositivo permitindo que este efectua-se as leituras.

As leituras com este dispositivo demoravam cerca de uma hora, pois era o tempo necessário para que este estabiliza-se e posteriormente eram registados os dados das leituras efectuadas pelo mesmo.

5.2.2.2 - Tenax

Este é o método utilizado que dá os resultados mais exactos possíveis das concentrações e gases presentes dentro da câmara. É um método complexo podendo ser realizado apenas em laboratório.

Assim, para realizar este teste é necessário seguir um procedimento que irá ser brevemente descrito de seguida.

Após uma fase de estabilização das condições da câmara, foi introduzido no seu interior um recipiente contendo m-Xileno, conferindo ao ar ambiente da câmara uma

determinada concentração de VOC. Seguidamente o ar da câmara é recolhido dentro de um tubo contendo *Tenax TA* através de amostragem activa. Na amostragem activa faz-se passar por um tubo empacotado com um adsorvente, um volume de ar conhecido, com um fluxo também conhecido. Para a análise dos VOCs recorreu-se a um sistema de desadsorção térmica seguindo-se uma pré concentração criogénica, de marca DANI, modelo SDT 33.50, acoplada ao cromatógrafo gasoso de marca Agilent Technologies, modelo 6890N, com um detector selectivo de massa (MSD 5973). No processo de desadsorção térmica das amostras, durante o período de aquecimento que teve a duração de 10 minutos, os tubos são atravessados por um fluxo de hélio que os transporta para um pré-concentrador que se encontra à temperatura de -35°C. A amostra é posteriormente aquecida a 300°C e transportada por um fluxo de hélio, através de uma linha de transferência aquecida a 250°C, para o injector do cromatógrafo. Após cada injeção, todo o sistema deve ser descontaminado por um fluxo de hélio em contracorrente (*backflush*) a uma temperatura 20°C superior à temperatura de injeção, de modo a minimizar riscos de contaminação entre amostras.

5.2.2.3 - Primeiro Dia

No primeiro dia foram efectuadas medições com a câmara em branco, ou seja, livre de gases. As imagens abaixo apresentam um excerto dos gráficos traçados para cada sensor já na parte final do teste. Como se pode verificar os resultados foram os esperados, ou seja, não foi detectado qualquer gás dentro da câmara.



Figura 5.9 - TGS2602 n°1 Câmara em Branco



Figura 5.10 - TGS2602 nº2 Câmara em Branco



Figura 5.11 - TGS2620 nº1 Câmara em Branco



Figura 5.12 - TGS2620 nº2 Câmara em Branco

Como se pode verificar, para todos os sensores, o valor retornado pelo ADC está estabilizado, em média, um pouco acima dos 540. Este valor corresponde a uma tensão de praticamente 0 volts. Uma vez que cada sensor foi previamente testado num ambiente sem a presença de VOCs, concluiu-se que num ambiente descontaminado, o valor retornado pelo ADC ronda os 540. Os resultados apresentados levaram a se concluir de igual maneira que não se está na presença de qualquer tipo de VOC.

Depois de realizados os testes com o sistema desenvolvido, foram então realizados os testes com o TG-502 e o *Tenax* e registados os resultados. Por último, foi adicionado à câmara um gás conhecido com uma concentração teórica também conhecida.

A temperatura registada no interior da câmara era de 24.5°C, a HR era de 31.9% e o caudal era de 250.3 dm^3/h .

5.2.2.4 - Segundo Dia

Passadas 24 horas após ter sido adicionado o gás para teste, deu-se início à nova fase de testes. O gás adicionado à câmara no dia anterior foi o Tolueno, com uma concentração teórica de 17.97 ppm [31]. Esta concentração encontra-se num valor muito acima da gama dos métodos de laboratório usados, como o *Tenax*, logo isto iria resultar num acumular de erros dos resultados obtidos por estes métodos. Como os sensores adquiridos apresentam uma gama de detecção entre os 1 e 30 ppm para o TGS2602 e os 50 e 5000 ppm para o TGS2620, optou-se por tentar obter concentrações, dentro da câmara, na gama de detecção do TGS2602, uma vez que a gama de detecção do TGS2620 não seria possível de obter.

Os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

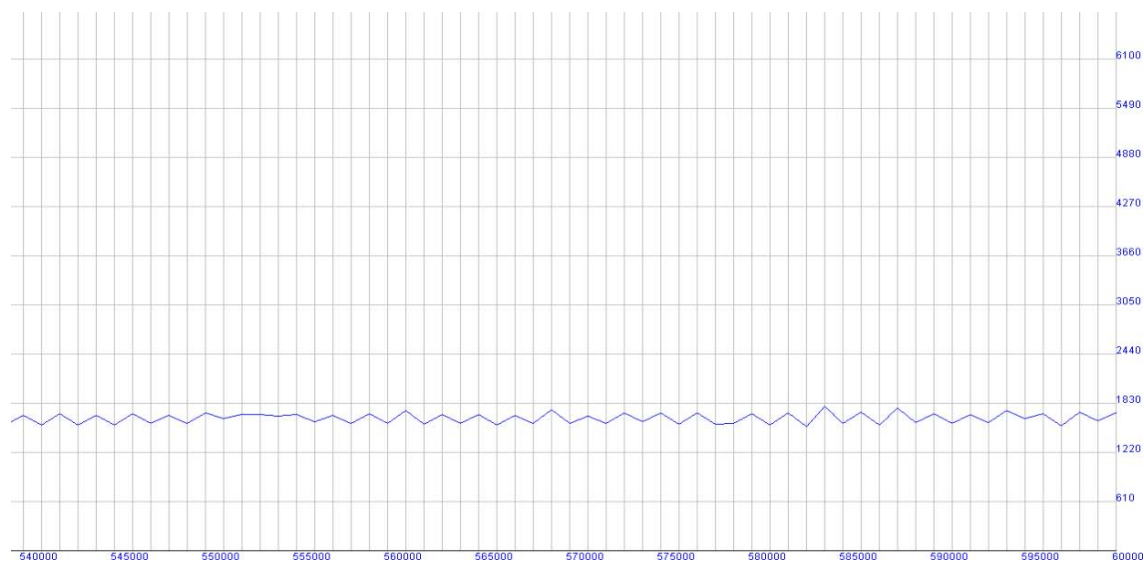


Figura 5.13 - TGS2602 nº1 Tolueno

Após os 10 minutos do teste, pode-se verificar que o sensor detectou um gás. Feita a média com os valores lidos pelo ADC durante o último minuto do teste, o resultado obtido foi de aproximadamente 1650.

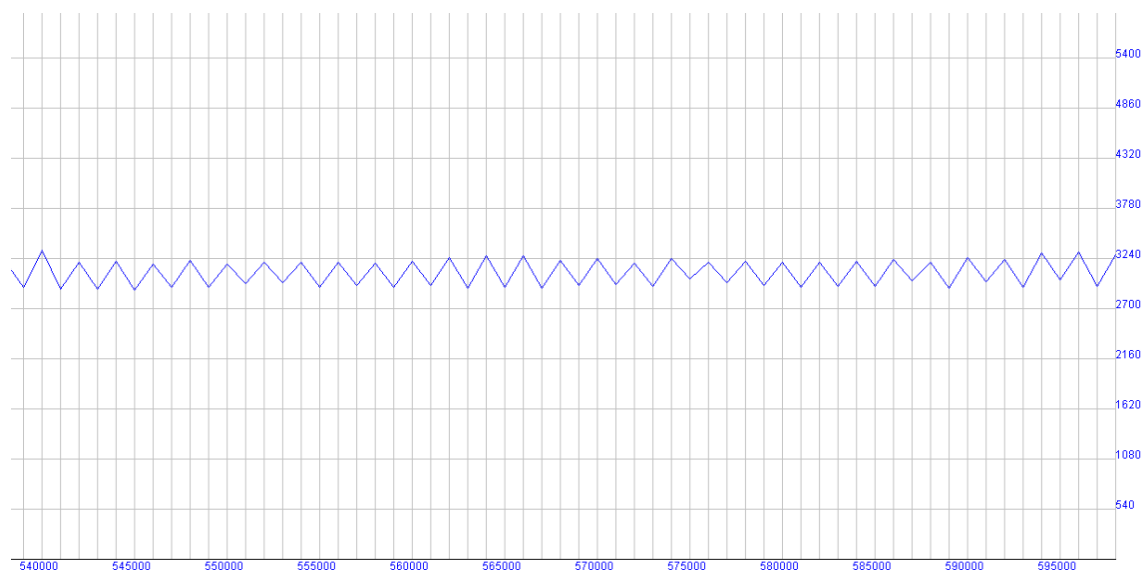


Figura 5.14 - TGS2602 nº2 Tolueno

Seguindo o mesmo procedimento tomado para o primeiro sensor, o valor obtido por este sensor foi de aproximadamente 3105.



