



CCEE - Centro de Ciências Exactas e da Engenharia

Bruno Alexander Teixeira de Gouveia

Dispositivos de Monitorização e Controlo automático de factores climáticos em Museus



Centro de Ciências Exactas e da Engenharia

Universidade da Madeira

Novembro 2009



CCEE - Centro de Ciências Exactas e da Engenharia

Bruno Alexander Teixeira de Gouveia

**Dispositivos de Monitorização e Controlo automático de factores
climáticos em Museus**

*Dissertação submetida à Universidade da Madeira para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia de Telecomunicações e Redes*

Centro de Ciências Exactas e da Engenharia

Universidade da Madeira

Novembro 2009

Dissertação realizada sob a supervisão de:

Professora Doutora Laura Margarita Rodríguez Peralta

Professora Auxiliar do Centro de Ciências Exactas e da Engenharia

Universidade da Madeira

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar à Professora Laura Rodriguez, por me ter dado a oportunidade de trabalhar neste projecto de mestrado. Além disso, agradeço também o apoio que me deu durante um ano de estudo e de desenvolvimento do projecto.

Agradeço ao Eng. Filipe Santos por toda a experiência e conhecimentos partilhados, tendo dado um importante apoio nos laboratórios da Universidade da Madeira.

Agradeço à minha família e à minha namorada, Mara, pelo apoio e motivação dados durante esta caminhada final do mestrado.

Agradeço às restantes pessoas envolvidas no projecto WISE-MUSE. Nomeadamente à Professora Lina, à Dália e ao Cláudio que também contribuíram para o sucesso deste projecto.

Agradeço aos colegas com quem partilhei o laboratório de electrónica da UMa, que de uma forma ou de outra também me ajudaram em situações particulares durante o trabalho, em particular o Leonardo, o Adrian, o Aguiar, o Tiago e a Carla.

Agradeço ainda aos amigos Amílcar, Leonardo Reis, Filipe Gouveia, Dinarte, Vanessa, Carlos, Dario e Rui Ricardo pelo apoio dado, que apesar de não ser especificamente para o projecto, ajudou a ultrapassar esta fase.

Resumo

As redes de comunicação sem fios são uma área de grande desenvolvimento. As tecnologias progredem e criam-se novas oportunidades de implementação de novos dispositivos nesta área. Neste tipo de redes, encontram-se as redes de sensores sem fios (WSN- *Wireless Sensor Networks*), que são constituídas por vários dispositivos (Nós Sensores) que colaboram entre si, para recolher e encaminhar informação sobre um determinado fenómeno físico até uma estação base.

A um outro nível, a preservação das obras de arte é uma preocupação fundamental de todos os Museus. Existe a necessidade de conservar ao máximo as características genuínas de cada artefacto. Para tal, torna-se essencial uma monitorização e controlo de alguns factores ambientais, que podem danificar ou alterar as características dos materiais.

Essa monitorização é realizada nos museus da Madeira, mas de uma forma manual e recorrendo a aparelhos que são dispendiosos e um pouco arcaicos. Assim sendo, tornou-se necessário encontrar uma solução, para a realização dessa tarefa de uma forma automática e contínua.

As WSN oferecem uma resposta para estas necessidades, surgindo assim o projecto WISE-MUSE, que visa a monitorização ambiental para a conservação de obras de arte e artigos históricos, através de redes sem fios.

Portanto, este projecto de Mestrado em Telecomunicações e Redes tem como área de acção a camada física da arquitectura do sistema WISE-MUSE. Neste sentido, desenvolveu-se um conjunto de dispositivos electrónicos, para monitorização e controlo de factores climáticos no Museu de arte contemporânea do Funchal. A ligação entre dispositivos e transmissão dos dados recolhidos foi assegurada através da implementação de uma rede sem fios. Ao nível dos nós sensores construídos, os desenvolvimentos mais importantes tiveram como meta a minimização de custos, consumo energético e dimensões dos mesmos. Além dos sensores, foram desenvolvidos outros componentes da rede, nomeadamente dispositivos routers e um dispositivo que permite o controlo automático da humidade.

Palavras-chave: Redes de sensores sem fios, monitorização, *ZigBee*, sensores, conservação de arte e arquivos históricos.

Abstract

Wireless communication networks are a research area in great development. With the evolution of this kind of technologies new devices have been implemented. In such type of networks, we find the Wireless Sensor Networks (WSN), which consist of multiple devices that work together, to collect and send information about a physical phenomenon, to the base station of the system.

On the other hand, the preservation of works of art is a main concern of all museums. There is a need to maintain the original characteristics of each artifact. So, it becomes essential to monitor and control environmental factors that can damage or change the original characteristics of the materials.

This monitoring is carried out in some museums in Madeira Island, manually using devices that are expensive and outdated. Therefore, it is necessary to find a solution that achieves this task in an automatic and continuous form.

The WSNs offer a solution to this problem. In this context, WISE-MUSE project has come out. This project aims to environmental monitoring based on WSN, for conservation of artwork and historical archives.

Therefore, the field of action for this master's project in Telecommunications and Networks is the physical layer of the architecture of the WISE-MUSE system. In this sense, a set of electronic devices for monitoring and control, of climatic factors in the Contemporary Art Museum of Funchal were developed. The connection between devices and also the transmission of data collected was ensured, through the implementation of a wireless network. In terms of sensors that were built, the development aimed for the minimization of costs, energy consumption and size of the sensors.

Besides the sensors developed, other network components were created, including two routers and a device for automatic control of humidity.

Key words: Wireless Sensor Networks, monitoring, *ZigBee*, sensors, conservation of artwork and historical archives.

Índice de Conteúdos

Capítulo 1- Introdução.....	1
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objectivos.....	3
1.4 Estrutura do Documento.....	4
Capítulo 2- Estado de Arte.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Redes de Sensores Sem Fios (WSN).....	5
2.2.1 Introdução.....	5
2.2.2 Vantagens das WSN.....	6
2.2.3 Nó Sensor.....	7
2.3 Comparação de tecnologias para transmissão sem fios.....	8
2.4 Tecnologia <i>ZigBee</i>	11
2.4.1 Introdução.....	11
2.4.2 Perspectiva Histórica.....	12
2.4.3 Arquitectura Protocolar <i>Zigbee</i>	13
2.5 Estudo de Mercado.....	24
2.5.1 <i>MICA2 e MICA2DOT</i>	24
2.5.2 <i>Mica Z</i>	25
2.5.3 <i>Tmote Sky</i>	25
2.5.4 Conclusões do estudo de Mercado.....	26
2.6 Conservação de obras de arte em Museus.....	27
2.6.1 Variáveis a monitorizar.....	27
2.7 Conclusões do capítulo.....	30
Capítulo 3- Concepção arquitectural.....	31
3.1 Introdução.....	31
3.2 Requisitos para os dispositivos a desenvolver.....	31
3.3 Arquitectura da rede.....	32
3.4 Dispositivos da rede.....	34

3.4.1 Nós Sensores.....	34
3.4.2 Dispositivo <i>Router</i>	52
3.4.3 Sistema de Controlo da Humidade	53
3.5 Conclusões do capítulo	56
Capítulo 4- Desenvolvimento dos protótipos.....	57
4.1 Introdução	57
4.2 Desenvolvimento do Hardware	57
4.2.1 Placa de testes do Atmega 168.....	57
4.2.2 Nó Sensor WISE-MUSE.....	58
4.2.3 Dispositivo Router	62
4.2.4 Coordenador de Rede.....	63
4.2.5 Dispositivo controlador de humidade	64
4.3 Desenvolvimento do Software	66
4.3.1 Introdução	66
4.3.2 Funcionamento do programa do microcontrolador	66
4.3.3 Comunicação com o microcontrolador.....	69
4.4 Configurações de rede.....	70
4.5 Custos dos dispositivos da rede	72
4.5.1 Nó Sensor WISE-MUSE.....	72
4.5.2 Router WISE-MUSE.....	73
4.5.3 Dispositivo de controlo de humidade.....	73
4.5.4 Coordenador de rede	73
4.6 Análise dos protótipos.....	74
4.7 Conclusões do capítulo	78
Capítulo 5- Propagação de Sinal.....	79
5.1 Introdução	79
5.2 O fenómeno da propagação	79
5.2.1 Dependência com a distância.	80
5.2.2 Penetração do sinal	80
5.2.3 Difracção	81
5.2.4 Reflexão	81

5.2.5 Dispersão	82
5.2.6 Efeito de Guia de onda	83
5.3 Modelos de propagação	83
5.3.1 Introdução	83
5.3.2 Modelo de atenuação no espaço livre.....	84
5.3.3 Modelo <i>One Slope</i>	84
5.3.4 Modelo ITU 1238-1.....	85
5.4 Análises e medições no terreno (Museu).....	86
5.4.1 Caracterização das áreas e ambientes a medir	87
5.4.2 Material e software para as medições.....	89
5.4.3 Medições	89
5.4.4 Análise às medições efectuadas	92
5.5 Mapa de cobertura da rede.....	92
5.6 Conclusões.....	94
Capítulo 6- Testes e Resultados.....	95
6.1 Introdução	95
6.2 Primeiros resultados do Nó Sensor WISE-MUSE	95
6.3 Autonomia do Nó Sensor	97
6.4 Testes de rede no laboratório.....	98
6.5 Controlo remoto de um LED.....	100
6.6 Controlo remoto do desumidificador.....	102
6.7 Recepção de dados a partir de vários sensores.....	103
6.8 Testes comparativos do nó sensor	105
6.9 Conclusões do capítulo	107
Capítulo 7- Conclusões	109
7.1 Introdução	109
7.2 Principais contribuições	109
7.3 Trabalhos futuros.....	111
7.4 Balanço final	111
Referências Bibliográficas	112
Anexos.....	115

A1 Código do Microcontrolador Atmega 168.....	115
A1.1 Função principal do programa	115
A1.2 Adormecimento do microcontrolador.....	116
A1.3 Comunicação UART	116
A1.4 Interrupção temporal.....	116
A.2 Programador AVR-ISP 500	118
A.3 <i>AVR Studio</i>	119
A.4 <i>Ultiboard</i>	120
A.5 Módulos <i>Xbee9</i>	121

Índice de Figuras

Figura 1-Estrutura de um Nó sensor	7
Figura 2- Comparação tecnologias Wireless	10
Figura 3- Aplicações <i>ZigBee</i> numa habitação.....	12
Figura 4- Arquitectura <i>ZigBee</i>	13
Figura 5- Sinal com espalhamento espectral	15
Figura 6-Espectro do protocolo IEE 802.15.4 nos 2,4GHZ	16
Figura 7-Coexistência entre os protocolos 802.15.4 e o 802.15.11b	16
Figura 8- <i>Super frame</i>	18
Figura 9- Topologias de rede para as redes WSN.	21
Figura 10- Habilidade de evitar interferências.....	22
Figura 11- Kit da Crossbow.....	24
Figura 12- Módulo Mica Z.....	25
Figura 13- Nó Sensor <i>Tmote Sky</i>	26
Figura 14- Arquitectura da WSN para o Museu.....	33
Figura 15- Funcionamento da aquisição dos dados.....	34
Figura 16- Arquitectura do sensor construído	35
Figura 17- Atmega 168P.....	36
Figura 18- Configuração dos Pinos do Atmega 168	38
Figura 19-Sensor SHT15	41
Figura 20- Diagrama de blocos do SHT15.....	42
Figura 21- Esquema de funcionamento do SHT15	43
Figura 22- Sensor de luz S1087.....	45
Figura 23- Sensibilidade do Sensor de luz.....	46
Figura 24- Tipos de módulo <i>Xbee</i>	47
Figura 25- Esquema do Modulo <i>Xbee</i>	48
Figura 26-Esquema do circuito <i>step-up</i> adoptado.....	50
Figura 27- Esquemático do Nó Sensor.....	51
Figura 28- Transformador XP-POWER	53
Figura 29- Sistema de controlo de humidade	53
Figura 30- Funcionamento de um Relé.....	54
Figura 31- Dispositivo de controlo da humidade.....	55
Figura 32- Placa de testes.....	58
Figura 33- Layout final do Sensor WISE-MUSE	59
Figura 34- Desenho do sensor em 3D	59
Figura 35- Placa do sensor, sem os componentes.....	60
Figura 36- Sensor Construído.....	61
Figura 37- Caixas dos sensores	62
Figura 38- Circuito do dispositivo router (Ultiboard).....	62

Figura 39- Router WISE-MUSE construído.....	63
Figura 40- Encapsulamento do Router WISE-MUSE	63
Figura 41- Coordenador de rede.....	64
Figura 42- Circuito de controlo da humidade.....	64
Figura 43 - Dispositivo controlador de humidade	65
Figura 44- Vista frontal do dispositivo. Figura 45- Vista lateral do dispositivo.....	65
Figura 46 Programa principal do firmware.....	67
Figura 47- Fluxograma da interrupção temporal.....	68
Figura 48- Diagrama de processos.....	69
Figura 49- Janela de programação do <i>AVR-Studio</i>	70
Figura 50- Configurações do coordenador.....	71
Figura 51- Configurações do <i>End Device</i>	71
Figura 52- Fenómeno de penetração do sinal numa parede	80
Figura 53-Fenómeno da difracção	81
Figura 54-Fenómeno de reflexão.....	82
Figura 55-Fenómeno da dispersão.....	82
Figura 56- Gráfico de atenuação do Modelo One slope	85
Figura 57- Gráfico de atenuação do modelo ITU 1238.....	86
Figura 58- Planta da sala de Reservas1.....	87
Figura 59- Interior da sala de reservas 1	88
Figura 60-Planta da sala de reservas 2.....	88
Figura 61 Valores de atenuação medidos na sala de reservas 1.....	90
Figura 62- Porta de Madeira.....	90
Figura 63- Janela de Vidro.....	91
Figura 64- Armários do Museu.....	91
Figura 65- Parede do Museu	91
Figura 66- Mapa de cobertura de rede (Sala 1)	92
Figura 67- Ligação entre Salas de Reservas e Escritório.....	93
Figura 69- Gráfico de monitorização de humidade por parte do Sensor	96
Figura 70- Gráfico de temperatura monitorizada pelo Sensor	97
Figura 71- Gráfico de comportamento das baterias AA.....	98
Figura 72- Esquema de testes de encaminhamento.....	99
Figura 73- Mensagem de comando remoto.....	101
Figura 74- Mensagens de comando, para controlo de humidade	102
Figura 75- Rede Zigbee de Teste.....	103
Figura 76- Mensagens recebidas pelo coordenador	104
Figura 77- Comparação de luminosidade	105
Figura 78- Valores de temperatura comparados	106
Figura 79- Valores de Humidade medidos pelo Nó Sensor WISE-MUSE.....	106
Figura 80- Comparação da tensão na bateria.....	107
Figura 81- Programador AVR-ISP500	118

Figura 82- Pinos ICSP6	118
Figura 83-Janela principal do <i>AvrStudio</i>	119
Figura 84-Janela principal do programa	120
Figura 85- Configuração de pinos do <i>Xbee</i>	121
Figura 86- Especificações do <i>Xbee</i>	121

Índice de Tabelas

Tabela 1- Comparação de diferentes tecnologias para redes sem fios.....	10
Tabela 2- Sensibilidade de vários materiais.....	28
Tabela 3- Custos Nó Sensor.....	72
Tabela 4- Custos <i>Router</i>	73
Tabela 5- Custos Controlador de humidade.....	73
Tabela6- Comparação de sensores.....	74
Tabela 7- Valores Modelo One Slope.....	85
Tabela 8- Valores Modelo ITU 1238-1.....	86
Tabela 9- Valores de perdas medidos no Museu.....	89

Lista de Acrónimos

APS	<i>Aplication Support Sublayer;</i>
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying;</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance;</i>
CMOS	<i>Complementary metal-oxide-semiconductor;</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum;</i>
FFD	<i>Full Function Device;</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slot;</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific, and Medical;</i>
FHSS	<i>Frequency hopping spread Spectrum;</i>
LAN	<i>Local Area Network;</i>
MAC	<i>Medium Access Control;</i>
MSB	<i>Most Significant Bit;</i>
NWK	<i>Network;</i>
LSB	<i>Less Significant Bit;</i>
OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing;</i>
O-PSK	<i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying;</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection;</i>
PAN	<i>Personal Area Network;</i>
PHY	<i>Physical Layer;</i>
RFD	<i>Reduced Function Device;</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
SMD	<i>Surface-mountable;</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network;</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity;</i>
WPAN	<i>Wireless Personal área Network;</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter;</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Apresentação

A conservação de obras de arte nos museus é um problema importante, quer nas salas de exposição, quer nas salas de reservas. A degradação dos artefactos é resultado de intervenções humanas e de exposições a variações ambientais. No sentido de preservar as obras de arte, é importante que haja uma monitorização e controlo de alguns parâmetros ambientais como a luz, a temperatura, a humidade, entre outros. Neste contexto, as WSN (*Wireless Sensor Networks*) podem oferecer uma solução a estas necessidades.

Uma WSN é uma rede sem fios, composta por vários dispositivos que têm a capacidade de recolher informação sobre um determinado fenómeno, e fazer com que estes dados cheguem até uma estação base, onde possam ser observados. Com a implementação de uma rede deste tipo, garante-se uma monitorização contínua, de uma maneira mais fácil e com menores custos do que com os procedimentos normais. A ausência de ligações por cabo origina uma flexibilidade em termos de instalação, ou colocação dos dispositivos intervenientes, sendo esta a vantagem mais importante nas redes que se sustentam nestas tecnologias.

Assim sendo, o intuito deste projecto é criação de um conjunto de dispositivos electrónicos, capazes de monitorizar e controlar automaticamente variáveis climáticas para o Museu de Arte Contemporânea do Funchal, localizado na Fortaleza de São Tiago na Madeira, Portugal. Este trabalho insere-se na camada física, da arquitectura do projecto WISE-MUSE, que visa a monitorização ambiental para a conservação de artefactos, através de redes de sensores sem fios.

1.2 Motivação

Na actualidade, as comunicações móveis têm uma importância cada vez mais relevante. As tecnologias estão em constante progresso e as necessidades criam-se, a partir da oferta. Na última década tem-se verificado um enorme crescimento dos dispositivos de comunicação por rádio frequência, estando cada vez mais este tipo de tecnologias no quotidiano de pessoas, instituições e empresas. A utilização de sistemas que se baseiem neste tipo de dispositivos está em crescimento e tem ainda um grande potencial de inovação.

Por outro lado, a monitorização de factores climáticos nos museus da cidade do Funchal tem sido efectuada manualmente, apoiando-se em dispositivos de captura de dados, onde os funcionários do museu têm de periodicamente efectuar essas medições de uma maneira um pouco arcaica. Desta forma, é de interesse permitir a monitorização ambiental (luz, temperatura, humidade, etc.) de uma forma totalmente automática, contínua e em tempo real.

Para que o impacto da introdução de um novo sistema seja reduzido, nomeadamente em termos de instalação, torna-se importante que a comunicação seja efectuada via rádio frequência. Ou seja, evita-se a instalação de cablagem que teria um impacto visual negativo, para edifícios históricos como são os Museus.

O baixo orçamento destas instituições, faz com que haja a procura de soluções de monitorização com custos mais reduzidos, visto que as soluções existentes no mercado são na sua maioria bastante dispendiosas.

É neste contexto que surge o presente projecto, que possibilitará a monitorização e controlo automático ambiental, recorrendo a dispositivos de baixo custo, com boa eficiência energética e de pequenas dimensões.

1.3 Objectivos

Neste projecto pretendeu-se desenvolver o *hardware* do sistema de monitorização e controlo em museus, bem como elaborar um conjunto de estudos que garantam a transmissão coerente dos dados através da rede. De uma maneira mais concreta os objectivos foram os seguintes:

- Efectuar um estudo teórico sobre as redes de sensores sem fios (WSN).
- Investigar e escolher os componentes menos dispendiosos e com menor consumo energético, mas com garantias de eficiência para o desenvolvimento dos nós sensores.
- Desenvolver, construir e programar os módulos sensores e os *routers*.
- Desenvolver e construir um dispositivo responsável pelo controlo de aparelhos eléctricos, através da recepção de um sinal remoto proveniente da estação base. Com isto pretende-se controlar automaticamente parâmetros ambientais como a humidade ou a temperatura.
- Efectuar um planeamento da rede WSN, a nível de cobertura de sinal no cenário real do Museu, com vista a obter uma boa comunicação entre sensores, *routers* e coordenador de rede, assegurando a recepção dos dados por parte da estação base.
- Montar a rede de sensores real e efectuar testes no ambiente específico do museu, seguidos de uma análise dos resultados conseguidos. Com isto pretende-se validar a solução proposta.

1.4 Estrutura do Documento

Este documento está estruturado em 7 capítulos.

No presente capítulo, efectuou-se uma apresentação do projecto, salientando ainda os principais aspectos que motivaram a realização deste trabalho.

No capítulo 2 é efectuado um estudo e comparação dos protocolos disponíveis em termos de redes wireless e posteriormente um estudo aprofundado sobre o protocolo *Zigbee*. São também analisados os parâmetros ambientais que serão alvo de monitorização no Museu.

No capítulo 3 são apresentados os requisitos do sistema, bem como a arquitectura da rede. É também apresentada a estrutura dos dispositivos e os componentes dos módulos a construir, justificando as escolhas tomadas.

No capítulo 4 é apresentada uma placa de testes e o desenvolvimento dos protótipos. É também explicado o código que cada microcontrolador possui para proporcionar a correcta interface entre os sensores e o módulo RF.

No capítulo 5 é feito um estudo de propagação de sinal nas salas do Museu e no trajecto em direcção à estação base, que irá recolher os dados. São apresentados modelos teóricos de propagação *indoor* e juntamente com testes efectuados no Museu, é elaborado um mapa de cobertura da rede de sensores *Zigbee*.

No capítulo 6 são descritos os resultados obtidos com os módulos sensores construídos, com os *routers* e com o módulo de controlo de humidade, efectuando uma análise à sua eficiência e precisão.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as principais contribuições deste projecto, sendo seguidas de reflexões sobre o trabalho realizado. Para terminar, são apresentadas algumas perspectivas de continuação do projecto.

Capítulo 2

Estado de Arte

2.1 Introdução

Neste capítulo efectua-se um enquadramento tecnológico sobre as áreas de intervenção do Projecto de Mestrado. Inicialmente é elaborado um estudo sobre o estado actual das redes de sensores sem fios. Posteriormente é efectuada uma comparação entre diversas tecnologias associadas à transmissão de dados por rádio frequência, sendo seguida de uma análise mais profunda sobre a tecnologia *Zigbee*. É realizado ainda um importante estudo sobre a conservação das obras de arte em Museus e mais concretamente sobre as variáveis que vão ser alvo de monitorização ambiental (luz, humidade e temperatura). No final do capítulo são apresentadas algumas soluções de monitorização existentes no mercado, salientando os seus aspectos menos positivos e apresentando quais os desenvolvimentos mais importantes a efectuar nos novos protótipos de monitorização.

2.2 Redes de Sensores Sem Fios (WSN)

2.2.1 Introdução

Actualmente existem diversos meios de transmissão de informação ao dispor das pessoas, empresas ou instituições. Neste contexto, a transmissão sem fios tem-se apresentado como uma opção cada vez mais atractiva. Por outro lado, os custos de instalação e manutenção de cablagem não têm vindo a diminuir.

Assim sendo, à medida que têm surgido desenvolvimentos em áreas como as dos circuitos de baixa potência, dos equipamentos *wireless* de baixa potência, de maior eficiência e menores dimensões levaram ao aparecimento das redes de sensores sem fios (WSN).

Uma rede de sensores sem fios é caracterizada como um conjunto de nós sensores, com a capacidade de comunicarem entre si. Eles recolhem os dados pretendidos e enviam-nos até uma estação base. Podem estar colocados muito perto do fenómeno físico a monitorizar ou

até mesmo dentro. A comunicação entre os nós é conseguida através de uma rede wireless, existindo várias topologias possíveis para a sua configuração [1,2,5].

As redes de sensores sem fios têm sido alvo de diversos estudos na última década. A tecnologia foi trazida para fora dos laboratórios de pesquisa, muito à custa da afirmação de protocolos na área, tais como o IEEE 802.15.4 e o *Zigbee*, que estimularam e desenvolveram um vasto leque de produtos comerciais. Partindo de pesquisas na área militar, estas redes estão actualmente implementadas em diversos ambientes. As restrições na utilização desta tecnologia parecem ser quase inexistentes. Diversas aplicações para redes de sensores sem fios têm emergido, estando incluído áreas como a agricultura, medicina, monitorização ambiental, detecção de intrusões, brinquedos, desporto e muitas outras [2].

2.2.2 Vantagens das WSN

Este tipo de redes possui diversas vantagens, relativamente às redes de sensores com fios. Principalmente em termos de custos, tamanho dos dispositivos, flexibilidade, inteligência distribuída e redução de erros. Também em termos de monitorização de alvos de difícil acesso, estas redes ganham vantagem sobre outras. Apesar de estes aspectos serem muito positivos, a principal vantagem destas redes relativamente às redes com fios é a possibilidade de serem instaladas em qualquer local. De uma forma resumida, pode-se dizer que as redes WSN's tornam-se extremamente atractivas porque combinam as vantagens de uma comunicação *wireless* com capacidades de computação e detecção de determinadas grandezas físicas (temperatura, luz, humidade, CO₂, vibração, pressão, som, radiação, etc.) [1].

Um ponto fundamental para muita da sua actividade comercial é a utilização do standard IEEE 802.15.4 na arquitectura protocolar dos seus dispositivos. Este protocolo estabelecido na camada física (PHY) e MAC define uma DSSS (sequência directa de espalhamento espectral) na banda dos 2,4GHz. Com este mecanismo a interferência com outros tipos de dispositivos é reduzida, havendo simultaneamente um aumento de segurança na transmissão de dados. No topo das camadas PHY e MAC vários *standards* emergiram, tendo o protocolo *Zigbee* grande sucesso a nível comercial [2].

2.2.3 Nó Sensor

Um Sensor *Wireless* é um dispositivo pequeno e autónomo composto por um conjunto de transdutores e transceptores rádio, com alimentação energética autónoma. Este dispositivo realiza três tarefas principais: “sentir” o meio em que está inserido (através de sensores especializados), processar a informação recolhida (devido à presença de um microprocessador), e comunicar sem a necessidade da utilização de fios. Os nós sensores podem ser utilizados de uma maneira eficiente, mesmo que sejam centenas, para alcançar um objectivo comum. Recolhem dados através das unidades sensoriais e processam-nos localmente ou em colaboração com os nós vizinhos, podendo enviar as informações para o utilizador ou, em geral para uma base de dados. Cada nó sensor de uma WSN pode ser equipado com um ou mais dispositivos sensores, tais como acústico, sísmico, luz, temperatura, humidade, radiação ou pressão, entre outros [1, 4].

Ao nível de *hardware*, um nó sensor é constituído por 4 módulos básicos: **a unidade sensorial**, que é composta por um ou mais sensores e pelos conversores analógico-digitais que convertem os sinais analógicos recolhidos para sinais digitais; **a unidade de processamento**, associada a uma memória de pouca capacidade, esta unidade é responsável pela colaboração entre os nós para realização das tarefas do sensor; **a unidade de transmissão** que permite a comunicação entre o nó sensor e a rede; e por fim **a unidade de energia**, que pode ser acompanhada de uma unidade geradora de energia (por exemplo painéis solares). Na Figura 1, é apresentada a estrutura de um nó sensor comum, em termos de *hardware* [1].

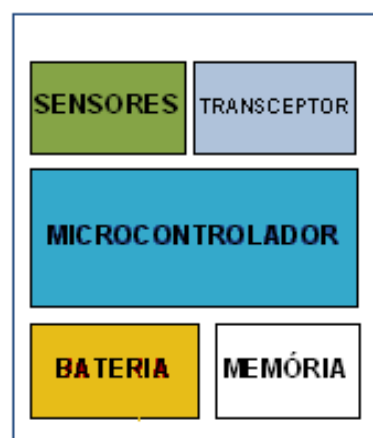


Figura 1-Estrutura de um Nó sensor

Actualmente, estes sensores utilizam microcontroladores de instruções reduzidas (*RISC-Reduced Instruction Set Computer*) e de baixo custo, com uma pequena memória (à volta dos 100kB). No entanto, uma memória externa com tempos de acesso elevados poderá ser adicionada disponibilizando um armazenamento secundário, aliviando as preocupações com o tamanho da aplicação. Estes sensores possuem ainda, na maioria deles, vários dispositivos onde se inclui o UART, conversores analógico/digital e relógios [3].

2.3 Comparação de tecnologias para transmissão sem fios

Neste ponto do trabalho, é realizada uma comparação entre três conhecidas tecnologias para redes sem fios cujas características são analisadas. *Zigbee* e *Bluetooth* são protocolos definidos pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) para redes *wireless* de área pessoal (WPAN). Por outro lado o *Wi-Fi* é um protocolo para redes *wireless* de área local (WLAN).

O *Wi-Fi* (IEEE 802.11) é um protocolo destinado a aplicações que exijam um elevado débito, tais como aquelas que envolvem a transferência de ficheiros ou o acesso à Internet e a conteúdos multimédia. O seu consumo energético é também claramente superior ao das outras tecnologias que aqui se comparam. Permite transmissão de sinal até aos 100 metros (aproximadamente), operando na gama dos 2,4GHz com taxas de transmissão até os 54Mbps. Este padrão utiliza técnicas como DSSS (*Direct-sequence spread spectrum*) e OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*), sendo que cada canal ocupa uma largura de banda à volta dos 22MHz [4].

Quanto aos protocolos para WPAN's, todos eles apresentam débitos mais reduzidos em relação ao *Wi-Fi*, sendo que algumas pessoas costumam se questionar se o *Bluetooth* e o *Zigbee* são protocolos "concorrentes". No entanto, existem diferenças bem claras que os distinguem. O *Zigbee* foi desenvolvido para servir aplicações distintas das do *Bluetooth* e, em especial, tentando obter uma optimização máxima do consumo energético. Verifica-se, efectivamente que o protocolo *Zigbee* apresenta um consumo muito reduzido quando comparado com o *Wi-Fi* ou *Bluetooth*, especialmente nos períodos de inactividade.




O alcance de transmissão é sempre um parâmetro que está sujeito a muitas condicionantes (possibilidade de obstáculos, interferências, etc.). Contudo para os dispositivos que utilizem a tecnologia *Zigbee* espera-se que estes tenham um alcance de transmissão entre os 10 e os 100 metros. Esta tecnologia opera na banda livre dos 2.4GHz (globalmente), 915MHz (América) e 868MHz (Europa). A taxa de transferência dos dados difere da frequência utilizada mas para os 2,4GHz é normalmente de 250Kbps. Este protocolo utiliza ainda a técnica DSSS [4]. Mais à frente neste trabalho este protocolo será alvo de um estudo mais detalhado.

Quanto aos dispositivos que utilizam o *Bluetooth*, será evidente destacar os telemóveis que através desta tecnologia permitem aos utilizadores uma troca de imagens, músicas ou outros ficheiros com grande facilidade. Apesar deste destaque, existe um grande número de outros dispositivos que podem utilizar esta tecnologia. O alcance de transmissão neste caso anda à volta dos 10 metros e consegue-se atingir taxas de transmissão à volta dos 1Mbps na banda dos 2.4GHz. A técnica FHSS é utilizada com canais de 1MHz de largura de banda [3].

Para terminar esta análise podemos comparar o tamanho da rede, que poderá ser um ponto importante na escolha da tecnologia. O *Zigbee* suporta 255 dispositivos por cada coordenador de rede. Se vários coordenadores de rede forem ligados conjuntamente, a rede poderá suportar um maior número de nós (até os 65000 aproximadamente). No caso do *Bluetooth* este permite que oito dispositivos (7 escravos mais um mestre) se interliguem para formar uma *piconet*. No entanto poderá haver ligações entre *piconets* aumentando consideravelmente o número de nós interligados. O *Wi-Fi* suporta 2007 dispositivos numa BSS (*Basic set service*) e um número ilimitado numa IBSS (*Independent Basic set service*).

Esta comparação de tecnologias pode ser resumida, através da Tabela 1.

Tabela 1-Comparação de diferentes tecnologias para redes sem fios [4, 6].

	 ZigBee™	 Bluetooth®	 WiFi™
Gama de frequências	868MHz,915Mz, 2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz, 5GHz
Débito	20-250Kbts	1-10Mbps	54Mbps
Consumo	≈30mA TX, Standby 0.20μA	>400mA TX, Standby 0.20mA	>400mA TX, Standby 20mA
Alcance	10-100mts	10mts	100mts
Número máximo de dispositivos por célula	255 Dispositivos activos por rede	8 dispositivos activos	2000 dispositivos numa rede estruturada
Célula Básica	Estrela	Piconnet	BSS
Multiplexagem	DSSS	FHSS	DSSS,OFDM
Pontos fortes	Consumo, N.º de Nós, Fiabilidade, custo	Interoperabilidade, Substituição dos cabos	Elevada Taxa de Transferência
Principais Aplicações	Controlo Remoto, Sensores, Dispositivos alimentados por bateria	Periféricos de PC e Telemóveis, PDA's	Internet, Transferências de Ficheiros, Vídeo/Aúdio

Na Figura 2 é apresentado um gráfico que vem ao encontro do que já foi referido anteriormente, sobre as diversas tecnologias estudadas.

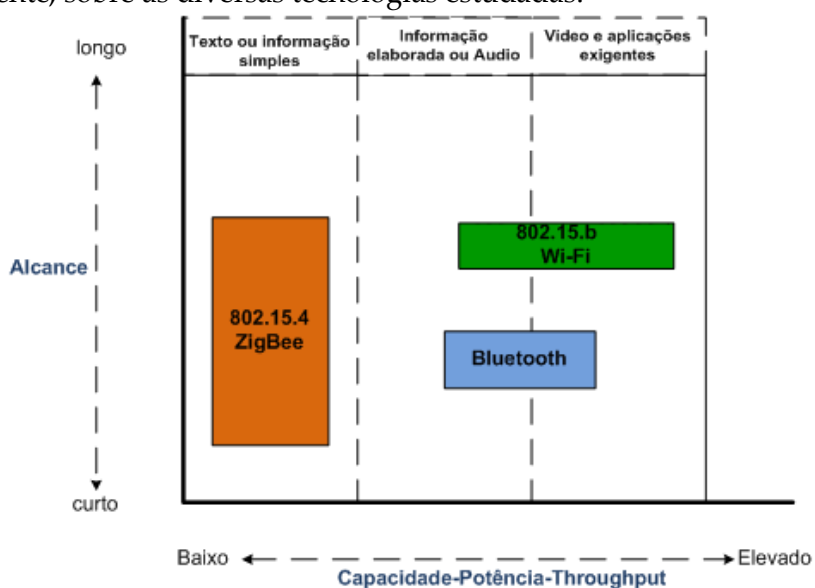


Figura 2- Comparação tecnologias Wireless [6]

No final deste breve estudo conclui-se que nenhum protocolo pode atender positivamente a todos os aspectos importantes numa comunicação sem fios. O protocolo *Zigbee* é adequado para aplicações de monitorização visto que os dispositivos sensores estão muito tempo num estado “*sleep*”, oferecendo maior tempo de vida às baterias. No caso de um dispositivo necessitar de estar activo muito tempo, transmitindo informação em distâncias menores com menor latência e com superiores requisitos de QOS, a melhor solução será o *Bluetooth*. Por outro lado, se forem necessários maiores alcances de transmissão e uma rede mais forte então o *Wi-Fi* é indicado para tal, mas tem maior consumo.

Atendendo às características de todas estas tecnologias e às necessidades do projecto, verificou-se que **o protocolo *Zigbee* é a melhor opção para a rede de sensores sem fios do projecto em que se inclui este estudo.**

2.4 Tecnologia *ZigBee*

2.4.1 Introdução

A *Zigbee Alliance* desenvolve o padrão *Zigbee* junto do IEEE, através da associação de várias empresas, que trabalham em conjunto. O objectivo da *Zigbee Alliance* é proporcionar aos consumidores inovação em termos de flexibilidade e mobilidade, construindo inteligência wireless e capacidades em cada dispositivo. Assim surge um padrão de baixo consumo de energia, baixo custo, com segurança, confiança e com funcionamento em redes sem fio, permitindo a comunicação entre dispositivos electrónicos. A tecnologia *Zigbee* está inserida num vasto leque de produtos e aplicações desde a medicina, a indústria, e organizações governamentais. Este *standard* é baseado numa norma global, estando disponível em qualquer país do mundo, no âmbito das redes de área pessoal (PAN) [4, 5].