Figura 5.15 - TGS2620 nº1 Tolueno

Para este sensor, continuando a seguir o mesmo procedimento tomado anteriormente, obteve-se aproximadamente o valor 883.



Figura 5.16 - TGS2620 nº2 Tolueno

Voltando ao mesmo procedimento já tomado para os outros sensores, o valor obtido, para este sensor, desta vez foi de aproximadamente 646.

Realizados os testes com os sensores adquiridos, foi a vez de se efectuarem os testes com o material do laboratório.

Os resultados obtidos para a concentração de VOCs Totais do *Tenax* foram de 15.15 ppm. Por sua vez o valor obtido através do sensor da *Gray Wolf* foi de 14.73 ppm. A temperatura registada foi de 24.7°C, a HR foi de 31.6% e o caudal era de 245.4 dm³/h.

Para poderem ser visualizados os resultados apresentados pelos sensores adquiridos, foi necessário usar uma resistência R_L de 100KΩ. A razão de isto acontecer poderá dever-se ao facto de a concentração dentro da câmara ser muito reduzida, para estes sensores, bem como a HR. A concentração máxima capaz de se conseguir atingir dentro da câmara ronda os 40 ppm. Estima-se que nos teste iniciais efectuados com uma garrafa, as concentrações fossem bastante superiores assim como o valor da HR. Os resultados demonstram que a concentração presente era de 15.15 ppm, que se encontra dentro da gama de concentrações que o sensor TGS2602 detecta, mas fora da gama de detecção de concentrações do sensor TGS2620.

Assim, como se pode verificar pelos resultados obtidos, os sensores TGS2620 foram capazes de responder à concentração de gases à qual foram sujeitos.

Por outro lado os sensores TGS2620 retornaram valores bastante mais baixos que os TGS2602. Conclui-se assim, que como o valor da concentração à qual foram sujeitos está fora da sua gama de detecção, os sensores não reagem da mesma maneira que os sensores TGS2602, como era de esperar, retornado um valor muito próximo de 540. Este valor, como já foi referido anteriormente, corresponde a uma leitura sem detecção de gases. Como na câmara havia uma baixa concentração de gases, para este tipo de sensores, e como essa concentração está fora da gama de detecção do sensor TGS2620, este teve uma reacção praticamente nula ao ambiente ao qual foi submetido.

Concluídos os testes, mais uma vez, foi adicionado um novo gás à câmara, deixando-a repousar durante 24 horas.

5.2.2.5 - Terceiro Dia

Ao terceiro dia dentro da câmara estavam presentes dois gases diferentes, o Tolueno e o novo gás adicionado no dia anterior, o Xileno. A concentração teórica do Xileno era de 7.66 ppm. Como no dia anterior havia uma concentração teórica de Tolueno de 17.97 ppm, a concentração teórica total dentro da câmara seria de 25.57 ppm.

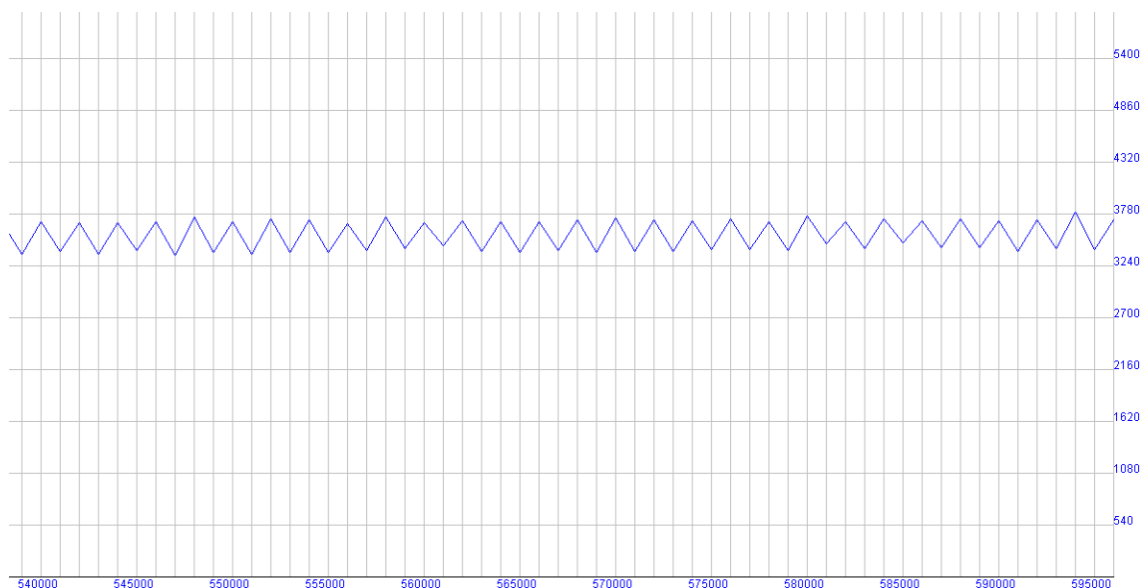


Figura 5.17 - TGS2602 n°1 Tolueno e Xileno

Adoptando o método tomado no dia anterior, o valor obtido para o primeiro teste foi de aproximadamente 3570.

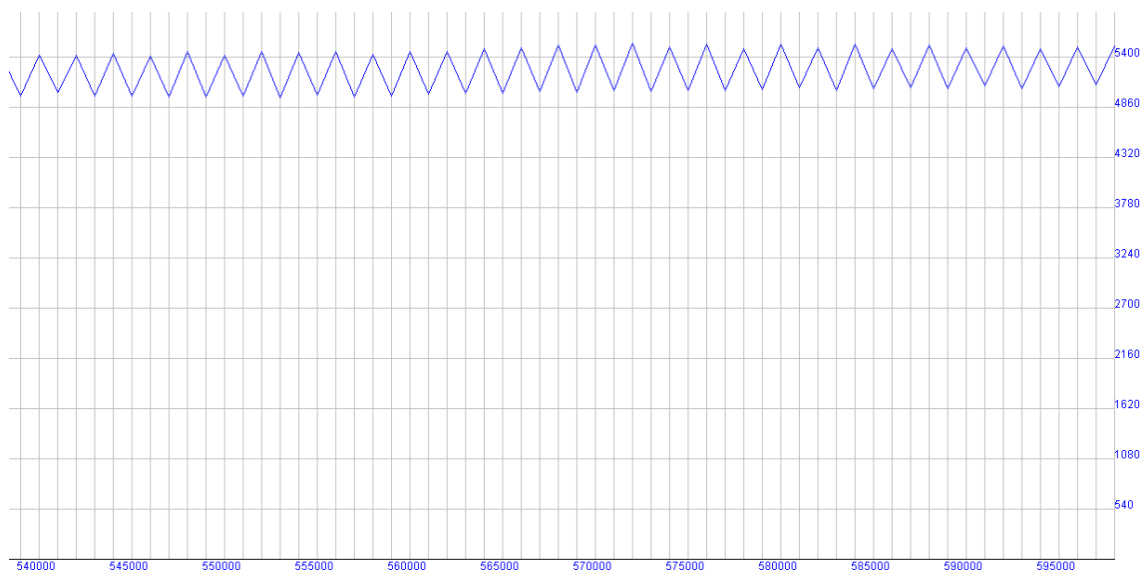


Figura 5.18 - TGS2602 n°2 Tolueno e Xileno

Retomando o mesmo procedimento para o sensor TGS2602 n°2 o valor obtido foi de aproximadamente 5286.



Figura 5.19 - TGS2620 nº1 Tolueno e Xileno

Para o sensor TGS2620 nº1, seguindo o mesmo procedimento, o valor obtido foi de aproximadamente 895.