A Figura 3 ilustra diversas aplicações que o *ZigBee* pode ter, neste caso numa habitação comum.

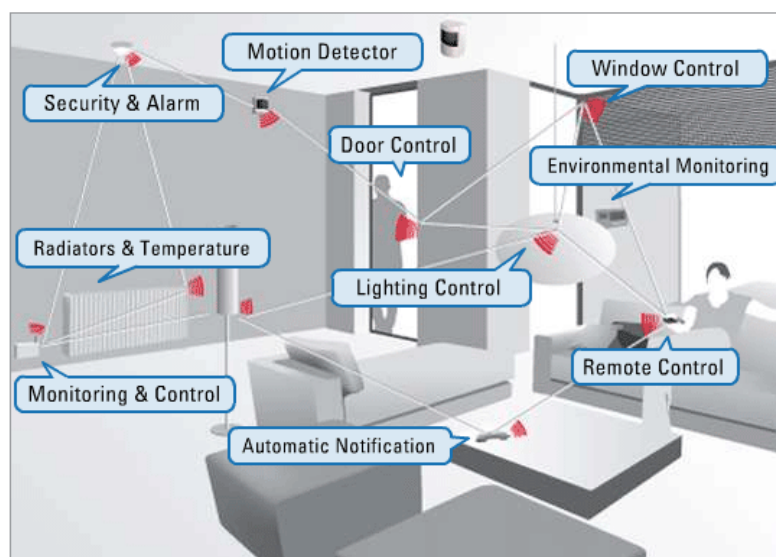


Figura 3- Aplicações do *ZigBee* numa casa [13]

2.4.2 Perspectiva Histórica

Numa fase anterior à tecnologia *ZigBee* e da constituição da *Zigbee Alliance*, a responsável por esta tecnologia foi a empresa *Philips*, sendo nessa época designado por protocolo *Home RF Lite*. Após a união das empresas da área surgiu a primeira versão do *Zigbee* que foi apresentada ao público em 27 de Julho de 2005 (embora tenha efectivamente surgido em Dezembro de 2004). Vários anos de pesquisa e experiência adquirida em desenvolvimento de produtos, resultaram numa revisão do protocolo, sendo definido em 2007 como *ZigBee PRO* [2].

Apesar de actualmente existir diversas topologias, foi através da topologia em malha (*mesh*) que se lhe associou o nome. Uma malha *ZigBee* apresenta múltiplos percursos possíveis entre cada dispositivo, o que permite eliminar um possível ponto de falha, através do “zig” e “zag” da informação pela rede. Assim, o nome deste protocolo surge da analogia da estrutura e modo de funcionamento da rede de comunicações, para com modo de vida das abelhas. Actualmente a *Zigbee Alliance* está incluindo novos e mais abrangentes recursos, possibilitando que os fabricantes aumentem significativamente a capacidade e

potencialidades do *Zigbee*. Mais de 300 empresas estão associadas à *Zigbee Alliance* em vários países e com um crescimento acentuado [4, 5].

2.4.3 Arquitectura Protocolar *Zigbee*

A arquitectura *Zigbee* define a rede, os serviços da aplicação e os parâmetros de segurança para a totalidade da rede. Um dos objectivos da existência de uma arquitectura *ZigBee* é permitir que os componentes desenvolvidos para um determinado sistema, possam ser utilizados em muitos outros sistemas. Esta arquitectura é estruturada em cinco camadas: **PHY** (Camada física), **MAC** (Camada de Controlo de Acesso ao Meio), **NWK** (Camada de rede), **Suporte para aplicação (APS)** e **Aplicação**. Cada camada é responsável por uma lista de serviços que terá de disponibilizar para as camadas superiores. A interface entre uma camada inferior e superior é garantida pelos SAP (*Service Access point*) [6].

Embora se baseie no modelo OSI de sete camadas, a arquitectura protocolar *ZigBee* define apenas as camadas de interesse para atingir as funcionalidades desejadas. De uma forma simplificada, as diferentes camadas são esquematizadas com a Figura 4. A diferença de cores indica a diferença entre os standards utilizados, ao longo da arquitectura.

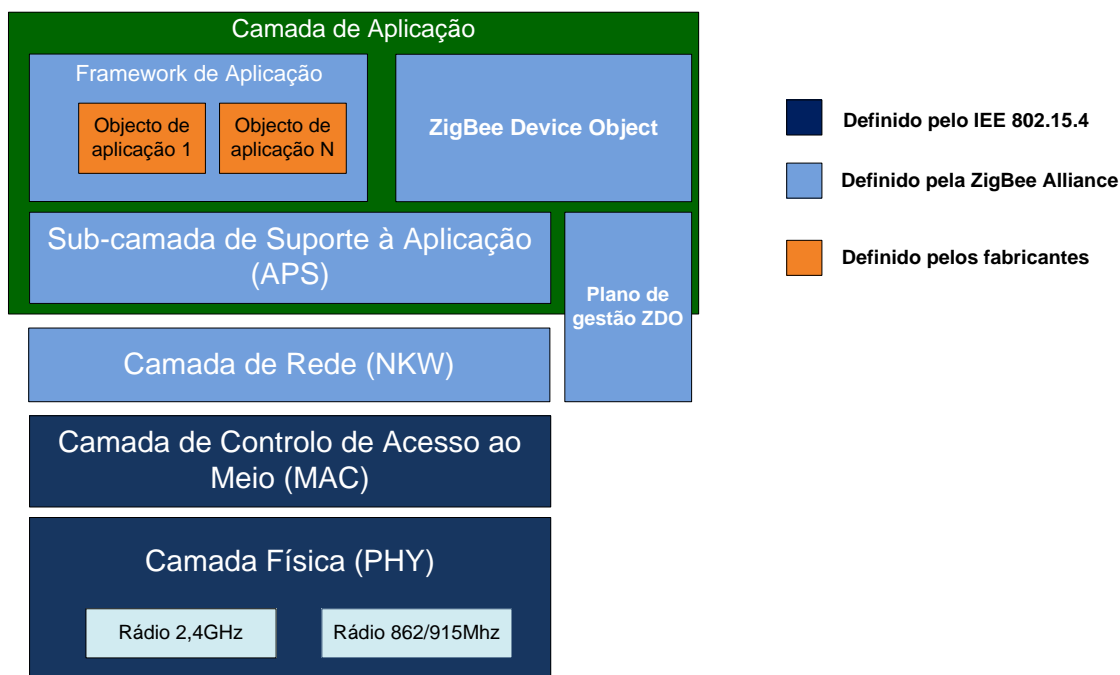


Figura 4- Arquitectura *ZigBee* [2]

A tecnologia *ZigBee* baseia-se no protocolo IEEE 802.15.4, que especifica a camada física e a camada MAC para redes pessoais de baixo custo e de baixa taxa de transmissão (LR-WPAN). Já as camadas NWK, Suporte à aplicação e Aplicação são definidas pela *ZigBee Alliance* [5].

2.4.3.1 Camadas PHY e MAC

Camada Física

A camada física é responsável pela activação e desactivação do transceptor, selecção do canal de frequência, transmissão e recepção de dados, detecção de energia no canal (ED), indicação da qualidade da ligação para os pacotes recebidos e CCA (*clear channel assessment*) para o protocolo CSMA-CA da camada MAC. A comunicação efectua-se na banda dos 868 MHz (1 canal), 915 MHz (10 canais) e ainda 2,4 GHz (16 canais). As Redes *ZigBee* oferecem uma excelente imunidade contra interferências, e têm capacidade de agregar um grande número de dispositivos. São destinadas a aplicações industriais, portanto, o factor velocidade não é crítico numa implementação [3, 4].

Os módulos de rádio frequência do padrão *ZigBee* foram criados para economizar ao máximo energia. Através desta importante característica, é possível criar dispositivos sensores remotos alimentados com pilhas ou baterias comuns, que durarão meses ou mesmo anos sem precisarem ser substituídas. Isto deve-se ao facto de que os módulos *ZigBee* quando não estão transmitindo/recebendo dados entram num estado de pausa, consumindo o mínimo de energia [4].

Com a modulação de sinal, as sequências de dados digitais que formam a informação são convertidas em formas de onda adequadas à transmissão pelo canal. A banda dos 2450MHz, utiliza a técnica de modulação de sinal O-QPSK, enquanto que as bandas dos 868 e 915MHz utilizam o BPSK [3].

O protocolo 802.15.4 possui mecanismos e funcionalidades muito importantes, que fortalecem e dão grandes capacidades a uma rede *wireless*. De seguida são apresentados algumas dessas características que a camada física possui, tornando o *ZigBee* extremamente atractivo. A primeira dessas técnicas é a técnica de espalhamento espectral, por sequência directa (DSSS), que é utilizada em qualquer uma das zonas do espectro.

DSSS

O protocolo 802.15.4 pertence à classe de tecnologias de espalhamento espectral. O espalhamento espectral é um mecanismo de transmissão, em que a sequência dos dados de informação ocupa uma largura de banda muito mais elevada que a mínima necessária.

Apesar de nas comunicações digitais se procurar uma eficiência em termos de largura de banda, por vezes poderá ser necessário sacrificar essa eficiência em função de uma comunicação mais segura. Esta técnica tem a vantagem de rejeitar muita da interferência que possa estar presente no ambiente de operação da rede de sensores. A Figura 5 ilustra o sinal de banda estreita (*Narrow-band signal*) e o sinal depois de sofrer o espalhamento (*Spread Signal*) [7, 8].

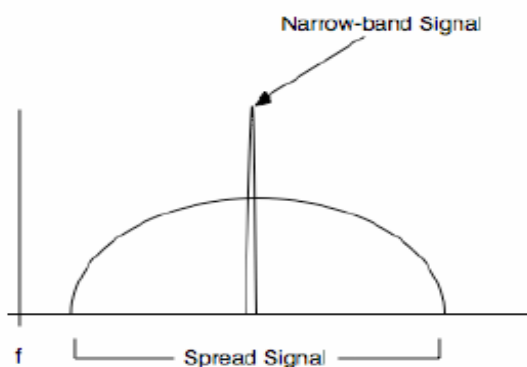


Figura 5- Sinal com espalhamento espectral [8]

O espalhamento espectral directo é realizado antes da transmissão, com recurso a um código (PN) independente dos dados de informação. A sequência de pseudo-ruído (PN) é uma sequência binária periódica, com forma de onda semelhante ao ruído. Esse sinal é aplicado então a um modulador balanceado, juntamente com o sinal original, obtendo-se no final um sinal modulado mas com uma largura de banda mais elevada [7, 8].

Do lado do receptor, este utiliza o mesmo código para recuperar a sequência de dados inicial. Com estes mecanismos a mensagem é camuflada no ruído de fundo, sendo o sinal transmitido com baixa potência média. Para um receptor não desejado que não conheça o código de espalhamento, este irá ignorar o sinal, considerando-o como um ruído em banda larga [7, 8]. Este mecanismo aumenta em muito a segurança na transmissão dos dados.

Múltiplos canais

O protocolo 802.15.4 aumenta a possibilidade de coexistência com outras redes, nomeadamente com a rede *Wi-Fi*, dividindo a banda dos 2,4GHz em 16 canais possíveis, que tem 2MHz de largura e 5MHz de separação entre as frequências centrais dos canais [8]. Na Figura 6 são apresentados os diversos canais.

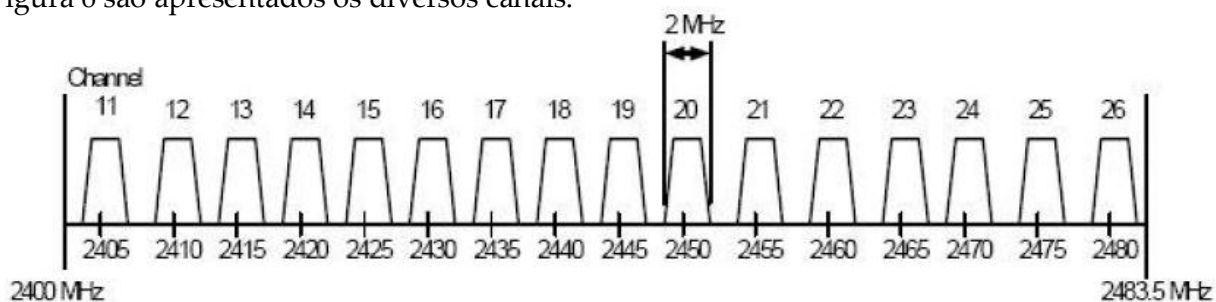


Figura 6-Espectro do protocolo IEE 802.15.4 nos 2,4GHZ [8]

A Figura 7 ilustra a **coexistência** entre as duas redes. Os canais 15, 16, 21 e 22 do *ZigBee* estão situados entre as bandas utilizadas normalmente pelo protocolo 802.11.b. Assim sendo, um dispositivo *Zigbee* poderá operar num destes canais, sem sofrer nem causar interferência com a outra rede [8].

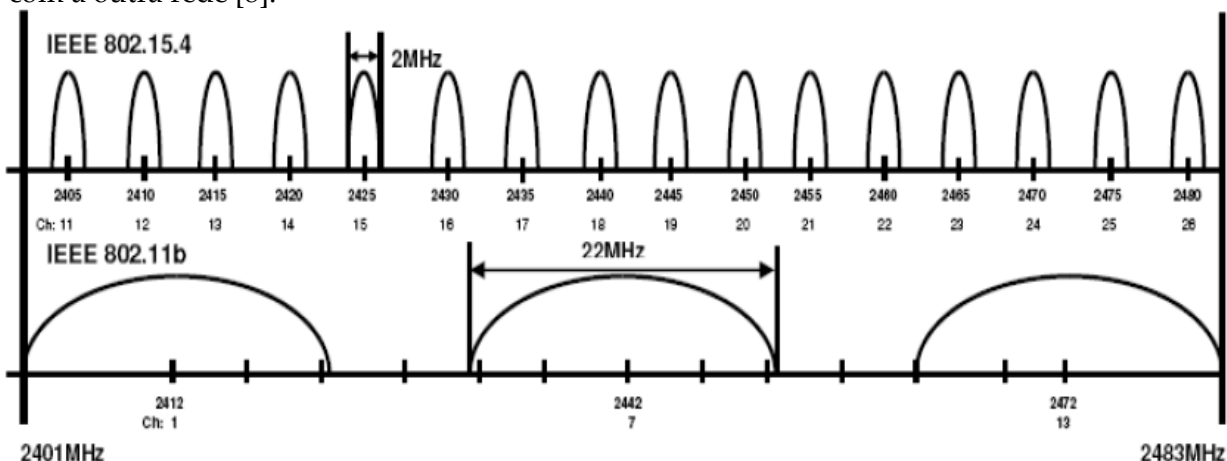


Figura 7-Coexistência entre os protocolos 802.15.4 e o 802.15.11b [8]

Scanns e relatórios

A camada física do protocolo 802.15.4 tem a habilidade de analisar um determinado canal, medir a sua energia e reportar quando o canal está livre de interferência e livre para transmitir. Esta informação é disponibilizada para a camada de rede como parte do algoritmo de selecção do canal, no sentido de que os dispositivos que sigam este padrão da IEEE tenham a possibilidade de seleccionar o melhor canal disponível para operação [8].

Acknowledgements e retransmissões

Este protocolo inclui por definição, os “*acknowledgements*” das mensagens recebidas. Ou seja, aquando da recepção de uma mensagem, cada dispositivo tem um tempo para enviar uma pequena mensagem de *acknowledgement* (ou seja confirmando a recepção). Esta técnica permite que mensagens que são enviadas mas que não chegam ao destinatário sejam detectadas. Se o dispositivo transmissor não recebe o *acknowledgement*, ele assume que a mensagem não foi recebida e tentará enviar novamente. São feitas retransmissões e após algumas tentativas, se não for recebido esse aviso por parte do transmissor, este dá por terminado as tentativas e reporta uma falha de envio [8].

Camada MAC:

A camada MAC tem fundamentalmente o papel de controlar o acesso aos canais RF, utilizando mecanismos de prevenção de colisão CSMA-CA, para o qual efectua comunicações com a camada inferior (camada PHY).

CSMA-CA: É uma técnica utilizada para evitar colisões em redes sem fio. Com este mecanismo, antes do nó sensor enviar um determinado pacote, o dispositivo assegura-se que o canal está livre (nenhum outro nó está a transmitir ao mesmo tempo). Se o canal estiver livre, então o pacote é enviado. Se o canal está ocupado, o Nó espera um período de tempo aleatório (existe um contador que vai decrescendo à medida que as tentativas de comunicação vão acontecendo, o tempo de espera vai diminuindo) e depois disso volta a tentar a transmissão, verificando a ocupação do canal. Se desta vez o canal estiver livre, dá-se a comunicação. Caso contrário o dispositivo volta a esperar mas com um período de tempo menor, até chegar-se à transmissão efectiva do pacote.

A camada MAC define também **dois tipos de Nós:** FFD (Dispositivo de funções completas) e o RFD (Dispositivo de funções reduzidas). Estes Nós são equipados com um conjunto completo de funções desta camada MAC, que permitem que eles actuem como coordenadores de rede ou como dispositivo final [3, 6].

FFD: São dispositivos que necessitam de um hardware com maiores capacidades, pois tem um grau de complexidade mais elevado, o que leva a um maior consumo de

energia. Numa topologia de rede *ZigBee* eles poderão ter tarefas de coordenador, *router* ou mesmo de um dispositivo final (*End Device*). Estes dispositivos podem se comunicar com quaisquer membros da Rede.

RFD: São dispositivos mais simples, relativamente aos anteriores. Podem realizar as suas tarefas, utilizando os recursos mínimos possíveis de hardware, como por exemplo, em microcontroladores de 8 bits com pouca memória. Numa topologia de Rede *Zigbee* eles assumem apenas o papel de dispositivo final, só podendo se comunicar com dispositivos FFDs (Coordenador ou *router*) [2] [4].

A camada MAC é ainda responsável pela geração e sincronização de beacons. Os *beacons* são pacotes de controlo que delimitam frames utilizadas pelo coordenador para sincronizar com os demais dispositivos da rede [2].

Modos de operação da rede:

O coordenador pode operar a rede PAN com uma *super-frame* ou sem ela. Esses dois modos são conhecidos como modo *beaconing* e modo *non-beaconing*.

- ***Modo beaconing***

Este é um modo totalmente coordenado, onde todos os dispositivos sabem quando se ligar uns aos outros. Neste modo, o coordenador de rede irá periodicamente “acordar” e enviar sinalização (*beacon*) para os dispositivos presentes na rede. Ao receber o *beacon*, cada dispositivo têm de determinar se tem alguma mensagem para enviar, se não o dispositivo retorna a “dormir”. Neste modo, o consumo de energia é o mínimo possível.

A Figura 8 apresenta o formato da *super-frame*, utilizada pelo coordenador.

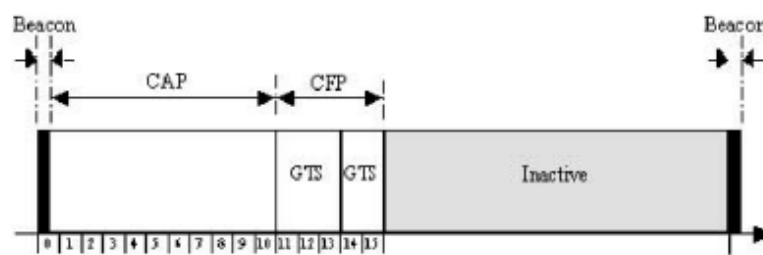


Figura 8- Super frame [3]

A *super-frame* inicia-se com um *beacon*, que serve para sincronização e para envio de informação de controlo para a rede. A *super-frame* é dividida em duas porções, activa e inactiva, sendo que nesta ultima porção o coordenador pode adormecer e poupar energia. A porção activa contém um período de acesso contido (CAP), onde os nós competem pelo acesso ao canal através do CSMA-CA, e um período livre de contenção (CFP) onde cada nó transmite sem preocupações com outros dispositivos utilizando “*time slots*” garantidos (GTS), administrados pelo coordenador.

Do ponto de vista do *end device*, quando possui informação para transmitir, tem de esperar que receba um *beacon* para sincronizar e posteriormente competir pelo acesso ao meio, enviando dados nos *time slots* garantidos (GTS) [3].

- **Modo *non-beaconing***

Este método é menos coordenado, sendo que qualquer dispositivo da rede pode comunicar a vontade com o coordenador. Contudo, esta operação pode causar interferências entre diferentes dispositivos e o coordenador terá de estar sempre acordado para a procura de sinais, mas o consumo é muito maior. Mesmo assim o consumo da rede *ZigBee* neste modo é ainda baixo, porque a maioria dos dispositivos da rede pode manter-se “adormecido” a maior parte do tempo. Neste caso, o acesso ao canal e a contenção são geridos apenas utilizando o mecanismo CSMA-CA [3].

2.4.3.2 *Camada de rede e de aplicação*

Como já foi referido anteriormente, o protocolo *ZigBee* formaliza os níveis mais altos da arquitectura da tecnologia *ZigBee*. A camada de rede é encarregada de organizar e proporcionar o encaminhamento, enquanto que a camada de Aplicação tem como objectivo proporcionar um Framework para aplicações distribuídas [2, 4].

Camada de Rede:

A camada de rede do *Zigbee*, inclui mecanismos para integrar e desintegrar redes, sendo da sua responsabilidade o início ou fim de ligação de cada dispositivo na rede. Uma das suas tarefas é também descobrir novos dispositivos na vizinhança, guardando informação relativa aos mesmos. No dispositivo coordenador, esta camada faz ainda a atribuição de endereços.

Estão presentes nesta camada mecanismos de descoberta de rotas, bem como de configuração de novos dispositivos.

No protocolo *ZigBee* existem três tipos de dispositivos lógicos (coordenador, *router* e dispositivo final) que definem a rede [4].

ZC - Coordenador *Zigbee* – Este dispositivo lógico pode apenas ser implementado através de um dispositivo físico FFD. O coordenador tem responsabilidades em termos de inicialização, manutenção da rede, distribuição de endereços, reconhecimento dos Nós, entre outras funções.

ZR – *Router Zigbee* – Neste caso também só pode ser implementado através de um dispositivo FFD. Tem as características de um Nó normal na rede, mas com capacidades extras de também poder ser *router* intermediário entre Nós, sem precisar do coordenador. Por intermédio de um *router*, uma rede *ZigBee* poder ser expandida e assim ter mais alcance (permite a inserção de novos nós).

ZED – Dispositivo final *Zigbee* ou Nó Sensor (*End device*) - É o dispositivo onde os sensores específicos estarão localizados. Pode ser implementado através de um dos dispositivos FFD ou RFD. Ele é o componente que consome menos energia, pois na maioria das vezes ele fica no modo “*Sleep*”.

As redes *Zigbee* apresentam-se muitas das vezes numa topologia em estrela, no entanto a camada de rede *Zigbee* suporta ainda topologias mais complexas como a topologia de árvore ou *mesh* (malha). De entre as funcionalidades proporcionadas pela camada de rede, destacam-se ainda a segurança e controlo sobre as entradas e saídas de novos dispositivos na rede [4, 5].

A Figura 9 apresenta as várias configurações possíveis, ao nível de topologia da rede ZigBee.

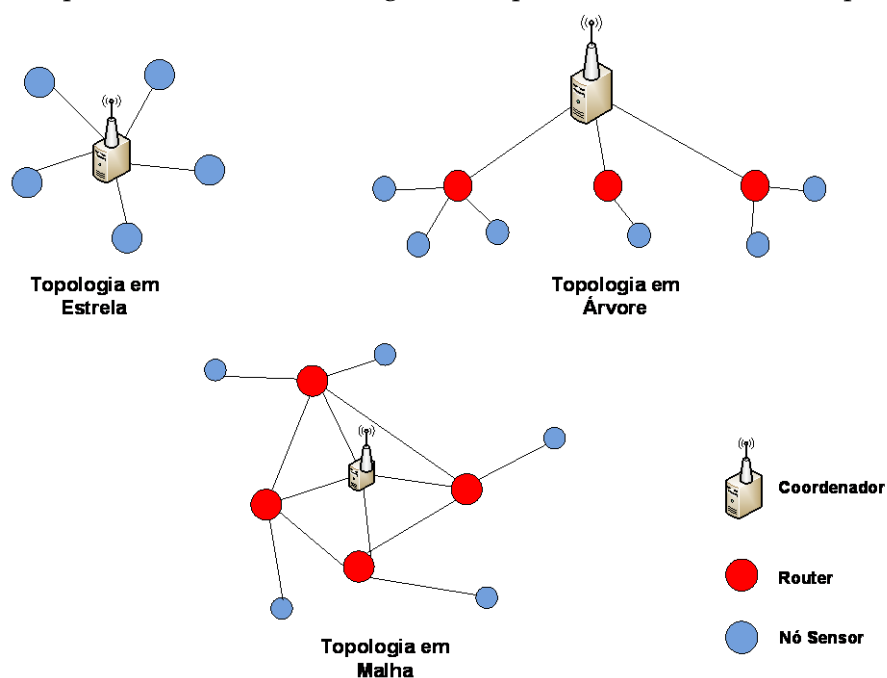


Figura 9- Topologias de rede para as redes WSN [4].

Topologia em Estrela:

Neste tipo de rede é ao coordenador *Zigbee* que cabe todo o controlo da rede, assumindo este um papel central e de comunicação directa com todos os dispositivos *End device*. É o coordenador que inicia e mantém os dispositivos na rede. Toda a informação em circulação na rede passa pelo nó coordenador.

Topologia em Malha:

Numa topologia em malha os dispositivos do tipo FFD (Coordenadores e *routers*) são livres de comunicar com outro dispositivo FFD. Isto permite, quando necessária, a expansão física da rede. O Coordenador regista toda a entrada e saída de dispositivos, mas não assume um papel tão preponderante em termos de fluxo de informação como na configuração anterior.

A coexistência da rede *ZigBee* com uma outra rede *wireless* ou com outros elementos causadores de interferência, beneficia em muito da topologia em malha. Como é possível verificar na Figura 10, uma rede *ZigBee* irá escolher uma rota de encaminhamento diferente, caso o trajecto inicial previsto esteja obstruído por uma interferência [8].

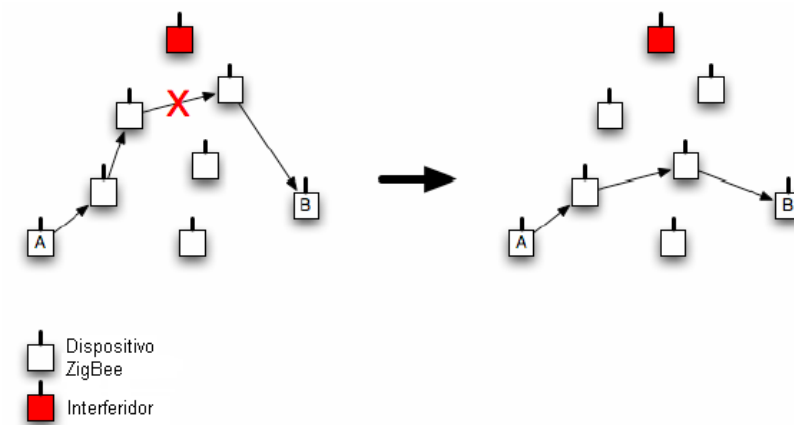


Figura 10- Habilidade de evitar interferências [8].

Topologia em Árvore:

Apresentando semelhanças à rede em malha, são também utilizados dispositivos router. No entanto, nesta topologia efectua-se a distribuição de dados e mensagens de controlo numa estrutura hierárquica, onde o coordenador assume o papel de nó essencial da rede.

Criação da rede ZigBee:

Uma rede 802.15.4 inicia-se da seguinte forma: um dispositivo com capacidades de ser coordenador de rede identifica um canal de comunicação físico, que esteja relativamente livre de interferência através de *scans* de energia. Depois disto, um dispositivo que queira se juntar à rede irá requerer a entrada em acção da camada de rede, que irá iniciar um procedimento de descoberta de rede. Mais concretamente o *end device* irá fazer "*beacon requests*" para solicitar beacons de um coordenador que poderá permiti-lo se juntar à rede. Após a troca de mensagens entre coordenador de rede e o *end device*, está então estabelecida a ligação. Inicialmente apenas o coordenador de rede poderá responder às solicitações dos *end devices*. No entanto, posteriormente um outro dispositivo poderá responder, mais concretamente um *router*. Este irá permitir a entrada de novos nós, alargando a rede ZigBee [6].

Camada de aplicação:

Quanto à camada de aplicação (APL), esta contém a sub-camada *APS*, o *Zigbee Device Object (ZDO)* e a *Application Framework (AF)*. Esta camada pretende assegurar uma correcta gestão e suporte para as diversas aplicações.

Nesta camada está presente um conjunto de objectos de aplicação (APO's) espalhados em vários nós de uma rede. Um APO é uma parte de *software* que controla uma unidade de *hardware* (por exemplo: transdutor, *switch*, lâmpada) disponível no dispositivo. A cada APO é atribuído um único número de identificação terminal, e assim outro APO pode usar essa identificação para interagir com esse último.

O ZDO (*Zigbee Device Object*) é um objecto especial que oferece serviços aos APO's, permite que eles descubram dispositivos na rede, bem como o tipo de serviços que eles podem oferecer. Proporciona também comunicação, e serviços de gestão de rede e segurança [2, 4]. Quanto à camada anterior a esta, ou seja a de suporte à aplicação, ela é utilizada para comunicar a informação da camada de aplicação entre dispositivos [6].

Nota: Estas últimas duas camadas não foram alvo de um estudo pormenorizado, isto porque fazem parte da área de acção de um outro projecto de Mestrado. Assim sendo, com este estudo da arquitectura apresentado, ficaram claras as potencialidades da tecnologia *ZigBee*, e mais concretamente das capacidades que a camada física proporciona, utilizando o protocolo 802.15.4.

2.5 Estudo de Mercado

Nesta secção são apresentadas soluções existentes no mercado, que estão relacionadas com o protótipo do nó sensor proposto neste projecto de Mestrado. São produtos disponíveis para alguns tipos de aplicações, no entanto apresentam na sua maioria custos elevados.

2.5.1 MICA2 e MICA2DOT

Estes dispositivos foram desenvolvidos pela Universidade de Berkeley e são comercializados pela *Crossbow Technology Inc.*

O microcontrolador de 8 bits utilizado é o ATmega 128L e o sistema de rádio frequência é baseado no *chip* CC1000 da *Chipcon*, que trabalha com baixa potência e baixos níveis de tensão, operando na faixa ISM e SRD (*Short Range Device*). A banda de frequência situa-se nos 315, 433, 868 e 915 MHz. Este sistema de rádio utiliza a modulação FSK (*Frequency Shift Key*), que permite atingir taxas de transmissão da ordem de 76.8Kbps. O *chip* é alimentado com tensões que podem variar entre 2.1V e 3.6V, permitindo que o sistema de rádio trabalhe com o mínimo de recursos energéticos [9]. Na Figura 11 observa-se o kit que a marca disponibiliza para monitorização.

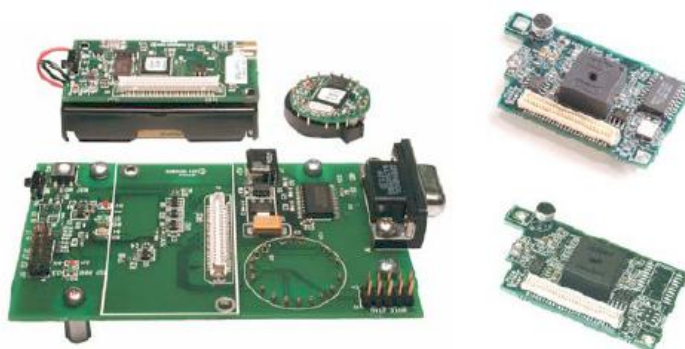


Figura 11 - Kit de desenvolvimento da Crossbow

A *Crossbow* disponibiliza diversas placas de sensores e aquisição de dados, que são independentes da placa de processamento e rádio, mas que juntas formam um sensor completo, que poderá medir por exemplo: temperatura e CO₂. Além disto, a empresa desenvolve uma placa para a estação base receber a informação da rede.

2.5.2 Mica Z

O Mica Z é um módulo *wireless* de baixo consumo para redes de sensores. Segue o protocolo IEEE 802.15.4, funcionando na banda dos 2,4GHz. Utiliza a técnica DSSS que é resistente a interferência, proporciona segurança de informação e taxas de transferências de 250Kbs.

Utiliza na sua arquitectura o mesmo microcontrolador utilizado na plataforma Mica e trabalha com o sistema de rádio CC2420 desenvolvido pela *Chipcom*. Este dispositivo é compatível com o sistema operacional *TinyOs* e com a maioria das aplicações desenvolvidas para a plataforma Mica2 e Mica2dot. Na Figura 12 observa-se um destes nós.



Figura 12- Módulo Mica Z

A *Crossbow*, empresa que comercializa estes módulos, oferece uma variedade de placas de aquisição de dados (módulos sensoriais) para o módulo Mica Z. Qualquer uma dessas placas pode ser conectadas ao Mica Z através de um conector de 51pins [10].

2.5.3 Tmote Sky

O *Tmote Sky* é um módulo de comunicação *wireless* de baixo consumo, para utilização em redes de sensores e aplicações de monitorização. É desenvolvido pela *Crossbow Inc* e utiliza a tecnologia *ZigBee* para a comunicação por rádio frequência. Este tipo de dispositivo utiliza o *chip* CC2420 desenvolvido pela *Chipcom*, e o rádio trabalha com a modulação QPSK através do DSSS. O módulo utiliza o microcontrolador MSP430 da empresa *Texas Instruments*, de 16bits que trabalha a uma frequência de 8MHz. Um dos pontos fortes deste nó sensor é a utilização da interface USB (Universal Serial Bus), que facilita a programação dos dispositivos e a troca de informações com a estação base. Na Figura 13 mostra-se um exemplar desta marca [11].



Figura 13- Nó Sensor Tmote Sky

O *Tmote Sky* é alimentado por duas baterias AA, sendo que essas duas baterias garantem uma tensão entre 2.1 e 3.6V. A alimentação é fornecida pela porta USB, sempre que o módulo está conectado a esta, sendo neste caso uma alimentação de 3V. Este módulo comunica para o exterior usando uma antena integrada no circuito que tem um alcance de 50 metros em locais fechados e alcance de 125 metros em locais abertos, sendo uma vantagem para a rede de sensores. Ao nível sensorial, o dispositivo tem embutido três sensores, humidade, temperatura e luminosidade. Os sensores de temperatura e humidade são fabricados pela *Sensirion* de modelo SHT11 ou SHT15. O sensor de luminosidade é fabricado pela *Hamamatsu Corporation* de modelo S1087-01. O preço deste módulo aproxima-se dos 80 €, já com os sensores incluídos [11].

2.5.4 Conclusões do estudo de Mercado

Actualmente existem várias empresas que colocam no mercado produtos dedicados à monitorização *wireless*. Neste estudo foram apenas apresentadas três marcas de sensores, no entanto existem outras mas que no geral seguem princípios semelhantes. Os Micas apresentam claras potencialidades, no entanto as placas dos sensores específicos são separadas da placa de processamento, o que pode ser uma desvantagem principalmente a nível custos. Outra desvantagem é a programação dos módulos que tem de ser feita ligando os dispositivos à estação base, aumentando o tamanho e os custos dessa placa.

Os sensores que são apresentados mais a frente (construídos de raiz para este projecto), poderão competir com estes e até superar em alguns pontos. São sensores projectados especificamente para o Museu, e com custos bem mais ligeiros do que os sensores Mica.

As áreas mais relevantes para desenvolvimento nos novos dispositivos são: o tamanho, os custos e o consumo energético.

2.6 Conservação de obras de arte em Museus

Antes de terminar este segundo capítulo, é importante entender os parâmetros que serão monitorizados pelos sensores, justificando o porquê da recolha dessa informação. Para isso efectua-se um estudo sobre a conservação das obras de arte em Museus, com base em documentação fornecida pelo próprio Museu de Arte Contemporânea da Madeira, que irá receber o sistema. Melhor do que ninguém, os responsáveis por estes espaços sabem quais as necessidades e quais as preocupações com a luz, temperatura e humidade que se encontram nas salas.