Figura 5.20 - TGS2620 nº2 Tolueno e Xileno

Voltando ao procedimento já tomado, o valor obtido para o sensor TGS2620 nº2 foi de aproximadamente 682.

Depois de realizados os testes com o sistema desenvolvido, foram realizados os testes com material do laboratório.

A temperatura medida dentro da câmara era de 24.3°C, a HR era de 32.9% e o caudal era de 243.8 dm^3/h .

O teste do *Tenax* revelou que a concentração de Xileno, dentro da câmara, era de 2.80 ppm, muito abaixo do valor teórico calculado. O teste do *Tenax* revelou ainda que a concentração de Tolueno presente era de 8.00 ppm, ou seja, bastante inferior à registada no dia anterior. Feito isto a concentração total presente dentro da câmara era de 10.80 ppm. Como já foi referido anteriormente, o método do *Tenax* possui um acumular de erros devido ao facto de se estar a trabalhar com uma gama de concentrações acima do que este método permite. Por outro lado o valor teórico calculado deverá ser o valor mais próximo da realidade, embora afectado de um erro por excesso que não deve ultrapassar os 10%.

Os testes com o sensor da *Gray Wolf* revelaram que a concentração dentro da câmara, tanto para o Tolueno como para o Xileno, era de 14.70 ppm, o que daria um total de 29.40 ppm. Como o Tolueno e o Xileno são dois gases praticamente iguais verifica-se que este sensor não consegue distinguir um gás do outro. Logo a concentração total dentro da câmara não seria certamente de 29.4 ppm, o que daria um valor de superior ao teórico calculado, que era de 25.57 ppm.

Assim, comparando com os resultados obtidos no dia anterior, houve um aumento na concentração teórica total do segundo dia para o terceiro dia, de 17.97 ppm para 25.57 ppm. Aplicando um erro de 10% aos valores teóricos, obtém-se uma concentração de 16.17 ppm e 23.01 ppm respectivamente no segundo e terceiro dia. Isto resulta num aumento de 42.3% na concentração total do segundo dia.

Analisando os resultados obtidos pelos sensores adquiridos chegou-se à tabela abaixo.

Tabela 5.1 - Comparação de resultados ao fim do terceiro dia

Sensor	Dia 2	Dia 3	Diferença (%)
Calculo Teórico	16.17 ppm	23.01 ppm	+42.3%
TGS2602 nº1	1650	3570	+116.4%
TGS2602 nº2	3105	5286	+70.2%
TGS2620 nº1	883	895	+1.4%
TGS2620 nº2	646	682	+5.6%

Como se pode verificar na tabela acima, houve um aumento bastante significativo nos valores obtidos para os sensores TGS2602. Por outro lado os valores obtidos pelos sensores TGS2620 foram praticamente nulos. Estes últimos resultados eram de esperar uma vez que ainda se está fora da gama de detecção destes sensores, daí estes sensores praticamente não terem reagido.

No que toca aos resultados dos sensores TGS2602, conclui-se que estes respondem de maneira diferente à mesma variação de concentração. Como se pode verificar na tabela acima, o sensor nº1 teve uma maior variação do primeiro para o segundo teste em comparação com o sensor nº2. Mais uma vez se confirma e se verifica, que sensores do mesmo modelo podem ter respostas diferentes quando expostos a ambientes iguais.

5.2.2.6 - Quarto Dia

Ao quarto dia estavam presentes dentro da câmara três gases diferentes, o Tolueno, o Xileno e, adicionado no dia anterior, o Octano. Os cálculos revelam que a concentração teórica de Octano dentro na câmara era de 12.27 ppm. Assim, o valor teórico da concentração total dentro da câmara seria de 37.84 ppm.

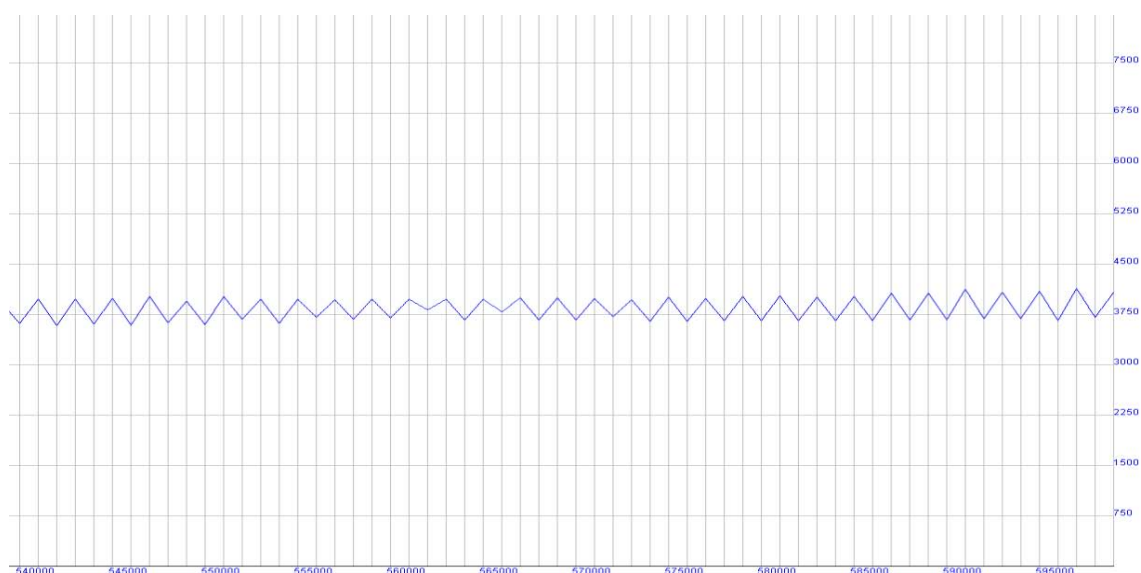


Figura 5.21 - TGS2602 nº1 Tolueno, Xileno e Octano

Para a mistura dos três gases, voltando ao método usado anteriormente, o valor obtido para este sensor, foi de aproximadamente 3880.

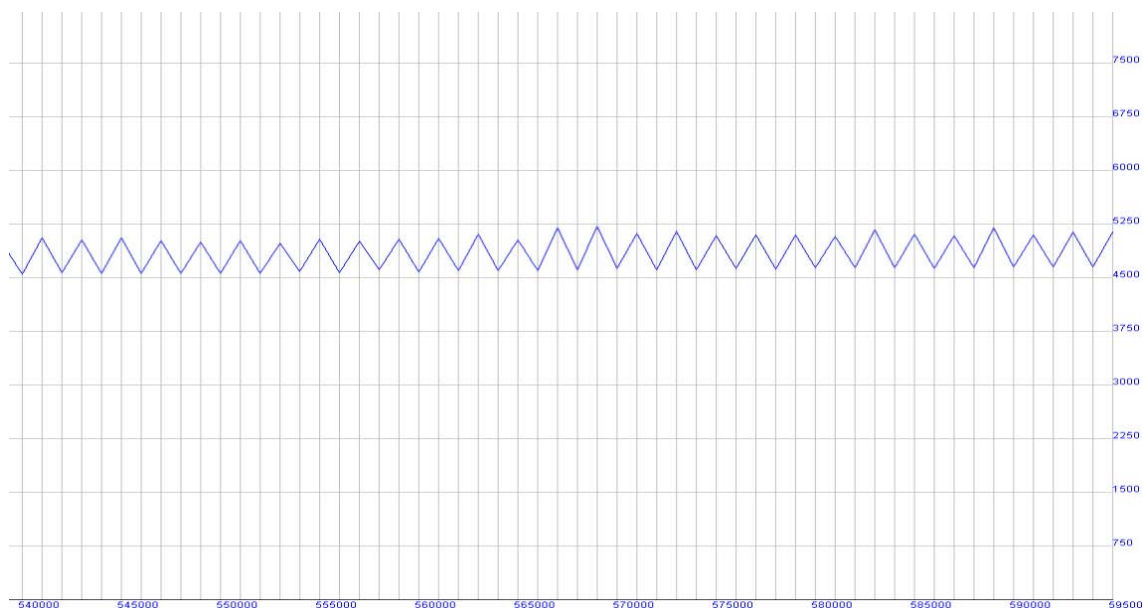


Figura 5.22 - TGS2602 n°2 Tolueno, Xileno e Octano

Após o teste ao sensor TGS2602 n°2 o valor obtido foi de aproximadamente 4874.

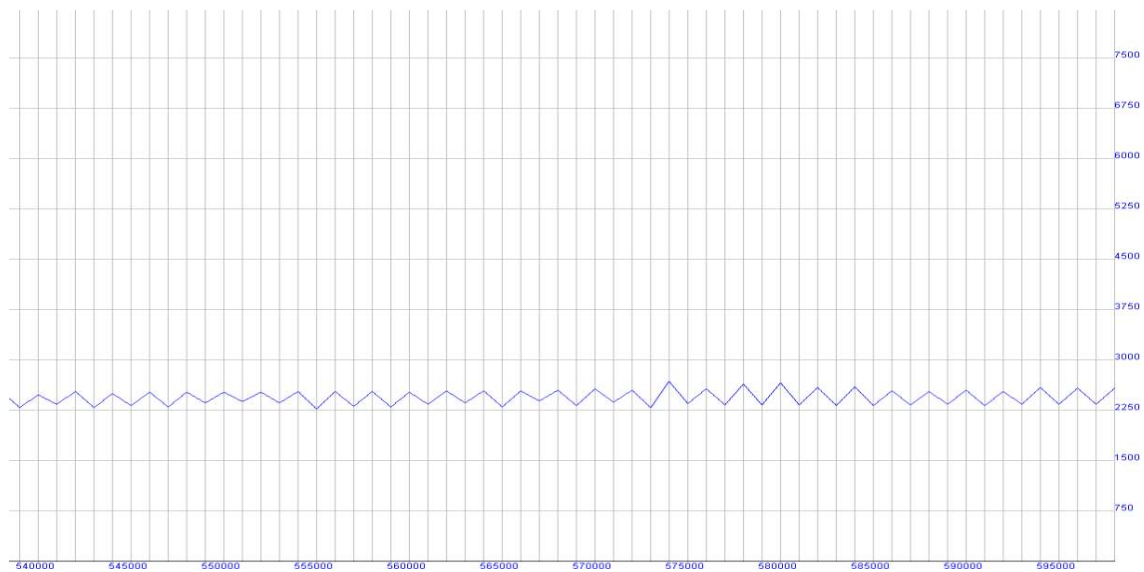


Figura 5.23 - TGS2620 n°1 Tolueno, Xileno e Octano

No final do teste ao sensor TGS2620 n°1, o valor obtido foi de aproximadamente 2442.



Figura 5.24 - TGS2620 nº2 Tolueno, Xileno e Octano

Finalizado o teste para o sensor TGS2620 nº2, o valor obtido foi de aproximadamente 1207.

Terminados os testes com os sensores adquiridos, foram realizados os testes com o material do laboratório.

A temperatura registada no interior da câmara era de 24.5°C, a HR era de 35% e o caudal era de 242.2 dm^3/h .

O teste do *Tenax* resultou num valor para a concentração de Octano de 3.57 ppm, mais uma vez muito inferior ao valor teórico calculado. Este mesmo teste revelou que a concentração de Tolueno dentro da câmara era nula, correspondendo à realidade. Isto deveu-se ao facto do Tolueno se ter evaporado na sua totalidade durante as 24 horas que passaram. Logo o valor da concentração total dentro da câmara iria ser completamente diferente do valor teórico inicialmente calculado. Este mesmo teste revelou que as concentrações de Xileno e Octano eram respectivamente 2.73 ppm e 3.57 ppm as quais dariam um total de 6.30 ppm. Mais uma vez os resultados obtidos pelo *Tenax* foram muito inferiores aos valores teóricos, revelando ser um teste muito pouco fiável para a gama de concentrações usada.

Como já não existia Tolueno no quarto dia de testes, calculou-se um novo valor para a concentração teórica ignorando a presença do Tolueno, obtendo-se o valor de 19.93 ppm. Aplicando um erro de 10% ao valor da concentração teórica, obtém-se uma concentração teórica total de 17.94 ppm, a qual será a concentração mais próxima do real.

Por sua vez o teste com o sensor da *Gray Wolf* obteve-se uma concentração de 12.49 ppm para o Xileno e uma concentração de 49.57 ppm para o Octano. O total da concentração daria então o valor de 62.06 ppm, o que é um valor muito superior ao valor teórico calculado. Assim, conclui-se que o sensor da *Gray Wolf* perante o Octano reage de uma forma agressiva

retornando valores de concentrações excessivamente elevados e que não correspondem à realidade.

Como já se pôde verificar, no quarto dia de testes houve uma diminuição da concentração em relação ao dia anterior. No dia anterior a concentração teórica era de 23.01 ppm e de 17.49 ppm no quarto dia, já com um erro de 10% associado. Isto corresponde a uma diminuição de 23.98% na concentração total registada no dia anterior.

Os resultados obtidos pelos sensores adquiridos deram origem à tabela abaixo.

Tabela 5.2 - Comparação de resultados ao fim do terceiro dia

Sensor	Dia 3	Dia 4	Diferença (%)
Calculo Teórico	23.01 ppm	17.49 ppm	-23.98%
TGS2602 nº1	3570	3880	+3.63%
TGS2602 nº2	5286	4874	-7.79%
TGS2620 nº1	895	2442	+172.85%
TGS2620 nº2	682	1207	+76.98%

Analisando os resultados apresentados pela tabela acima, verificou-se que o único sensor que apresentou valores inferiores aos do dia anterior foi o TGS2602 nº2. O sensor TGS2602 nº1 apresentou um pequeno aumento dos seus valores lidos. Ainda assim a variação dos valores registados para estes dois sensores foi baixa, não ultrapassando os 8%, quando houve uma variação de quase 24% na concentração total. Como se está na presença de uma mistura de dois tipos de gases diferentes, ao contrário do que aconteceu no terceiro dia, isto influencia a resposta dos sensores, daí a razão de terem sido obtidos o resultados apresentados.

No que toca aos sensores TGS2620, houve um aumento muito significativo nos resultados obtidos, mesmo estando na presença de uma concentração inferior à do terceiro dia. Conclui-se mais uma vez que a presença do Octano influencia a resposta dos sensores, pois este é um gás muito diferente do Tolueno e o Xileno.

5.2.3 - Conclusão

Terminados os testes e analisados os resultados, chegou-se à conclusão que os tipos de sensores por nós adquiridos estão desenhados para a medição de níveis de concentrações já consideradas elevados, onde em laboratório nem sempre é possível atingir tais níveis.

Como se pode verificar os valores dos resultados das medições efectuadas pelos sensores adquiridos não vêm em unidades de concentração, em vez disso é apresentado o valor retornado pela leitura do ADC. Isto deve-se ao facto de não ter sido possível efectuar a

devida calibração de cada sensor, uma vez que esse é um processo complexo, o qual não poderia ter sido efectuado na faculdade, mas sim num laboratório industrial devidamente preparado para o efeito. Assim, optou-se por analisar as diferentes respostas dos diferentes sensores, recorrendo aos valores retornados pela leitura do ADC do microcontrolador.

Conseguiu-se desta forma demonstrar o funcionamento dos mesmos, verificando uma alteração dos valores retornados pelo ADC, consoante as concentrações e tipos de gases aos quais estavam expostos. A figura seguinte apresenta um gráfico onde é possível visualizar a variação dos valores do ADC a longo dos quatro dias de testes.