Um Museu além de proporcionar ao público um espaço para exibição de um conjunto de obras de arte, tem também como missão fundamental preservar esse património cultural para as gerações futuras. Essa missão representa uma grande responsabilidade para os museus, envolvendo também alguns custos para que seja garantida a integridade dos objectos exibidos, bem como do resto do seu espólio mantido nos seus espaços reservados. Cada artefacto ou obra cultural exige um cuidado específico consoante a sua natureza, a sua fragilidade, o seu estado de conservação e o seu valor patrimonial. Assim sendo, é importante ter um bom conhecimento sobre as características específicas dos materiais constituintes de cada obra de arte [12].

2.6.1 Variáveis a monitorizar

A monitorização de luz, da humidade relativa (H.R) e da temperatura devem ser efectuadas em todos os espaços, quer nas áreas de exposição, reservas ou outros locais que acolhem obras de arte num determinado Museu. O responsável deve periodicamente recolher, analisar os dados e elaborar relatórios [12].

Luz:

A luz visível é a parte do espectro electromagnético que os nossos olhos conseguem ver. Trata-se de uma radiação electromagnética pulsante, ou seja, qualquer radiação electromagnética que se situa entre as radiações infravermelhas e as radiações ultravioletas.

A presença excessiva de luz nas obras de arte pode trazer consequências graves, isto porque a luz pode criar ou acelerar reacções fotoquímicas que contribuem para a degradação dos objectos, provocando desvanecimento e degradação. Em termos de unidades, o lux (lúmen por metro quadrado) é a unidade utilizada para medir a intensidade da luz. Para os valores de ultra violeta, a medida utilizada nesta área é o micro watt por lúmen. Com a tabela 2, mostra-se os limiares de sensibilidade de alguns materiais em relação aos parâmetros anteriormente abordados [12].

Tabela 2- Sensibilidade dos materiais

Materiais/ Sensibilidade	Lux(lúmen/m ²)	U.V ((μ W/m ²)
Muito sensíveis: aguarelas, guaches, obras em papel, pergaminhos, fotografias, colecções etnográficas.	<50	<30
Sensíveis: pintura a óleo, couro não pintado, mobiliário, osso, marfim, etc.	<200	<75
Pouco sensíveis: metais, pedra, cerâmica, vidro	<300	<75

Nota: Os dados da tabela anterior baseiam-se em vários estudos que têm sido desenvolvidos para o estabelecimento de limites para cada tipo de material cultural Os valores são previstos para uma exposição diária de 7 horas.

Humidade e Temperatura

Estes dois aspectos são muitos importantes quando se pretende caracterizar as condições ambientais de um determinado espaço para exposição ou reserva de obras de arte.

O ar, no nosso ambiente normal tem sempre alguma humidade. O número de moléculas de água presentes no ar pode variar substancialmente, consoante mudamos de cenário. Como qualquer outra substância o ar tem um limite de absorção, este limite denomina-se de

saturação. Abaixo do ponto de saturação o ar húmido não se distingue do ar seco ao simples olhar, sendo absolutamente incolor e transparente. Acima do limite de saturação a quantidade de água em excesso precipita-se em forma de neblina ou pequenas gotas de água. Assim sendo, é possível definir a **humidade relativa** como a relação entre a pressão de vapor do ar (num determinado instante) e a pressão de vapor do ar obtida em condições de equilíbrio ou saturação.

Existem tabelas de referência com valores teóricos recomendados de temperatura e humidade relativa para vários tipos de materiais, no entanto mais importante do que seguir à risca esses valores é evitar ao máximos o aparecimento de oscilações bruscas, que poderão provocar danos consideráveis. Mesmo assim, é importante saber que o limite de humidade relativa para o comportamento normal de vários objectos (entre os quais pinturas) é de 70%. A cima deste valor a resistência estrutural pode diminuir de forma significativa, abaixo dos 40% a estrutura dos materiais orgânicos pode se alterar, mais propriamente aumentar de rigidez e tornar-se quebradiça. No que diz respeito aos metais, estes devem estar num ambiente de humidade relativa abaixo dos 30% para evitar fenómenos de corrosão (aparecimento de ferrugem). Se estivermos perante materiais orgânicos, aguardando tratamento e restauro, provenientes de ambientes subaquáticos tem de ser conservados em ambientes saturados de 100% de humidade relativa (ou imersos em água).

Existe uma relação entre a temperatura e a humidade relativa (H.R). Num espaço fechado, como uma sala, vitrina, onde as trocas de ar são lentas, **um aumento de temperatura pode baixar os valores de H.R e vice-versa**. Por exemplo, numa sala com 15°C e com 80% de humidade, se aumentar-se a temperatura para 20°C, a humidade desce para os 60%, provocando uma oscilação de 20%. No entanto, flutuações bruscas de H.R poderão alterar a estabilidade dimensional das obras de arte, levando ao aparecimento de fendas, deformações, vincos, rasgões e outras alterações indesejáveis.

Normalmente quando há um aumento da temperatura, um material expande, por outro lado quando esta diminui o material contrai. Se aparecerem oscilações bruscas de temperatura que se repitam no mesmo espaço, estas provocam ciclos de expansão e contracção num dado material, contribuindo para a sua degradação. Um aumento de temperatura favorece também a velocidade das reacções químicas, ou seja a velocidade de

degradação. Se não forem detectados problemas na conservação das obras de arte, então a temperatura deve ser mantida [12].

2.7 Conclusões do capítulo

Após o estudo efectuado, observou-se que numa determinada fase a maioria das referências encontradas evidencia as potencialidades dos sistemas que utilizam as redes de sensores sem fios e a sua variedade de aplicações. Vários projectos foram desenvolvidos em várias partes do mundo, realçando a possibilidade de construir plataformas para aplicações específicas. A maior preocupação durante esse período foi com o consumo de energia, sendo que os nós sensores seriam alimentados por baterias e que o consumo excessivo seria o maior obstáculo, contra a sobrevivência da rede. A partir dessa premissa, o *software* e principalmente o *hardware* deveriam ser adaptados.

Verificou-se que o protocolo *ZigBee* possui inúmeras potencialidades e que a sua importância na implementação das redes WSN é muito significativa, confirmando ainda a possibilidade de coexistência com outras redes no mesmo espaço físico.

Analisou-se ainda as variáveis de interesse que serão alvo de monitorização, percebendo que mais importante do que não ultrapassar limites, por exemplo de luminosidade num espaço do museu, será garantir que não haja mudanças bruscas nos valores dos parâmetros de interesse, com vista a preservar o mais possível as obras de arte.

Por fim o estudo de mercado mostrou que existem soluções de dispositivos nesta área, mas que existem também aspectos importantes ainda com a possibilidade de desenvolvimento.

Capítulo 3

Concepção arquitectural

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o conjunto de dispositivos desenvolvidos, para a monitorização e controlo de factores climáticos em Museus, explorando os mais diversos componentes e áreas envolventes. Num primeiro ponto são identificados os seus requisitos, seguindo-se a apresentação da arquitectura de toda a rede e posteriormente uma exploração dos vários dispositivos constituintes.

3.2 Requisitos para os dispositivos a desenvolver

De seguida, são apresentados os requisitos para a solução de monitorização e controlo de factores climáticos, utilizando um conjunto de sensores wireless. Assim, para que estejam adequados ao fim a que se destinam e para que sejam de certa forma eficientes e discretos, os nós sensores deverão caracterizar-se por:

- Permitir a aquisição dos dados relativos à temperatura, humidade e luminosidade presentes na sua área de acção. Esta aquisição pretende ser fiável e imune aos ruídos, poeiras ou interferências presentes no meio.
- Ter um consumo de energia reduzido, tendo em vista uma boa autonomia (pelo menos 1 mês) visto que a alimentação irá efectuar-se através de duas baterias AA.
- Ter dimensões pequenas, de forma que a sua colocação no Museu não cause muito impacto visual, no entanto sem deixar de efectuar correctamente as suas funções;
- Ter um baixo custo, no sentido de ser uma solução atractiva para os Museus, competindo com outras soluções de mercado.
- Possibilidade de serem integrados num invólucro, que terá de permitir a captação da luz por parte do fotodetector bem como permitir a captação da humidade e temperatura.

- Permitir a transmissão da informação recebida dos sensores através de rádio frequência, sem o incómodo da utilização de cablagem.

No que diz respeito à estação base:

- O coordenador de rede deverá ter ligação directa a um computador, sendo que os dados monitorizados pelos sensores deverão ficar disponíveis para serem tratados, armazenados e visualizados por um programa apropriado, desenvolvido num outro projecto de mestrado, inserido no projecto WISE-MUSE.

Por fim, o dispositivo de controlo deverá:

- Estar integrado na rede *ZigBee*, tendo a capacidade de ligar ou desligar um desumidificador, através de um comando remoto oriundo da estação base.

3.3 Arquitectura da rede

Para a monitorização e controlo de factores climáticos no Museu de arte contemporânea da Madeira, foram desenvolvidos os seguintes dispositivos: 4 nós sensores, 2 dispositivos *router*, um coordenador de rede e um dispositivo para controlo de humidade.

Os nós sensores recolhem as variáveis de interesse (luz, temperatura e humidade), estando dois deles na primeira sala de reservas e outros dois na segunda sala deste tipo. Estes sensores irão enviar os dados por rádio frequência até um dispositivo *router*. O *router* encaminha os dados para o coordenador de rede, que está ligado ao computador do Museu. É importante referir que os dois dispositivos *routers* também efectuem a monitorização ambiental, enviando depois directamente os dados para o coordenador.

Todos estes dispositivos estarão interligados numa rede *Zigbee*, para que possam comunicar e transferir as informações pretendidas.

De entre as várias topologias de rede oferecidas pela tecnologia *ZigBee*, utilizou-se a topologia em árvore, visto ser a que se adequava às reservas do Museu onde foi solicitada a monitorização. Os parâmetros recebidos pelo coordenador de rede podem ser visualizados através de um programa denominado X-CTU. Este faz a leitura dos dados recebidos pelo coordenador, através da porta COM de um computador e apresenta os dados recebidos no ecrã. No caso concreto do Museu, os dados serão visualizados pela plataforma *web* WISE-

MUSE. Assim, essa informação ficará também acessível numa página *web*, sendo que o programa específico e a aplicação *web* foram desenvolvidos num projecto de mestrado de informática.

Existe um outro componente que será colocado no Museu, que é o responsável pelo controlo automático de variáveis climáticas. Neste caso, o dispositivo de controlo irá receber um comando remoto do coordenador de rede, para activar um desumidificador quando for necessário.

Na Figura 14 é apresentada o esquema da arquitectura da rede do Museu:

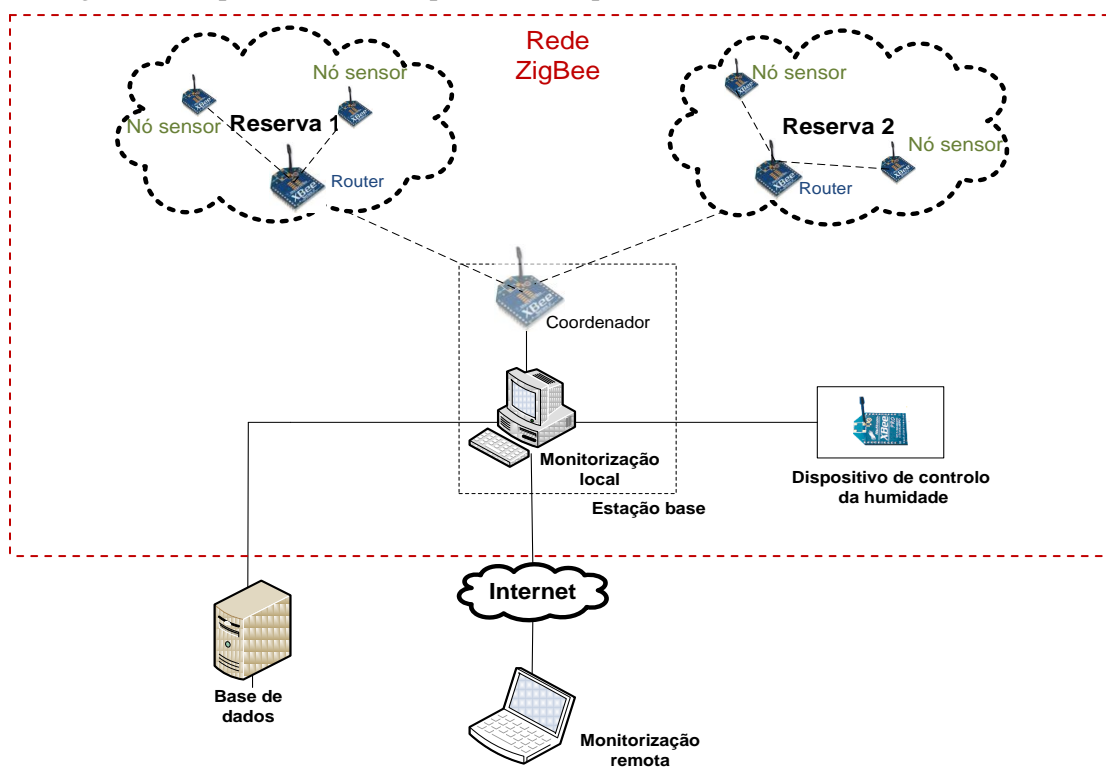


Figura 14- Arquitectura da WSN para o Museu

Analisando a figura anterior, observa-se que a área de acção deste projecto está delimitada por um tracejado vermelho, englobando toda a parte física da rede de sensores e o encaminhamento dos dados monitorizados até à estação base. Fora da área a tracejado, situa-se a base de dados e a monitorização remota através da internet, que como já foi referido é da responsabilidade de outro projecto.

A rede *ZigBee* surge como elemento fundamental de ligação entre todos os dispositivos desenvolvidos, que trabalham conjuntamente na monitorização e controlo ambiental.

A aquisição dos dados ambientais e encaminhamento até a estação base, podem ser melhor compreendidos a partir da Figura 15, onde são apresentados os vários componentes responsáveis por estes processos.

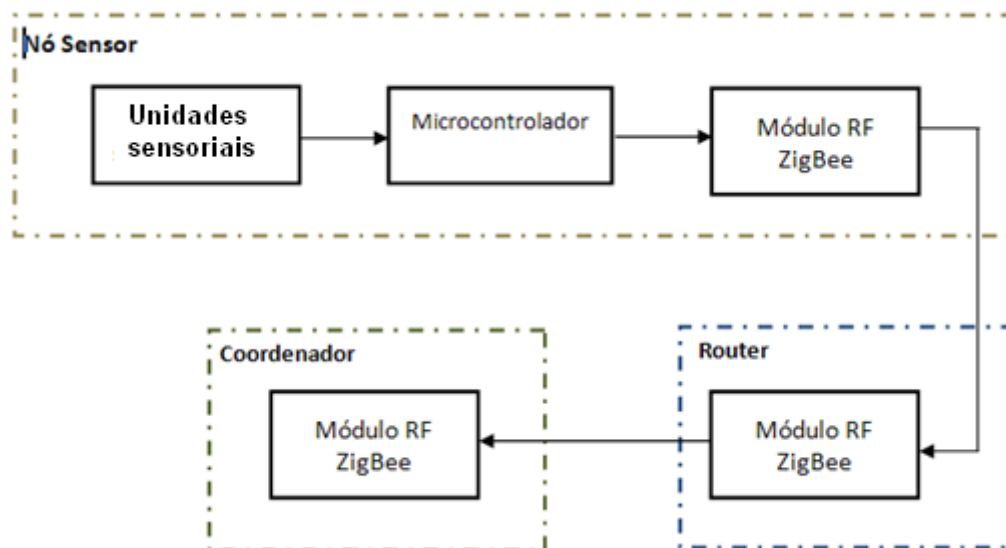


Figura 15- Funcionamento da aquisição dos dados

O processo inicia-se com a recolha dos dados ambientais por parte das unidades sensoriais. De seguida são inseridos no microcontrolador, que fará um tratamento adequado da informação. Posteriormente os dados são encaminhados para o módulo RF *Xbee* do Nó que irá transmiti-los numa mensagem API *ZigBee* por rádio frequência até a estação base, através da rede.

3.4 Dispositivos da rede

Nesta secção, serão apresentados os principais componentes de cada dispositivo desenvolvido, neste projecto de mestrado, identificando as suas principais características e justificando as suas escolhas.

3.4.1 Nós Sensores

Estes dispositivos são responsáveis pela monitorização ambiental nas salas de reservas do Museu. Estarão colocados em posições que garantam um boa cobertura das salas, perto dos

locais onde se encontram as obras de arte. Além de recolher os parâmetros pretendidos, eles transmitem esses dados para um computador (coordenador) na secretaria do Museu.

O nó sensor é composto por quatro fracções essenciais: a **alimentação** fornecida por duas baterias AA, sendo seguida de um circuito *step-up*, com o objectivo de manter 3,3v constantes de alimentação para o microcontrolador, para o *Xbee* e para os sensores; o **microcontrolador** que é o “cérebro” do Nó visto que recebe os dados dos vários sensores individuais, faz o tratamento adequado e envia os dados através da placa de rádio frequência *Xbee*; **os dois sensores específicos**, o primeiro, um sensor de luz que vai medir a luminosidade nas salas do Museu e um segundo sensor que mede simultaneamente a temperatura e a humidade; por fim tem-se o **módulo Xbee** que comunica-se na rede e envia os dados recolhidos.

Esta arquitectura vem ao encontro dos estudos teóricos realizados anteriormente. O processamento surge como módulo central, sendo que os sensores estão directamente ligados a ele. Não existe necessidade de memória externa no módulo sensor, visto que os dados são continuamente enviados para um computador através da rede *ZigBee*. Na Figura 16 observa-se a arquitectura do módulo sensor construído.