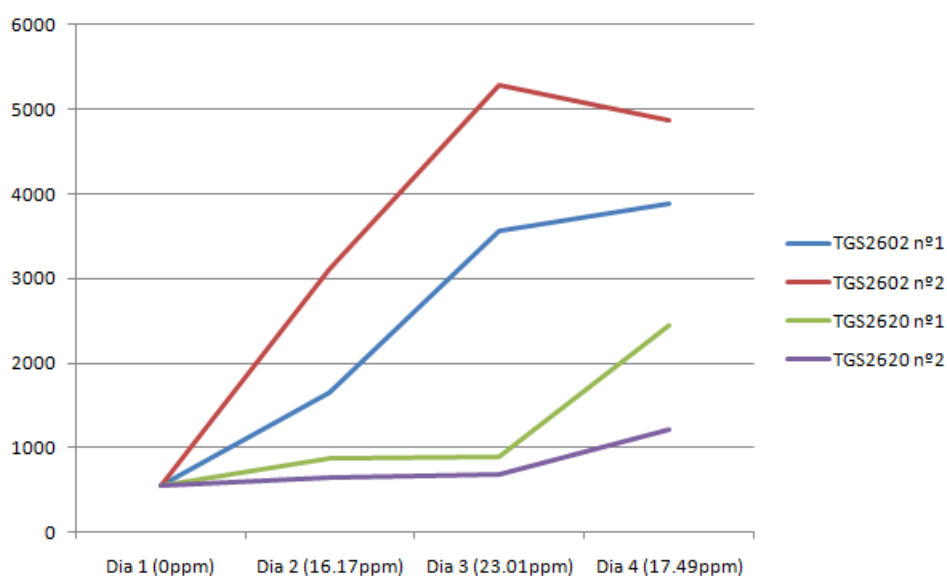


Figura 5.25 - Evolução dos sensores ao longo dos dias

Analisando a figura acima conclui-se que com aumento da concentração, os valores lidos pelo ADC também aumentam, para todos os sensores, à excepção do quarto dia, mas não de forma linear. No quarto dia estavam apenas presentes na câmara dois gases, o Xileno e o Octano. Isto deveu-se, como já foi referido, ao facto de o Tolueno se ter evaporado, o que resultou na diminuição do valor da concentração total de gases dentro da câmara. Esperava-se então que os valores obtidos no quarto dia fossem aproximadamente idênticos aos valores obtidos no terceiro dia, mas isso não aconteceu. Pelo contrário, os valores obtidos foram superiores aos adquiridos no terceiro dia e mesmo no quarto dia, à excepção do sensor TGS2602 n°1, que apresentou valores inferiores aos do terceiro dia. Isto levou à conclusão e confirmação de que os sensores reagem de maneira diferente a diferentes tipos de gases. Como o Tolueno e o Xileno são gases idênticos houve um aumento dos valores lidos para todos os sensores no terceiro dia. Visto que o Octano é um gás diferente dos mencionados anteriormente, a reacção dos sensores a este gás, ou à mistura dos gases presentes (Tolueno e Xileno), é também diferente. Isto resultou num aumento significativo dos valores obtidos

pelos sensores TGS2620, mesmo ainda estando fora da gama de concentrações que estes detectam. Já no caso dos sensores TGS2602, resultou numa baixa variação dos seus valores.

Como já foi referido anteriormente a resistência R_L usada nestes testes foi de 100K Ω ao contrário do que aconteceu na primeira fase de testes, onde se usaram resistências de, no máximo, 1.8K Ω . Isto deveu-se ao facto de se estar perante ambientes totalmente diferentes. Estima-se que no primeiro ambiente de testes, as concentrações eram bastante superiores às usadas no laboratório bem como os níveis de HR. Segundo o apurado pela documentação dos sensores, o fabricante dos mesmos, não assegura o bom funcionamento destes, com níveis de HR inferiores a 40%. Durante os testes no laboratório os níveis de HR atingidos foram no máximo de 35% já no último dia.

Em relação ao dispositivo portátil da *Gray Wolf*, verificou-se que, mesmo tratando-se de um sensor do tipo PID, este não é muito preciso nem fiável. Os resultados obtidos demonstram que este sensor obteve valores de concentrações quase sempre superiores aos valores teóricos calculados, resultando em leituras erradas. Os sensores PID são conhecidos por permitirem a distinção de gases, conseguindo mesmo determinar a concentração de um determinado gás inserido numa mistura de concentrações de gases. Após a realização dos testes conclui-se que essa distinção nem sempre funciona, uma vez que, este sensor confundiu o Tolueno e o Xileno, dando o mesmo valor para a concentração dos dois gases, quando na realidade as concentrações eram bastante diferentes. No que toca à detecção do Octano, este sensor obteve valores da concentração, muito superiores à realidade, induzindo o utilizador em erro.

Para realizar cada teste com este dispositivo, era necessário deixa-lo estabilizar durante uma hora, ou seja, só passado esse tempo é que se poderiam obter resultados. O que é um ponto negativo quando se pretende uma análise rápida de um local possivelmente contaminado.

Assim, conclui-se que este tipo de dispositivos portáteis, independentemente da sua tecnologia, possui uma baixa precisão e na grande maioria das situações, é necessário uma longa espera para serem obtidos alguns resultados. Conclui-se ainda que estes tipos de sensores testados apenas dão uma ideia geral da presença de gases no ambiente em teste, bem como da concentração aproximada dos mesmos. Estes sistemas deverão apenas ser usados em situações onde não se procura realizar detecção de gases individuais, mas sim o valor aproximado de uma concentração total. Um bom exemplo de aplicação, seria a implementação de alarmes, sonoros ou luminosos, que iriam disparar caso se ultrapassasse um determinado nível, de concentração de gases, pré definido. Posteriormente seria então feita uma análise mais rigorosa, recorrendo a métodos mais precisos, para apurar se os níveis

de concentração detectados são motivo para alarme ou perigosos para a saúde humana, uma vez que os métodos estudados não permitem a obtenção de resultados exactos.

5.3 - Estudo do consumo energético

Sendo o sistema desenvolvido composto por dois dispositivos, um dos quais portátil e alimentado por baterias, houve uma preocupação com os consumos energéticos por parte do último. Como o dispositivo portátil é único dispositivo do sistema alimentado por baterias, este foi o único dispositivo sujeito ao estudo do consumo energético.

Para calcular a corrente consumida, foi usada uma resistência de 10Ω em série entre a bateria e o dispositivo portátil, e medida de seguida a queda de tensão na resistência de 10Ω . Posteriormente, sabendo a queda de tensão na resistência de 10Ω e recorrendo à lei de Ohm, $I = \frac{V}{R}$, calculou-se a corrente consumida pelo dispositivo portátil em diversas situações.

Assim, chegou-se aos resultados apresentados pela tabela abaixo.

Tabela 5.3 - Consumo energético

Função activa	Consumo (mA)
Leituras com TGS2602	74
Leituras com TGS2620	64
Idle (em espera)	16

Analisando a tabela acima, verifica-se que os diferentes modelos de sensores apresentam consumos diferentes, confirmando desta forma as especificações do fabricante que revelam, que o modelo TGS2602 consome mais energia do que o modelo TGS2620.

Durante a concepção do sistema foi usada como fonte de alimentação, do dispositivo portátil, uma bateria de 9 volts, com uma capacidade de 150mAh. A tabela a seguir mostra os resultados dos cálculos da duração da bateria para as diferentes situações já consideradas anteriormente.

Tabela 5.4 - Duração aproximada de uma bateria 9V, 150mAh

Função activa	Duração da bateria
Leituras com TGS2602	≈2h
Leituras com TGS2620	≈2h.20min
Idle (em espera)	≈9h.22min

Os resultados apresentados pela tabela anterior, mostram que o uso de uma bateria de 9V com uma capacidade de 150mAh não será o ideal para este sistema uma vez que esta tem uma duração, no pior caso, de aproximadamente 2 horas.

O motivo do uso de uma bateria deste género deveu-se ao facto de o sistema ter que ser alimentado a pelo menos 5 volts. Como não havia, no mercado de consumo, baterias de 5 volts que se encaixassem nas especificações do sistema optou-se por esta solução, pois desta forma apenas era necessária uma pequena bateria 9 volts, que facilmente se encontra à venda em qualquer superfície comercial.

Uma possível solução para este problema seria adoptar outro tipo de baterias com maior capacidade, como por exemplo, 4 baterias do tipo AA com 1.5 volts e 1200mAh de capacidade, em série. Este tipo de baterias é também muito comum de encontrar no mercado. A conjugação em série das 4 baterias resultava numa tensão de alimentação de 6 volts e uma capacidade total de 4800mAh. Refazendo os cálculos para esta possível solução obteu-se a tabela abaixo.

Tabela 5.5 - Duração do conjunto de 4 baterias AA, 1200mAh

Função activa	Duração da bateria
Leituras com TGS2602	≈2d.16h
Leituras com TGS2620	≈3d.3h
Idle (em espera)	≈12d.12h

Desta forma atinge-se uma autonomia já aceitável, sendo mesmo superior à autonomia da grande maioria das soluções apresentadas por várias empresas já mencionadas no Capítulo 1.

5.4 - Teste de alcance

Para testar o alcance do sistema desenvolvido, foi criado um modo de teste, o qual consiste em enviar 1000 pacotes de dados, em intervalos de 500ms, entre o módulo Coordenador e o Dispositivo portátil.

Os testes realizados consistiram em colocar os dispositivos num local onde não houvesse grande actividade de redes a operar na banda dos 2.4Ghz, evitando possíveis interferências entre as mesmas, e ir aumentando a distância entre eles no final de cada teste. Inicialmente colocaram-se os dispositivos a uma distância de 5m um do outro, e no final de cada teste, aumentaram-se as distâncias, em incrementos de 5m, até aos 25m. Os testes foram realizados com antena externa mas também sem ela.

Os resultados dos testes podem ser analisados na tabela seguinte.

Tabela 5.6 - Resultados do teste de alcance nº 1

Distância em metros	Nº de erros c/antena	Nº de erros s/antena
5	0	0
10	0	0
15	0	0
20	0	0
25	149	343

Como se pode verificar na tabela acima, não ocorreram quaisquer erros até aos 20m de distância em nenhuma das situações. A partir dos 25m começaram a surgir erros na transmissão tanto com antena externa como sem ela.

Para se saber com maior detalhe a que distância, dentro dos intervalo de 20 a 25 metros, começam a surgir erros, foi realizado um segundo teste para as distâncias compreendidas no intervalo de 21 até 24 metros. Os resultados são os apresentados na tabela seguinte.

Tabela 5.7 - Resultados do teste de alcance nº 2

Distância em metros	Nº de erros c/antena	Nº de erros s/antena
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	105

Como se pode verificar na tabela acima só começam a surgir erros a uma distância de 24 metros, quando não se usa a antena externa. Com o uso da antena não se verificam quaisquer erros até aos 24 metros inclusive.

De notar que durante o teste para a distância de 25 metros, onde se recorreu ao uso da antena externa, ocorreram menos de metade dos erros do que quando não se recorreu ao uso da mesma. Isto demonstra que se obtém um melhor rendimento quando se opera com a antena externa. Verifica-se também que a antena embutida no módulo RC2300AT apresenta um bom rendimento até aos 23m, dispensando o uso da antena externa até essa distância.

5.5 - Interferências com redes IEEE802.11

Como é típico hoje em dia, existem redes IEEE802.11 espalhadas por inúmeros espaços, principalmente dentro de edifícios, que podem provocar interferências com a

comunicação *ZigBee* do sistema desenvolvido. Para se perceber até que ponto a existência de uma rede a operar à mesma frequência do sistema desenvolvido poderá afectar a comunicação do mesmo, foi realizado um teste. Esse teste teve como objectivo escolher um canal da rede *ZigBee* que estivesse sobreposto com um canal de uma rede IEEE802.11.

Analisando a figura abaixo pode-se ver que existem vários canais da rede *ZigBee* que se sobrepõem aos canais de uma rede IEEE802.11.

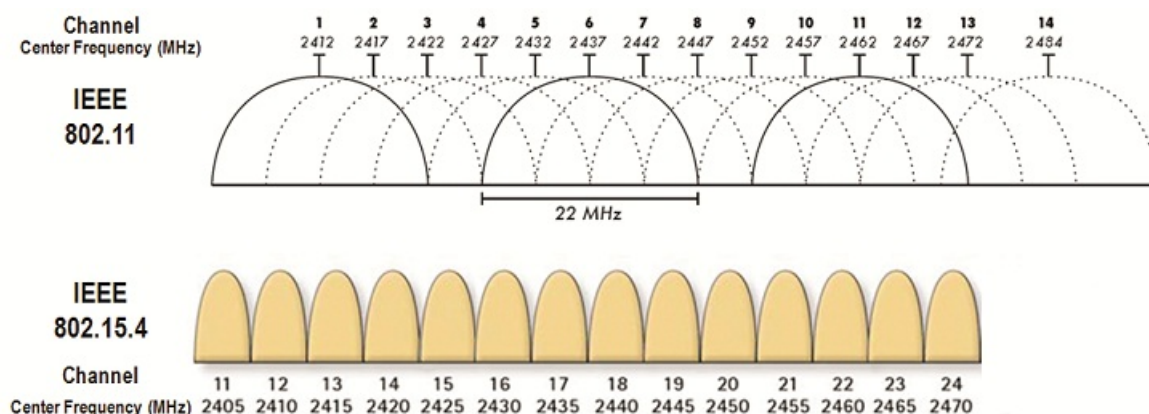


Figura 5.26 - Frequência de operação dos canais IEEE802.11 e IEEE802.15.4 [21]

Assim, optou-se por escolher o canal 11 da rede IEEE802.11 e o canal 22 da rede IEEE802.15.4. De seguida os dois dispositivos, Coordenador e dispositivo portátil, foram separados a uma distância de 3 metros. O Dispositivo portátil foi colocado próximo de um router sem fios a operar no canal 11 da rede IEEE802.11, estando o último em constante actividade de maneira a simular o pior caso. Os resultados obtidos foram os apresentados pela tabela seguinte.

Tabela 5.8 - Resultados do teste da interferência de redes IEEE802.11.

Teste nº	Nº de erros
1	214
2	205
3	224
4	213
Média	214

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que de facto as redes IEEE802.11, quando operam num canal sobreposto a um canal de uma rede *ZigBee*, provocam interferências prejudiciais à comunicação entre dispositivos *ZigBee*.

Conclui-se que desta forma é perdido um número significativo de informação, que irá deteriorar o bom funcionamento do sistema desenvolvido e que se deverá evitar ao máximo o uso de canais que operem em frequências próximas das redes IEEE802.11. Os canais 15, 20, 25 e 26, são um bom exemplo de possíveis canais a serem usados, para evitar qualquer tipo de interferência com redes IEEE802.11.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalho Futuro

Devido à corrente preocupação com a qualidade do ar ambiental nos diversos meios fabris, habitacionais, de lazer, entre outros, e à crescente libertação de VOCs para a atmosfera ambiente, à qual estamos expostos diariamente, esta dissertação teve como objectivo desenvolver um dispositivo remoto e portátil, que permitisse a monitorização de VOCs em tempo real, o armazenamento de dados em memória local para posterior envio, para uma central local com comunicação sem fios *ZigBee*, e consequente tratamento de dados.

Inicialmente foi feito um estudo acerca dos VOCs, que permitiria perceber que tipo de gases são estes e quais os ambientes propícios de estes serem encontrados. Concluiu-se que estes gases são nocivos para os sistemas biológicos, a curto e longo prazo, mesmo em baixas concentrações, sendo alguns deles classificados como cancerígenos e mutagénicos. A presença destes gases é mais comum em ambientes fechados, sendo os ambientes industriais os locais mais comuns de os encontrar [12].

Após isto deu-se início à pesquisa e ao estudo das diferentes tecnologias de sensores para a detecção deste tipo de gases, concluindo-se que existem algumas tecnologias baseadas em diferentes conceitos. Feito isto iniciou-se um outro estudo, mas desta vez virado para o mercado de oferta de sensores das várias tecnologias. Aqui enfrentaram-se os primeiros contratempos, pois não foi possível adquirir vários sensores de tecnologias diferentes, devido em parte à limitada oferta no mercado de sensores de determinadas tecnologias, como por exemplo os sensores PID, mas também ao facto de muitos fabricantes não terem representantes europeus tornando o processo de aquisição moroso e dispendioso. Assim, foram adquiridos dois tipos de sensores diferentes, mas baseados na mesma tecnologia, e do mesmo fabricante, pois o último possuía um representante em Portugal o que facilitou a aquisição dos mesmos, mas ainda assim com algumas demoras.

Paralelamente a isto foram estudadas diferentes tecnologias sem fios que se adaptassem ao sistema pretendido. Como se concluiu com este estudo, existe uma ampla gama de oferta de tecnologias sem fios que se encaixavam no sistema a desenvolver, mas optou-se por escolher aquela que apresentaria um menor custo e reaproveitamento de recursos existentes na Faculdade, o *ZigBee* e o módulo RC2300AT baseado no SoC CC2430. Feito isto iniciou-se um processo de ambientação ao sistema de desenvolvimento, testando as principais funcionalidades oferecidas pelo mesmo, para futuro aproveitamento durante o desenvolvimento do *firmware*.