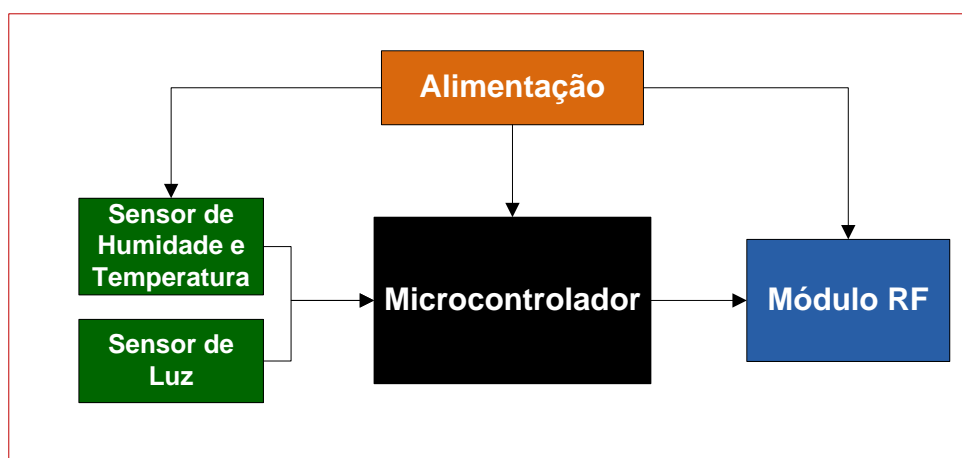


Figura 16- Arquitectura do sensor construído

O protótipo do nó sensor desenvolvido neste projecto de mestrado foi baseado num protótipo construído pelo Eng. Filipe Santos, no âmbito dos estudos iniciais do seu projecto de mestrado intitulado “Monitorização de provas de educação física”. Tendo como ponto de referência esse protótipo, conseguiu-se construir um protótipo com menor consumo de energia, com menores dimensões e menor custo. Além disso, foram efectuadas melhorias no que diz respeito ao módulo de processamento.

Em seguida, são apresentados os componentes do Nó Sensor WISE-MUSE de uma forma mais detalhada.

3.4.1.1 Microcontrolador ATMEGA 168

Introdução

Este componente é a unidade central do Nó Sensor. Recebe os dados vindos das unidades sensoriais, faz o processamento e posteriormente encaminha esses mesmos dados para o elemento transmissor do Nó (*Xbee*). Os microcontroladores AVR estão a ganhar cada vez mais espaço nos novos projectos electrónicos microcontrolados. Isto resulta do seu baixo custo e da sua alta capacidade de processamento. Estas foram duas das razões para a escolha deste componente para o projecto, existindo algumas outras características que tornam atractivo este microcontrolador. Na Figura 17 mostra-se um exemplar deste tipo de microcontroladores.



Figura 17- Atmega 168P

Principais características:

O ATmega168 é um microcontrolador de oito bits de tecnologia CMOS. Com o objectivo de maximizar o desempenho, o AVR segue arquitectura *Harvard*, em que os barramentos associados às memórias de dados e do programa são distintos. Uma das razões para a utilização neste projecto foi a possibilidade de programá-lo em linguagem C, utilizando o protocolo ISP500 para fazer *upload* do código para o microcontrolador [18].

A existência de vários conversores analógicos/digitais no microcontrolador foi outro aspecto que levou à escolha deste componente. Várias entradas digitais estão também disponíveis, podendo agregar vários sensores. Além disto, o facto de possuir oscilador interno leva a uma redução de componentes, comparativamente com outros microcontroladores. Por fim, o seu baixo consumo, aliado a um preço bastante acessível (3euros) foram outras duas características importantes para sua escolha.

Configuração dos pinos

Este dispositivo possui 32 entradas, para diferentes ligações. Existem três tipos de portas de entrada/saída, identificadas por PORTB (Pinos 7,8, 12,13, 14, 15, 16, 17), PORTC (Pinos 23, 24, 25, 26, 27,28 e 29) e PORTD (Pinos, 1, 2, 9, 10, 11, 30, 31, 32). Nestas portas podemos ligar elementos digitais como *leds, displays*, botões, assim como entradas analógicas (que foi o caso do sensor de luz) entre outros elementos.

Nem todos os pinos foram utilizados para aplicação do nó sensor, no entanto os que estiveram activos são descritos de seguida:

- Pin 4 e 6 – **VCC** (alimentação de 3,3V);
- Pin 3, 5, 21 – **Ground**
- Pin 20- **AREF**- tensão de referência.
- Pin 16- **AVCC**
- Pin 7 e 8 – São as portas PB6 (**XTAL1**) e PB7 (**XTAL2**) respectivamente. Nestes pinos é conectado o cristal de 37Khz, para o funcionamento da interrupção.
- Pin 15 e 16- **MOSI e MISO** respectivamente. Estes permitem a ligação e transferência de dados entre o atmega 168 e o programador ISP500.
- Pin 17- É o **SCK**, que está ligado ao SCK do programador para sincronização com o ISP500.
- Pin 29- **RESET**, está também ligado ao programador.
- Pin 1- É utilizado para interligar o pin de adormecimento do *Xbee* e o microcontrolador.
- Pin 12 e 13- **PB0 e PB1**. São responsáveis pela recepção dos dados do sensor SHT15. O PB0 permite a sincronização de relógio com o sensor e o PB1 a recepção de informação.
- Pin 23 e 24- O pin 23 **ADC0**, é a entrada analógica para o sensor de luz. O 24 é o **ADC1**, entrada para o cálculo da tensão da bateria.
- Pin 30 e 31- **RX e TX** respectivamente. São responsáveis pela comunicação série com o módulo *Xbee*.

Na Figura 18 tem-se o esquema do Atmega 168, versão TQLF, utilizado no nó sensor WISE-MUSE.

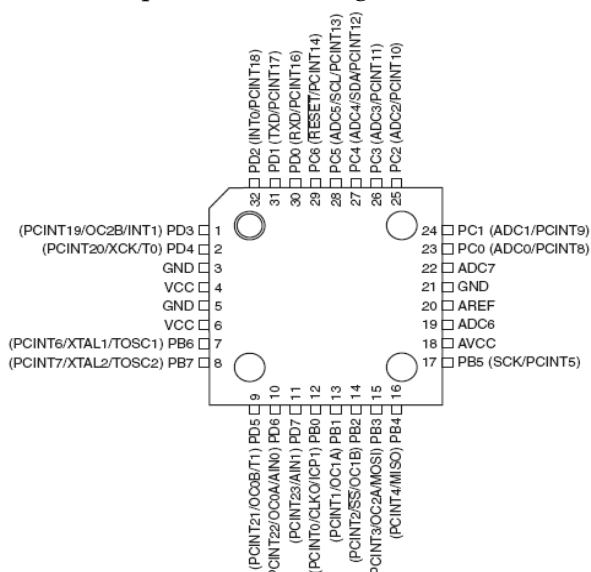


Figura 18- Configuração dos Pinos do Atmega 168 [18]

Seleccção da frequência do relógio

A frequência do relógio é um aspecto essencial neste dispositivo. Ela determina a velocidade de execução do programa no microcontrolador. No atmega 168, o sinal de relógio pode ser obtido através de cinco diferentes fontes, entre as quais osciladores internos ou externos. O dispositivo está programado de fábrica com o oscilador interno RC, a 8.0MHz e com o FUSE CKDIV8 que faz a divisão dessa frequência por 8 vezes, resultando assim num sistema de relógio a 1MHz. Decidiu-se manter este oscilador interno como fonte de relógio por diversas razões. Além de já vir programado de fábrica para trabalhar a 1MHz, o facto de trabalhar com oscilador interno liberta-nos da necessidade de mais componentes no módulo (oscilador externo e condensadores), ganhando aqui espaço e redução de custos, sendo que as entradas XTAL1 e XTAL2 ficam ainda livres para a colocação de um oscilador externo para a interrupção temporal (cristal de 32KHz) [18].

Interrupção

Um aspecto também muito importante no microcontrolador é o tratamento das interrupções, que podem ser tanto internas quanto externas. No caso do nó sensor implementado, tem-se apenas uma interrupção externa de segundo a segundo, causada por um cristal de 32,7Khz, sendo esse contador denominado de Timer2.

As interrupções são desvios condicionais efectuados pelo programa em função da ocorrência de um fenómeno prioritário. Elas permitem o processamento adequado em resposta a eventos internos ou externos. Para uma dada fonte de interrupção, existe um bit responsável pela habilitação. Este bit fica num dos registos do periférico associado à interrupção. Além disto, o bit I do registo SREG (registo de estado do microcontrolador), quando colocado em 1, habilita a ocorrência de qualquer interrupção que tenha sido habilitada no seu periférico responsável. Se este bit for colocado em 0, então nenhuma solicitação de interrupção será atendida.

Na linguagem C, tem-se as funções `sei()` e `cli()`, que correspondem às instruções *assembly* `sei` (set I bit) e `cli` (clear I bit). Assim sendo, `sei()` habilita globalmente as interrupções, enquanto que `cli()` desabilita globalmente as interrupções, sendo que no nosso programa apenas foi utilizada a opção `sei()` [18].

No programa implementado para o nó sensor WISE-MUSE, o programa executa prioritariamente um conjunto de funções definidas para a monitorização, cada vez que é gerada a interrupção temporal.

Conversões A/D

Muitos dos sistemas que utilizam microcontroladores, entre os quais o nó sensor WISE-MUSE, requerem a medição de variáveis de natureza analógica. Assim sendo, para que essas informações possam ser utilizadas pelo microcontrolador, é necessário converter esses sinais para os seus valores digitais correspondentes. O atmega168 possui um conversor A/D com resolução de 10 bits. Esse mesmo conversor pode ser acedido por oito diferentes canais nos encapsulamentos TQFP. Ou seja, com um AVR ATmega168 pode-se medir facilmente oito sinais analógicos, em diferentes tempos.

No caso específico deste projecto, temos presentes duas conversões analógico/digitais. A primeira trata-se do sinal vindo do sensor de luz, com objectivo de medir a intensidade de luz presente nos espaços do Museu, sendo que o segundo sinal analógico recebido pelo atmega 168 é a tensão da bateria do próprio nó sensor.

O conversor A/D requer uma tensão de referência analógica (AREF), que pode ser tanto interna como externa. No nosso caso foi utilizada a referência interna do microcontrolador

(1,1v). O máximo valor obtido na conversão, que seria 1023 visto que o conversor A/D é de 10 bits, ocorrerá quando a entrada se igualar ao valor de AREF.

Portanto, o máximo valor que será correctamente convertido é ligeiramente menor ao valor de tensão de referência. Por isso, no caso da medição da tensão da bateria, que poderá ter um valor máximo a rondar os 3volts tem de ser dividida por três antes de entrar no atmega, para garantir que nunca se ultrapassa a tensão de referência.

Terminada a conversão, o resultado é colocado em dois registos internos (ADCL e ADCH) que podem ser lidos e depois manipulados. Para estes valores serem somados é necessário que o registo ADCH sofra um deslocamento à esquerda de 8. Então aí podem ser somados os dois registos resultando num valor de ADC [18].

O resultado da conversão pode ser conhecido ainda pela seguinte expressão:

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}} \quad (1)$$

V_{IN} - tensão medida;

V_{REF} - tensão de referência;

Adormecimento do Microcontrolador

Este microcontrolador possui seis diferentes modos de adormecimento: *Idle*, *ADC Noise Reduction*, *Power-down*, *Power-save*, *Standby*, or *Extended Standby*. Se alguma interrupção surgir enquanto o MCU está a dormir, então ele acorda executando a rotina estabelecida pelo programa. A diferença entre os vários modos está, em grande parte, na quantidade de osciladores que ficam desactivados durante o adormecimento.

O modo escolhido foi o *Power-save*, onde o oscilador principal do atmega está desactivado no período de adormecimento, bem como outras funcionalidades, entre as quais as conversões ADC. Aqui o Timer/Counter2 está disponível (neste caso através do cristal de 32,7KhZ) e ele continuará activo durante o adormecimento. O atmega168 irá acordar do modo "*sleep*" quando for disparada a interrupção de *overflow* causada pelo Timer2.

Os dados fornecidos pelo fabricante indicam-nos um consumo de 0,8uA no modo de adormecimento "*Power-save*", havendo uma considerável redução relativamente aos 0,3mA no modo activo [18].

3.4.1.2 Sensores

Cada nó sensor possui dois sensores específicos. O primeiro é o sensor SHT15, para o cálculo da humidade relativa e temperatura, sendo que o segundo trata-se de um fotodetector que irá captar a luz incidente na área.

SHT15

Este dispositivo compacto, fornecido pela empresa *Sensirion* [19], permite calcular o valor de humidade relativa, bem como o da temperatura. É uma aplicação da indústria CMOS, totalmente calibrado e oferece uma alta precisão, juntamente com uma boa estabilidade com baixo custo (aproximadamente 20 euros). Foi o escolhido, pois reúne uma série de características (precisão, tempo de resposta, tamanho, etc.) que vão ao encontro das necessidades do módulo sensor.

A tecnologia nele presente permite a integração de dois sensores no mesmo componente. Para a humidade, existe um elemento sensor capacitivo, sendo que para a temperatura está presente um sensor de temperatura *bandgap*. Ambos estão ligados a um conversor analógico/digital de 14 bits e a um circuito de interface no mesmo *chip*. O resultado destas características é que consegue-se obter um sinal de qualidade elevada, um tempo de resposta bastante curto e uma boa insensibilidade a interferências externas.

Cada SHT15 é individualmente calibrado com um dispositivo denominado de *chilled mirror hygrometer*. Os coeficientes de calibração são programados para uma memória (OTP) do sensor. Esses coeficientes são depois utilizados nas medições para calibrar os sinais vindo dos sensores. Na Figura 19 mostra-se um destes sensores [17].



Figura 19-Sensor SHT15

Principais características e aplicações

As principais características podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Possuir dois sensores integrados para humidade relativa e temperatura;
- Medição da humidade entre os 0 e 100%;
- Precisão da humidade: +/- 2%;

- Medição da temperatura entre o -40C° e o 140C° ;
- Precisão da temperatura: $\pm 0,3\text{C}^{\circ}$;
- Tempo de resposta curto: 3segundos;
- Baixo consumo: $30\mu\text{W}$;
- Baixo custo;
- SMD
- Permitir o cálculo do “dewpoint”;

Diagrama de blocos do SHT15

Na Figura 20 é apresentado o diagrama de blocos do sensor SHT15. É possível observar os dois sensores específicos, um de humidade e um de temperatura que separadamente irão efectuar as medições analogicamente e ligar-se a um conversor analógico/digital. Ao conversor está também ligado um bloco que introduz comandos de calibração, sendo que as constantes introduzidas por este bloco são utilizadas para obter-se os valores finais de temperatura e humidade. Por fim tem-se uma interface que proporcionará a saída dos valores já traduzidos de temperatura e humidade [17].

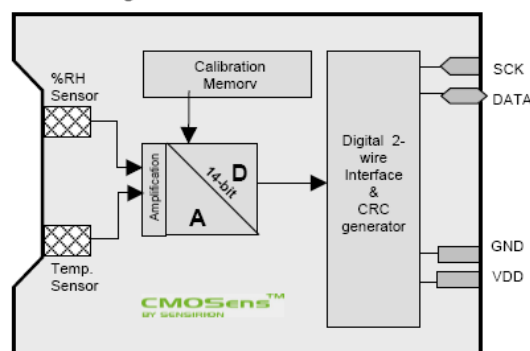


Figura 20- Diagrama de blocos do SHT15[17]

Especificações do Sensor:

Este sensor requer uma tensão entre 2,4 e 5,5v. No caso específico do sensor WISE-MUSE é alimentado com 3,3volts. Depois de ligado, o sensor necessita de 11 ms para sair do seu estado de adormecimento.

O pino **SCK** é utilizado para sincronizar a comunicação entre o microcontrolador e o SHT15. O pino Data é utilizado para transferir a informação para dentro e fora do

dispositivo. Durante a transmissão o canal **Data** deve se manter estável. Uma resistência é necessária para manter o sinal no estado “High”. Na Figura 21 tem-se o esquema de funcionamento do SHT15 [17].

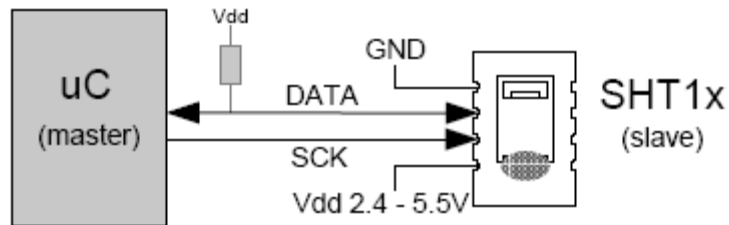
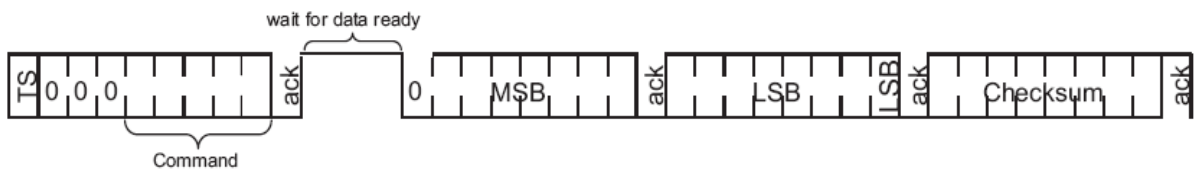


Figura 21- Esquema de funcionamento do SHT15

Sequência de transmissão para medições:

Para iniciar-se uma transmissão de dados do sensor, o microcontrolador tem de iniciar uma sequência denominada de “*transmission start*”. Depois disso, são enviados para o SHT15 os bits “000” e 5 bits de comando (“00011” para medir a temperatura e “00101” para a humidade relativa). Após os envios de comando, o microcontrolador tem de esperar que a medição esteja completa.

As medições levam aproximadamente 210ms para 14 bits. Para terminar o SHT15 utiliza um *checksum* de 8 bits para garantir que não houve falhas na leitura dos dados.



Processando as leituras:

Depois da informação ser recebida pelo microcontrolador, os dados do sensor podem ser facilmente convertidos em graus e em humidade relativa. Visto que o sensor de temperatura é bastante linear, não é difícil converter o valor de saída no valor actual de temperatura.

Os dados medidos pelo SHT15 (MSB e LSB) são encaminhados do microcontrolador para o módulo *Xbee* de comunicação RF e depois enviados para uma estação base através da rede, sendo que os cálculos finais são feitos fora do módulo sensor, para poupar processamento no atmega 168.