Posteriormente deu-se o início à elaboração do hardware, ou seja, executar os esquemas eléctricos e desenhar os PCBs dos diferentes dispositivos. Feitos os PCBs, foram de seguida soldados e montados os dispositivos integrantes do sistema a desenvolver. Nesta fase foram testados os dispositivos, detectadas e corrigidas possíveis falhas de *hardware*.

Com o *hardware* desenvolvido operacional, iniciou-se o desenvolvimento do *firmware* final do sistema. Simultaneamente foi criada uma versão preliminar da aplicação para PC, desenvolvida em *Java*, que originou a versão final da mesma. Esta aplicação permitia o controlo remoto do dispositivo portátil, a aquisição e tratamento de dados guardados em memória do dispositivo portátil. Esta possibilitava ainda executar o traçado de gráficos em tempo real permitindo a visualização da evolução das leituras dos sensores. Era ainda através desta que se efectuava a configuração do dispositivo portátil. Em suma, através da aplicação desenvolvida era possível operar o dispositivo portátil remotamente sem a necessidade de interacção física com o mesmo.

Com o sistema operacional já na fase final, foram realizadas duas fases de testes as quais permitiram avaliar a funcionalidade do sistema desenvolvido, nomeadamente a resposta dos sensores, alcance da comunicação sem fios e consumos energéticos. Em simultâneo, durante esta fase de testes, foi feito um estudo comparativo entre o sistema desenvolvido e um sistema idêntico da empresa *Gray Wolf*, o TG-502.

Conclui-se desta forma que os objectivos propostos inicialmente foram atingidos com sucesso, à excepção da detecção de concentrações exactas por partes dos sensores. Como já foi referido anteriormente no Capítulo 5, para isso acontecer era necessário efectuar a calibração de todos os sensores para o sistema desenvolvido. Esta calibração não poderia ser feita na Faculdade pois esta não possuía meios para o fazer, já que este é um processo complexo, que exige um elevado grau de precisão e teria de ser feito num laboratório industrial preparado para o efeito.

Pela experiência obtida através da realização de testes com um dispositivo portátil de características idênticas ao sistema desenvolvido, conclui-se que este tipo de sistemas nem sempre cumpre com especificações fornecidas pelos fabricantes. Os testes realizados com o dispositivo TG-502 foram prova disso, apresentando erros por excesso, em alguns

casos, grosseiros. Uma vez que este tipo de sensores está preparado para detectar vários tipos de gases, isso acaba por introduzir um acumular de erros de detecção.

A solução para este tipo de problemas passaria por desenvolver tecnologias de sensores para um gás específico. Ou seja, desenvolver um sensor que detectasse um gás individual, e informasse sobre o valor da sua concentração. Desta maneira era possível obter resultados muito mais precisos e próximos da realidade, dispensando praticamente a realização de um segundo teste mais complexo para apurar a realidade da situação.

Um exemplo de aplicação ou de interesse num sensor deste género seria, por exemplo, uma indústria onde se fabricasse um determinado produto e que durante o processo de fabrico era libertado um determinado gás para a atmosfera. Essa indústria estaria interessada em controlar as emissões desse determinado gás, não necessitando de um sensor que detectasse uma vasta gama de gases, que por vezes apresentam um erro associado bastante elevado. Logo um sensor deste tipo encaixava-se perfeitamente nas necessidades dessa indústria.

6.1 - Trabalho Futuro

Como foi referido no Capítulo 5, surgiram alguns problemas com a resistência R_L , pois dependendo da gama de concentrações presente no ambiente para teste era necessário alterar o valor da mesma para que pudessem ser visualizados resultados. Outro problema relacionado com essa mesma resistência era o facto do sensor ser alimentado a uma tensão superior à tensão de alimentação do microcontrolador usado, o que por vezes iria fazer com que a tensão nos terminais da mesma ultrapassasse o valor dessa tensão de alimentação do microcontrolador. Desta forma iria ocorrer a saturação do ADC fazendo com que para qualquer valor de tensão superior à tensão de alimentação do microcontrolador, este iria sempre retornar o seu valor máximo. Visto ser frequentemente necessária a alteração do valor da resistência, este problema acabaria por surgir diversas vezes.

Uma solução para este problema, seria desenvolver um novo PCB para o acoplamento dos sensores, no qual seria integrado um potenciómetro digital. Este tipo de potenciómetros permitem definir um grande número de valores de impedância através da sua programação. Assim, bastaria posteriormente, recorrendo ao *firmware* já concebido, adicionar uma rotina que auto ajustasse o valor da resistência, que deveria estar presente à saída do sensor, para que não ocorresse a saturação do ADC e possibilitasse a visualização dos resultados das leituras. Desta forma, este problema ficaria resolvido.

Uma outra melhoria a ser feita passava pela implementação de um RCT (*Real Time Clock*), um ecrã LCD (*Liquid Crystal Display*) de pequenas dimensões de interface I²C e uma memória EEPROM também ela I²C. Através da conjugação destes componentes iria ser

possível aumentar significativamente a facilidade de utilização bem como a independência de um computador por parte do dispositivo portátil.

Recorrendo ao ecrã LCD, poderia ser implementada uma interface de utilizador, onde poderiam ser apresentados os valores das leituras recolhidas bem como visualizar em tempo real as medições efectuadas. Através do RTC poderia ser criado um calendário onde cada leitura efectuada teria uma data e hora associada. A EEPROM serviria como uma expansão de memória onde poderiam ser organizadas as leituras por datas, recorrendo ao RTC.

Para aumentar a autonomia do sistema poderia ser alterada a sua fonte de alimentação. Assim, em vez de se usar uma pilha de 9 volts poderiam ser usadas 4 baterias do tipo AA em série que daria uma tensão superior aos 5 volts requeridos para a alimentação dos sensores. Existem no mercado baterias deste tipo com capacidades que chegam aos 2700 mAh onde a conjugação delas iria aumentar significativamente a autonomia do sistema.

Finalmente a calibração de cada sensor poderia ser feita de modo a tornar este sistema 100% funcional.

Anexo A

PCBs

A.1 - PCB do módulo Coordenador

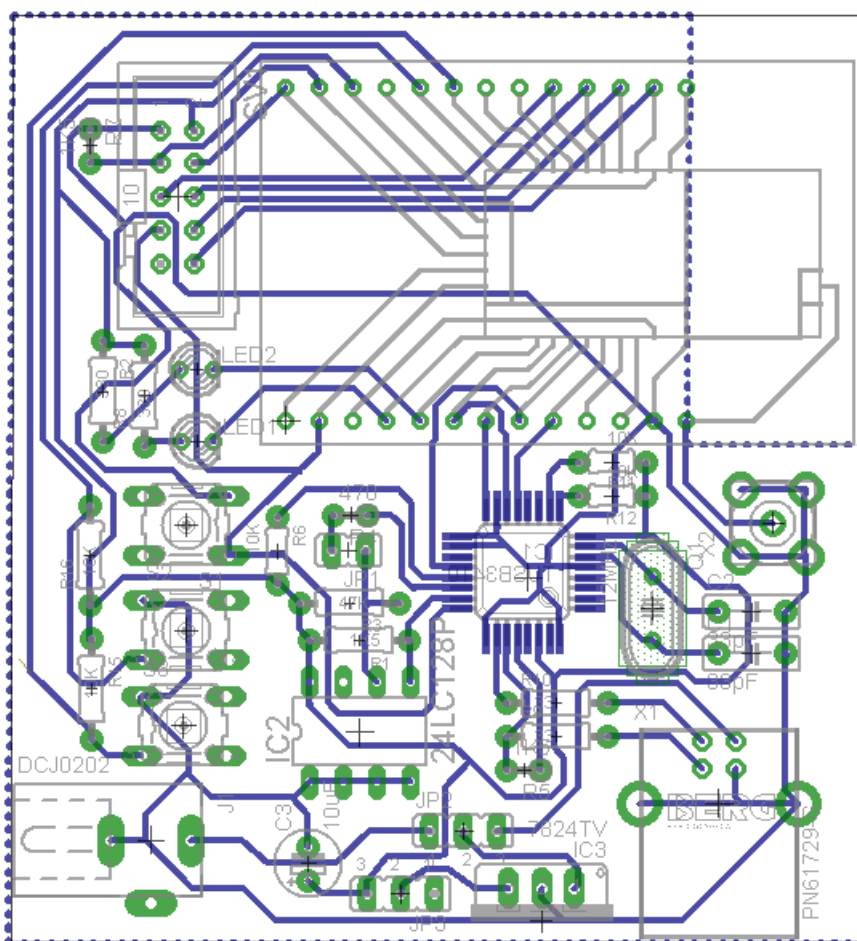


Figura A.1 - PCB do módulo Coordenador

A.2 - PCB do dispositivo portátil

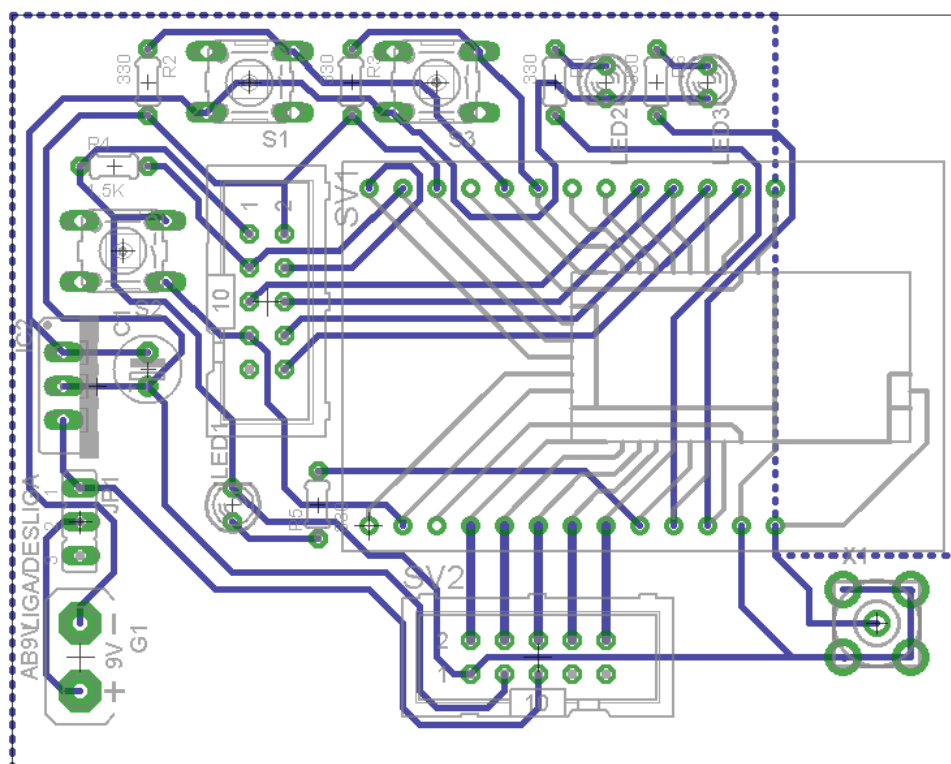


Figura A.2 - PCB do dispositivo portátil

A.3 - PCB de acoplamento dos sensores

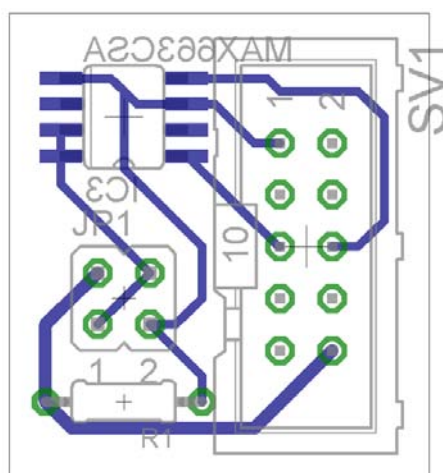


Figura A.3 - PCB de acoplamento dos sensores

Referências

- [1] Ion Science, Advanced Gas Sensing Technologies. Disponível em <http://www.ionscience.com/>. Acesso em 28/Janeiro/2010.
- [2] Honeywell, Analytics Gas Detection. Disponível em <http://www.lumidor.com/Home.aspx>. Acesso em 29/Janeiro/2010.
- [3] RAE Systems. Disponível em <http://www.raesystems.com/>. Acesso em 30/Janeiro/2010.
- [4] GrayWolf. Disponível em <http://www.wolfsense.com/>. Acesso em 29/Janeiro/2010.
- [5] Texas Instruments, Datasheet do CC2430. Disponível em <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2430.pdf>. Acesso em 25/Janeiro/2010. Acesso em 25/Janeiro/2010.
- [6] Radiocrafts, Módulo RC2300AT. Disponível em <http://www.radiocrafts.com/index.php?sideID=269&ledd2=268>. Acesso em 25/Janeiro/2010.
- [7] Texas Instruments, Kit de desenvolvimento CC2431DK. Disponível em <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/cc2431dk.html>. Acesso em 10/Janeiro/2010.
- [8] Dash7 Alliance. Disponível em <http://www.dash7.org/>. Acesso em 12/Janeiro/2010.
- [9] MiWi, Development Environment. Disponível em http://www.microchip.com/stellent/idcplg?ldcService=SS_GET_PAGE&nodeId=2113¶m=en520414. Acesso em 15/Janeiro/2010.
- [10] Z-Wave. Disponível em <http://www.z-wave.com/modules/ZwaveStart/>. Acesso em 16/Janeiro/2010.
- [11] Texas Instruments, TUSB3410. Disponível em <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/tusb3410.html>. Acesso em 20/Janeiro/2010.
- [12] EPA, Indoor Air Quality, Volatile Organic Compounds. Disponível em <http://www.epa.gov/iaq/voc.html>. Acesso em 30/Janeiro/2010.
- [13] AppliedSensor. Disponível em <http://www.appliedsensor.com/products/>. Acesso em 25/Novembro/2009.
- [14] Figaro Engineering Inc. Disponível em <http://www.figarosensor.com/gaslist.html>. Acesso em 26/Novembro/2009.
- [15] Ogam Technology. Disponível em <http://www.ogamtech.com/eng/vocs-sensor.htm>. Acesso em 27/Novembro/2009.

- [16] Synkera Technologies. Disponível em <http://www.synkera.com/Products/sensors.html>. Acesso em 29/Novembro/2009.
- [17] Z-Stack. Disponível em http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/z-stack.html?DCMP=HPA_RFIC_General&HQS=Other+OT+z-stack. Acesso em 10/Janeiro/2010.
- [18] Texas Instruments, ZigBee Stack. Disponível em http://processors.wiki.ti.com/images/8/8a/08_-_ZigBee_Stack.pdf. Acesso em 10/Janeiro/2010.
- [19] ITP Sensor Workshop. Disponível em <http://itp.nyu.edu/physcomp/sensors/Reports/GasSensors>. Acesso em 30/Outubro/2010.
- [20] Gray Wolf, TG-502. Disponível em <http://www.wolfsense.com/directsense-tvoc-volatile-organic-compound-meter.html>. Acesso em 18/Janeiro/2011.
- [21] National Instruments. Disponível em <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/10789>. Acesso em 21/Janeiro/2011.
- [22] Radiocrafts, RC2300AT datasheet. Disponível em http://www.radiocrafts.com/uploads/rc230x_data_sheet_1_2.pdf. Acesso em 20/Janeiro/2010.
- [23] Relatório de Zigbee. Disponível em http://www.fe.up.pt/~ee02055/Relatorio_ZigBee_Hardware.pdf. Acesso em 6 de Junho de 2010.
- [24] ZigBee Alliance, ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works, 2003.
- [25] ZigBee Alliance, ZigBee SoCs provide cost-effective solutions, 2005.
- [26] Seminário de Redes de Computadores II, 802.15.4 e ZigBee. Disponível em <http://www.gta.ufrj.br/~rezende/cursos/eel879/trabalhos/zigbee/index.html>. Acesso em 15/Janeiro/2010.
- [27] S.Ergen, ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary, Setembro de 2004.
- [28] IEEE Std 802.15.4, 2003.
- [29] International Sensor Technology, Photoionization Detectors. Disponível em <http://www.intlsensor.com/>. Acesso em 29/Janeiro/2010.
- [30] AppliedSensor. Disponível em <http://www.appliedsensor.com/technologies/>. Acesso em 25/Novembro/2009.
- [31] Norma Portuguesa, Valores limite de exposição profissional a agentes químicos, NP 1796, 2007.