Cálculo dos parâmetros recebidos:

Medição da temperatura

Na estação base, para obter-se o valor correcto de temperatura em graus célsius é necessário aplicar a seguinte fórmula, fornecida pelo próprio fabricante do sensor:

$$\text{Temperatura (C}^\circ\text{)} = t * 0.01 - 40 \quad (2)$$

Para obter o valor de t, é necessário efectuar uma conversão para decimal, dos bytes MSB e LSB enviados do nó sensor.

Medição da Humidade

Este parâmetro é obtido de uma forma semelhante ao da temperatura, no entanto a expressão para o valor de humidade em percentagem é diferente, sendo que aqui estão também presentes as constantes do sensor utilizado. O valor fornecido pelo sensor é de 14 bits, que são também enviados em dois bytes na mensagem API:

Para obtenção do valor correcto de humidade relativa tem-se que utilizar a seguinte fórmula:

$$\text{Rh_lin} = -C3 \times \text{rh} \times \text{rh} + C2 * \text{rh} + C1 \quad (3)$$

Onde C1, C2 e C3 são constantes do sensor: C3= -0,0000028; C2= 0,0405; C1=-0,4

Por exemplo: Pegando em 2 bytes recebidos, que correspondem a uma medição de humidade, MSB=05 e LSB=6B, tem-se um valor decimal rh = 1387.

Assim sendo, utilizando a expressão para o cálculo da humidade relativa tem-se que:

$$\text{Rh_lin} = -(0,0000028 \times 1387 \times 1387) + 0,0405 \times 1387 + (-0,4)$$

$$\text{Rh_lin} = -5,39 + 56,17 - 0,4$$

$$\text{Rh_lin} = 50,1 \text{ \% de humidade relativa}$$

3.4.1.3 Sensor de Luz

Para a monitorização da luz nas salas do Museu, foi escolhido um sensor mais simples do que o STH15. Aqui trata-se de um fotodetector S1087, da empresa *HAMAMATSU*. Esta escolha deveu-se ao facto de ser um sensor acessível a nível de custos (5€), mas simultaneamente permite obter valores de luminosidade fiáveis.

Na Figura 22 pode-se observar um destes sensores.



Figura 22- Sensor de luz SI087

Princípio de funcionamento: Quando a luz incide sobre o fotodetector, que é um semicondutor, a junção P-N é iluminada e causa um movimento de electrões entre as camadas P e N, originando um fluxo de corrente. A corrente gerada pelo sensor, é proporcional à intensidade da luz.

É colocada uma resistência em paralelo com o fotodetector, sendo medido pelo atmega 168 o valor de tensão nos seus terminais. Posteriormente esse valor é convertido por um conversor analógico digital, presente no próprio processador.

Conversões:

Após a conversão analógica/digital de 10bits, tem-se um valor digital que pode ser manipulado. Essa informação é guardada nos dois registos ADCL e ADCH do atmega168. Para que os bits presentes nos dois registos sejam somados, é necessário fazer um deslocamento de 8 nos bits do ADCH. Depois então podem ser somados, obtendo-se o valor ADC. Esse valor também pode ser conhecido através da fórmula:

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}} \quad (1)$$

O valor ADC é depois dividido em 2 bytes para poder ser enviado pela rede, até a estação base.

Do lado da recepção é efectuada as conversões necessárias, para obter-se o valor de luminosidade. O valor de ADC recebido é convertido em decimal e colocado numa fórmula, que irá dar o valor de luminosidade.

Primeiro, retira-se o valor de tensão medido: $V_m = (ADC \times 1,1) / 1024$

Depois, obtêm-se o valor de luminosidade, a partir da fórmula:

$$L = V_m \cdot 0,625 \cdot 10000 \text{ (LUX)} \quad (4)$$

Resposta espectral:

A corrente gerada pelo sensor, depende do comprimento de onda da luz incidente. A relação entre a sensibilidade do sensor e o comprimento de onda é conhecida como resposta espectral (Figura 23). O sensor S1087 tem uma boa sensibilidade no espectro da luz visível, sendo o valor de máxima sensibilidade localizado perto dos 980nm.

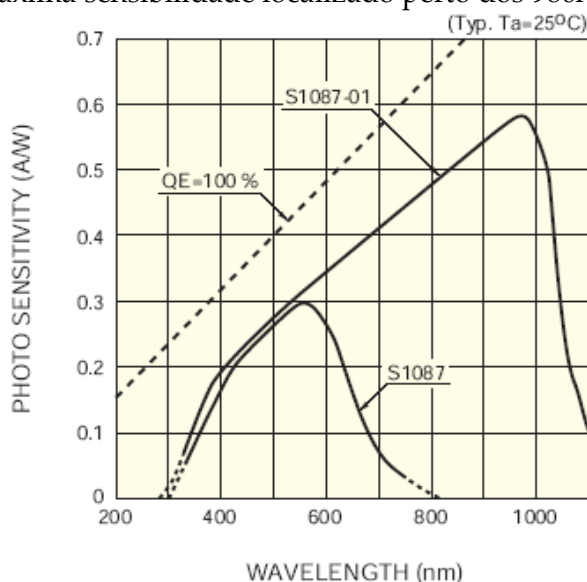


Figura 23- Sensibilidade do Sensor de luz

3.4.1.4 Módulo de Rádio Frequência

Existem diversas empresas membros na *Zigbee Alliance*, sendo que cada uma disponibiliza no mercado o seu produto baseado na pilha de protocolo *ZigBee*. Os módulos wireless da *Digi* são módulos *ZigBee™* excelentes, com vários recursos extras e de fácil utilização.

Os **módulos Xbee e Xbee-PRO** de rádio frequência foram criados para ir ao encontro do protocolo IEEE 802.15.4 e suportam as necessidades de redes *wireless* de baixo custo e baixa potência. Os módulos requerem uma potência mínima e proporcionam uma entrega real e consistente de informação entre dispositivos, operando na banda de frequências ISM 2.4GHz. Além disso, estão a ter grande saída nível de mercado, devido às diversas funcionalidades que oferece. Por tudo isto, estes foram os módulos adoptados para a transmissão do sinal RF, que contém a informação capturada pelos sensores [20].

Nestes dispositivos existem três opções de antenas: tipo *Chicote* (um fio de aproximadamente 2,5 cm); **Conector** (para antena externa), e tipo *Chip* (a mais compacta).

Com o dos tipos *Chicote* e *Externa* é possível direccionar o feixe de sinal, e assim, melhorar a performance da Rede.

Na Figura 24 é possível observar os três tipos de antenas [20].

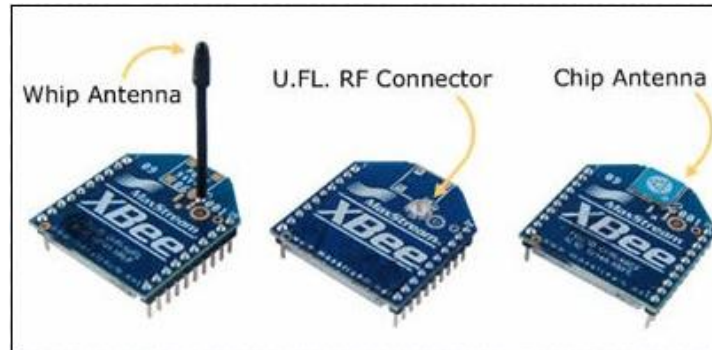


Figura 24- Tipos de módulo Xbee

Características gerais

De seguida são apresentadas de uma forma resumida as principais características destes módulos [20]:

- Potência de saída: 1 mW (0 dBm);
- Alcance em ambientes internos/zonas urbanas: 30m;
- Alcance de RF em linha de vista para ambientes externos: 100m;
- Sensibilidade do receptor: -92 dBm;
- Frequência de operação: ISM 2.4 GHz;
- Taxa de dados de RF: 250.000 bps;
- Taxa de dados da Interface (Data Rate): 115.200 bps;
- Consumo energético: 45mA (Tx);

Características dos pinos

Cada módulo possui 20 Pinos, cada um com diferentes funcionalidades. Neste projecto os pinos utilizados foram os 1 (Vcc), o 2(TX), o 3(RX) o 9(sleep) e o 10 (ground). No anexo A.5 é apresentada uma tabela com descrição de todos os pinos destes módulos.

Na Figura 25 mostra-se o esquema do módulo *Xbee* utilizado neste projecto para os módulos sensores.

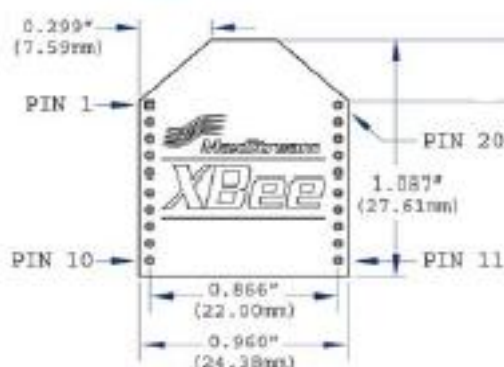


Figura 25- Esquema do Modulo Xbee [20]

Modos de operação na rede:

Os módulos *Xbee* podem operar de dois modos diferentes. O primeiro é o **modo Transparente**. Aqui os dados recebidos da UART pelo pino RX são colocados numa fila para transmissão via RF (os *Xbee* possuem um buffer). Do lado contrário, os dados recebidos do canal de RF, são transmitidos através do pino TX.

Neste projecto foi utilizado o outro modo de funcionamento, que é o **modo API**. No modo API a informação transmitida e recebida está contida em frames, que definem operações ou eventos dentro do módulo. Com este modo de operação é possível um determinado nó sensor enviar endereço fonte, endereço destino, sinal RSSI, nome de um determinado nó e outros dados. Estas possibilidades fizeram com que fosse escolhido este modo de operação na rede *ZigBee*.

De seguida é apresentada a estrutura geral de uma frame *ZigBee* API [20].

0 x 7E	MSB	LSB	Estrutura API	Checksum
Byte 1	Byte2	Byte3	Byte n	Byte n+1

Mensagem de envio:

No caso específico da transmissão de dados, o dispositivo *end/device* terá que enviar uma frame API que segue a seguinte estrutura:

0x 7E	MSB	LSB	API	Frame	Destino	Destino	Bytes de	RF	Checksum
			ID	ID	64bits	16bits	Opção	DATA	
Byte 1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte 5	Byte 6 -13	Byte14 e 15	Bytes 16 e 17	Byte 18-25	Byte26

Toda informação presente na mensagem, quer a nível de endereços, quer em relação aos dados dos sensores, terá de estar no formato de hexadecimal.

O primeiro byte é o “*Start Delimiter*”, que define o início da mensagem. Os dois seguintes descrevem o comprimento (MSB-Bits mais significativos e LSB-Bites menos significativo), sendo que no Byte 4 é definido o tipo de mensagem. No caso de pedido de transmissão de dados o byte 4 tem o valor 0x10. O byte 5 identifica a frame que está a ser transmitida, existindo depois um conjunto de bytes que vão definir os endereços do dispositivo a que se destina a mensagem (byte 6 a 15). Se for pretendido efectuar *broadcast* então todos esses bytes são colocados a zero (0x00). Posteriormente tem-se ainda dois bytes de opção (16 e 17) e depois os bytes destinados à informação que é recolhida pelos sensores e encaminhada para estas posições na mensagem. Para terminar a frame, existe sempre um byte *Checksum*, que verifica se e não existiram erros na mensagem.

Mensagem recebida:

Para perceber e visualizar os dados monitorizados pelos sensores, é necessário fazer a leitura da seguinte *frame* API, recebida na estação base.

0x7E	MSB	LSB	API ID	Fonte 64bits	Fonte 16bits	Byte Opção	DATA	Checksum
Byte 1	Byte2	Byte3	Byte 4	Byte 5-12	Byte 13-14	Byte 15	Byte 16-21	Byte 22

A mensagem de recepção de é semelhante à de transmissão, no entanto o byte identificador API recebido tem o valor 0x90 (estabelecido pelo protocolo *ZigBee*). Nos bytes de 5 a 14 observa-se os endereços do dispositivo que enviou a informação. No que diz respeito à informação propriamente dita ela está presente nos bytes 16 a 21, que depois terá de ser convertida de hexadecimal para os valores correspondentes em decimal.

3.4.1.5 Alimentação e circuito Step-up

Baterias AA

De forma a cumprir um dos requisitos do sensor que é a sua autonomia em termos de alimentação eléctrica, em cada sensor são ligadas duas pilhas AA com vista a fornecer aproximadamente 3volts ao microcontrolador, bem como ao módulo *Xbee* e ao sensor STH15. Estas baterias tem uma capacidade de 2500mAh, tendo uma tensão de saída de 1,4volts cada uma. A sua tecnologia é a de *Nickel Metal HYdride* e pesam apenas 28gramas. O seu comprimento é de 50,5mm e o diâmetro de 14,5mm.

Conversor NCP1400A

Este conversor DC/DC *step-up* foi desenvolvido para a alimentação de equipamentos portáteis que utilizem um ou dois *packs* de baterias. São projectados para começar a trabalhar com uma tensão de 0,8V. Com apenas quatro componentes externos possibilita a implementação de uma conversão eficiente. É fundamental para quando as baterias comecem a perder energia, fazendo com que o circuito mantenha-se alimentado com 3,3volts contínuos.

O esquema de montagem deste *step-up* pode ser visto na Figura 26.

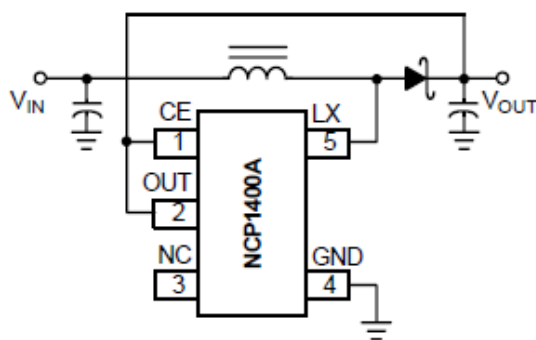


Figura 26-Esquema do circuito *step-up* adoptado

Em cada nó sensor está colocado um circuito semelhante ao da Figura 26. Está posicionado logo depois do *switch*. Recebe a tensão originária das baterias e na sua saída proporciona constantemente uma tensão de 3,3volts para o atmega 168, para o *Xbee*, para o Sensor STH15 e ainda para o pino *VCC target* de ligação com o programador.

3.4.1.6 Esquemático do Nó Sensor WISE-MUSE

Na Figura 27 é apresentado o esquemático do nó sensor desenvolvido, onde estão incluídos os componentes descritos anteriormente.

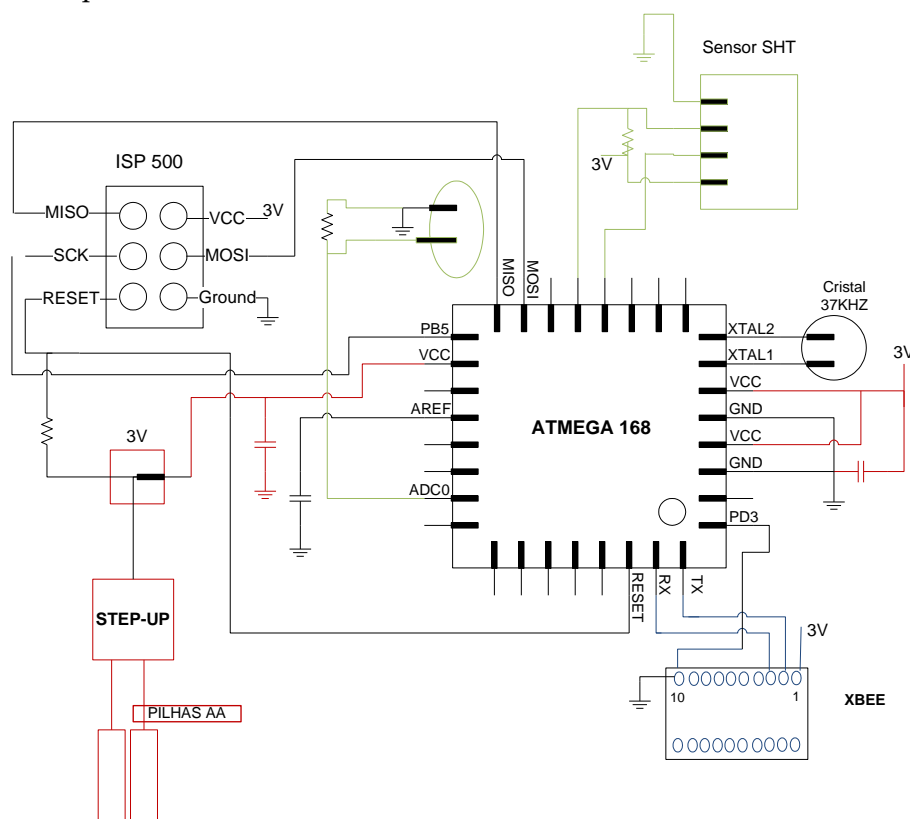


Figura 27- Esquemático do Nó Sensor

Além dos componentes já referidos anteriormente, para que o dispositivo cumpra as funções pretendidas, é necessário um conjunto de condensadores entre a alimentação e o microcontrolador, de forma a evitar algum pico de tensão que possa danificar o componente. Ainda associado ao microcontrolador surge o programador ISP500 que permite efectuar o upload do código C para o atmega 168. Por fim referência ao cristal de 37Khz na entrada XTAL1 e XTAL2 que é necessário para gerar a interrupção temporal.

Para finalizar a análise ao nó sensor, é importante referir que este sensor também envia informação sobre o estado das baterias do próprio módulo, para que no Museu os funcionários quando têm que mudar as baterias.

Isto é conseguido através da medição da tensão das baterias, por parte do microcontrolador, essa informação é convertida num ADC do atmega168 e depois é enviada na mensagem API ZigBee, juntamente com os parâmetros ambientais monitorizados.

3.4.2 Dispositivo Router

Este dispositivo, a nível conceptual é idêntico ao Nó Sensor, diferenciando-se apenas no módulo de alimentação. Apesar de também efectuar monitorização ambiental, a sua principal função é efectuar o encaminhamento dos dados oriundos dos Nós Sensores até o coordenador, e conseqüentemente até a estação base.

Para efectuar o encaminhamento de várias mensagens vindas dos *end devices*, o módulo *Xbee* do Router terá de estar constantemente ligado, visto que poderão surgir mensagens ao longo de todo o dia. Como não poderá haver “adormecimento” deste módulo, o seu consumo energético é muito superior ao consumo dos Nós Sensores. Assim sendo, a colocação de baterias como alimentação deste módulo tornou-se impraticável. Isto levou a que a solução encontrada seja a ligação directa do router a uma tomada normal (220V-tensão alternada). Para que seja possível alimentar o módulo com 3,3volts contínuos, é colocado um transformador AC/DC (XP-POWER).

A nível de módulo de rádio frequência, foram escolhidos os *Xbee PRO*. Esta versão superior, disponibilizada pela empresa *Digi* tem um alcance superior (100mts *indoor*) ao *Xbee* normal e uma maior sensibilidade de recepção (-100dBms). A potência de emissão é consideravelmente superior (60mW), leva a um maior consumo (137mA Tx), no entanto como estes módulos não são alimentados por baterias, esse facto não é preocupante. Apesar do maior custo, esta nova versão do módulo RF foi essencial para ter-se garantias de sucesso nas ligações entre pontos mais afastados.

XP-POWER (modelo ECL10US03):

Para efectuar a transformação da tensão alternada (fornecida por uma tomada de uso geral), em 3,3 volts contínuos foi escolhido o transformador XP.POWER [21].

Após alguma pesquisa efectuada a dispositivos deste tipo, verificou-se que este transformador tem um tamanho bastante compacto, possui um custo aceitável, tem um bom

isolamento e apresenta as duas características essenciais, para o módulo Router. A primeira é permitir uma entrada entre 170 a 370VAC, para que possa ser conectado a uma tomada de uso geral (230 volts). A segunda é que fornece á saída uma tensão de 3,3VDC, ideal para alimentar o módulo *Xbee*, o microcontrolador e o sensor STH15. A Figura 28 mostra um exemplar deste dispositivo.



Figura 28- Transformador XP-POWER

3.4.3 Sistema de Controlo da Humidade

Um dos requisitos do projecto proposto, é permitir o controlo da humidade, nas salas de reservas do Museu. Isto é conseguido através de um dispositivo desenvolvido para o efeito, que irá receber uma mensagem de comando oriunda da estação base.

Este dispositivo poderá se tornar numa grande mais-valia para o Museu, visto que os funcionários deixarão de ter que ligar e desligar os desumidificadores, consoante os níveis de humidade presentes nas salas. A construção deste protótipo visa tornar automático este controlo. A Figura 29 ilustra o sistema de controlo de humidade desenvolvido.

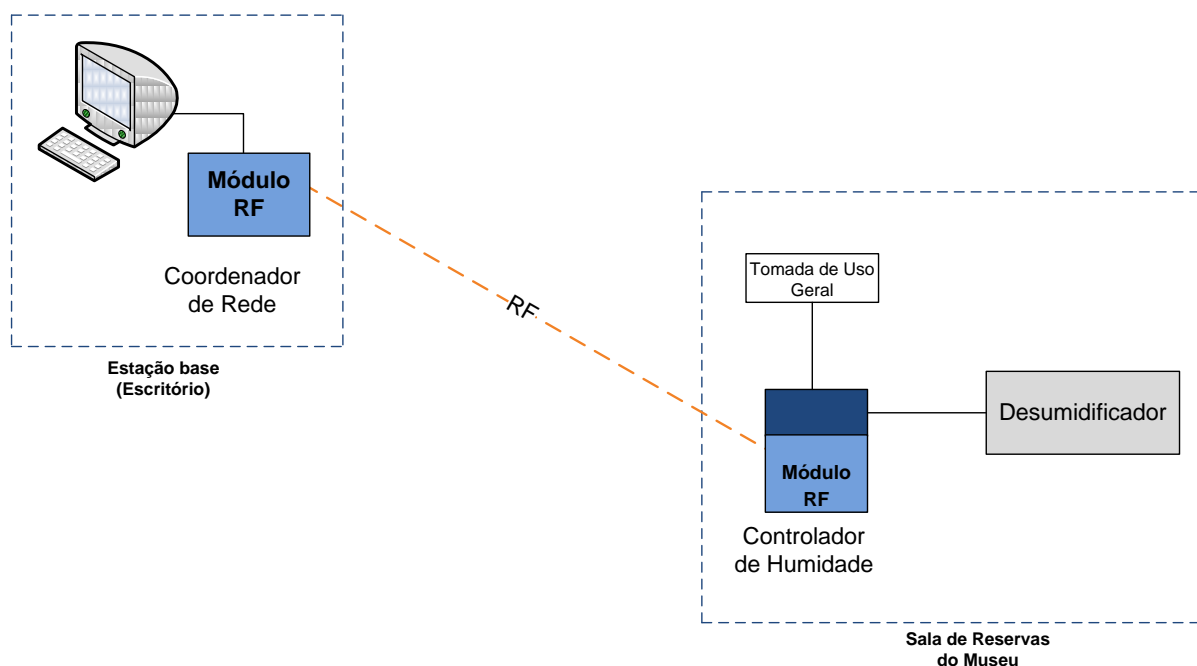


Figura 29- Sistema de controlo da Humidade

Quando os valores de humidade ultrapassam os limites aceitáveis para as salas de reservas, o coordenador de rede envia uma mensagem API de comando, via rádio frequência para o dispositivo controlador. Este dispositivo irá actuar sobre o desumidificador ligando-o automaticamente, levando a uma conseqüente redução dos níveis de humidade relativa.

Dispositivo controlador:

Este dispositivo é composto essencialmente por 3 componentes:

- **1 Xbee** – Trata-se de um módulo RF *Xbee* normal, semelhante aos utilizados nos sensores.
- **1 Transformador AC/DC**- É um transformador idêntico, ao utilizado no router, pois permite transformar 230VAC da tomada, nos 3,3volts DC para alimentação do *Xbee*.
- **1 Relé** – *Solid State Relay, GA8, Empresa: Crouzet* - componente electromecânico, capaz de controlar circuitos externos de grandes correntes, a partir de pequenas correntes ou tensões.

Principais características do Relé:

Tensão de entrada: 3 - 32Volts AC ou DC; Tensão de saída: 20 - 280Volts AC;

Corrente máxima de entrada: 25mA; Corrente máxima de saída: 100A;

Temperatura de operação: -20C° a 80C°

Após diversas pesquisas efectuadas a vendedores destes componentes electrónicos, adquiriu-se este componente para implementação do protótipo, visto que as suas características vão de encontro ao pretendido, para o dispositivo de controlo.

O seu funcionamento é o seguinte:

Quando uma pequena corrente circula pela bobina, esta cria um campo magnético que atrai um ou uma série de contactos fechando ou abrindo circuitos. Ao terminar a corrente na bobina, o campo magnético também desaparece, fazendo com que os contactos voltem para a posição original. Este funcionamento pode ser melhor interpretado através da Figura 30.

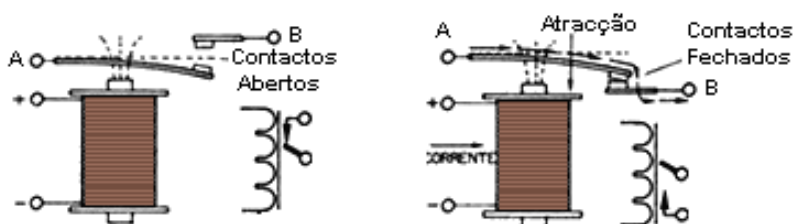


Figura 30- Funcionamento de um Relé.

Quanto ao transformador, este converte a tensão alternada de uma tomada normal (220v) em 3,3volts contínuos apropriados para alimentação do módulo *Xbee*.

Relativamente ao módulo RF *Xbee*, o seu pino 19 (ou uma das outras saídas digitais) está ligado directamente à entrada do Relé, estando a outra entrada do relé conectada à massa. Uma das saídas do Relé tem ligação ao aparelho desumidificador.

O circuito do dispositivo de controlo é apresentado através da Figura 31.

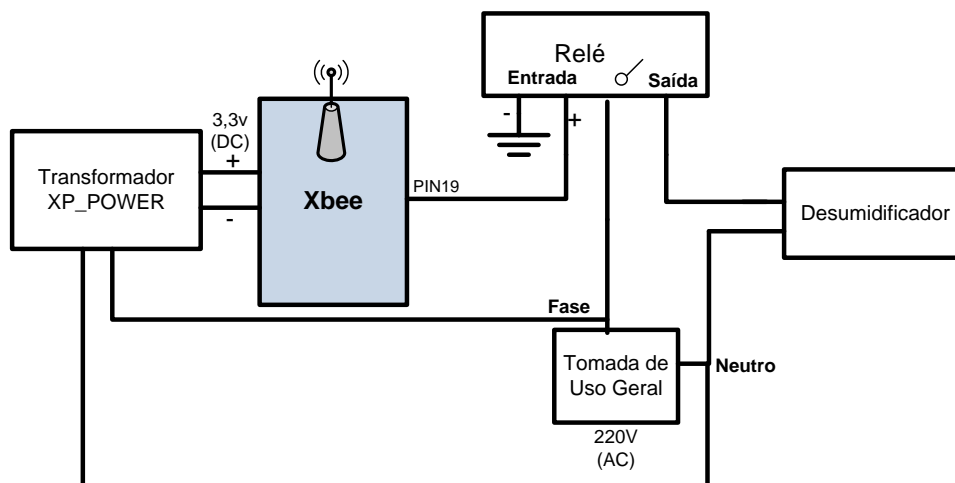


Figura 31- Dispositivo de controlo da humidade

A tomada de uso geral tem ligação com o desumidificador, mas com o relé como intermediário, que irá fechar ou abrir o circuito, consoante os comandos recebidos da estação base. Por outro lado a tomada estará também ligada ao transformador, para alimentar o módulo *Xbee*.

O pino 19 do módulo *Xbee* é o ponto de controlo, estando inicialmente configurado para estar num estado “LOW”, sendo a tensão nula nesse ponto. Como a corrente que entra no Relé é nula, a ligação entre a tomada e o desumidificador está “quebrada”, visto que os contactos do relé estão separados. Quando a mensagem API *ZigBee* de controlo é recebida pelo módulo *Xbee* presente neste dispositivo, o Pino 19 passa para o estado “High” ficando com 3,3volts. Como esse pino está ligado á entrada do relé, este recebe uma corrente que cria o campo magnético, que por sua vez faz com que os seus contactos internos se unam, fechando o circuito entre a tomada e o desumidificador. Ou seja, houve uma comutação no relé, sendo que o resultado deste processo é a ligação automática do desumidificador.

No caso de os valores voltarem para limites de humidade aceitáveis, é novamente enviada uma mensagem de controlo por parte do coordenador de rede. A diferença é que neste caso o comando será para que o Pino 19 passe para o estado “LOW” e o desumidificador se desligue.

A mensagem API *ZigBee* para controlo remoto de um determinado pino do módulo *Xbee*, obedece ao seguinte formato:

0x7E	MSB	LSB	API ID 0x17	Frame ID	Destino 64bits	Destino 16bits	Byte Opção	Nome do Comando	Valor	Check
Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6-13	Byte 14-15	Byte 16	Byte 17 e 18	Byte 19	Byte 20

O Byte 4 identifica a mensagem como sendo de controlo (0x17), sendo o Frame ID definido logo depois. Nos bytes 6 a 15 encontram-se os endereços do dispositivo de controlo de humidade. Os bytes 17 e 18 identificam o pino que será activado ou desactivado, sendo que o Byte 19 irá indicar o estado que se pretende para esse pino.

Quando existe a recepção desse comando por parte do dispositivo de controlo de humidade, a estação base recebe uma mensagem API de resposta ao comando enviado, em que no API ID está o valor 0x97.

3.5 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os requisitos do sistema implementado, bem como a arquitectura da rede de monitorização e controlo. O módulo sensor projectado veio ao encontro do estudo teórico realizado com os quatro módulos essenciais: alimentação, processamento, unidade sensorial e comunicação. Foram justificadas as opções tomadas na escolha dos componentes e apresentadas as suas principais funcionalidades.

Os módulos *Router* e Controlador de humidade foram também apresentados, concluindo que são duas mais-valias para o sistema de monitorização e controlo ambiental nos Museus.

Capítulo 4

Desenvolvimento dos protótipos

4.1 Introdução

Este capítulo descreve os processos de desenvolvimento e fabrico dos dispositivos do sistema de monitorização e controlo. O desenvolvimento do hardware, bem como do software do microcontrolador são analisados, identificando as principais etapas e problemas ultrapassados.

4.2 Desenvolvimento do Hardware

Todos os Nós Sensores, Routers e o dispositivo de controlo de humidade foram construídos de raiz nas instalações da Universidade da Madeira, recorrendo a alguns aparelhos e ferramentas indicadas para tal. A excepção foi o coordenador de rede cuja placa foi adquirida à empresa *Digi*.

4.2.1 Placa de testes do Atmega 168

Antes da construção definitiva do dispositivo Sensor, foram efectuados testes com módulos (componentes) separadamente. Ou seja, começou-se por testar a ligação entre o atmega 168 e o programador ISP-500. Para tal foi construído uma placa de testes, onde foram feitas diversas verificações e que após algum tempo conseguiu-se fazer upload de código C para o microcontrolador. Quando a placa foi alimentada a 3,3v e inserindo um código apropriado, o microcontrolador já demonstrava estar operacional. Isso foi comprovado através da colocação de um led a piscar, associado a uma das portas do atmega 168.

De seguida adicionou-se o módulo RF *Xbee (end-device)* à placa de testes, fazendo a ligação entre o microcontrolador e o *Xbee*, com vista a testar esta comunicação. Com a introdução do código apropriado para a comunicação, efectuou-se testes de ligação entre este módulo e

uma estação base. Após ultrapassar algumas dificuldades, conseguiu-se a comunicação entre o módulo que tinha o *Xbee End device* e um coordenador. Por fim, foram adicionados os sensores, ligando o STH15 a duas entradas digitais e o sensor de luz a uma entrada com conversor analógico/digital. Desenvolveu-se depois o código para o tratamento dos dados monitorizados.

Na Figura 32 pode-se observar a primeira placa construída para testes, servindo de base para a construção do sensor final WISE-MUSE.

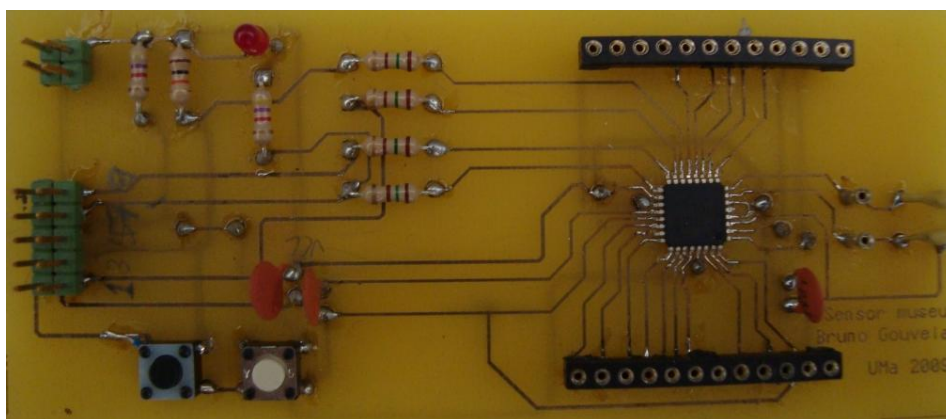


Figura 32- Placa de testes

Esta placa foi bastante importante, pois permitiu testar separadamente as ligações entre os vários módulos do nó sensor (*Xbee*, Sensores, alimentação energética) e o módulo central de processamento (atmega168).

4.2.2 Nó Sensor WISE-MUSE

Ultrapassada a primeira fase de testes, foram projectados todos os componentes (microcontrolador, sensores, resistências, etc) necessários e as ligações entre si, para que o dispositivo funcione correctamente. Algum tipo de erro no desenho do sensor, daria provavelmente origem a maus funcionamentos do circuito electrónico, ou à impossibilidade do sensor final possuir todas as funcionalidades pretendidas. Utilizou-se nesta fase o programa Ultiboard, da empresa National Instruments

4.2.2.1 Layout final do Sensor WISE-MUSE

Após vários testes e versões, chegou-se ao layout final que é apresentado na Figura 33:

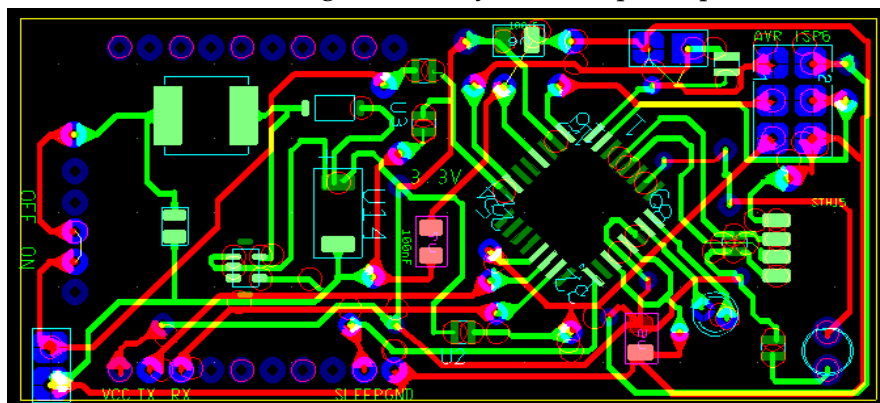


Figura 33- Layout final do Sensor WISE-MUSE

O programa *Ultiboard* permitiu trabalhar com as duas faces de uma placa de circuito impresso, isso facilitou em muito a colocação dos componentes e a redução do tamanho do sensor. Na figura anterior observa-se duas cores para as ligações (pistas) entre os componentes. As ligações verdes são pistas da face superior, sendo que a maioria dos componentes são colocados nessa face. As ligações a vermelho são pistas da camada inferior da placa. Por vezes há a necessidade de criar “vias” entre a face superior e a inferior para interligar pistas. Os desenhos dos componentes presentes na placa têm as dimensões físicas reais, visto que numa fase posterior os componentes foram soldados nos respectivos lugares. A ferramenta utilizada permitiu ainda ter-se uma visão tridimensional do dispositivo que foi mais tarde construído. Na Figura 34 é possível observar essa imagem, mais próxima do sensor real. No anexo A.4 é descrita esta aplicação.

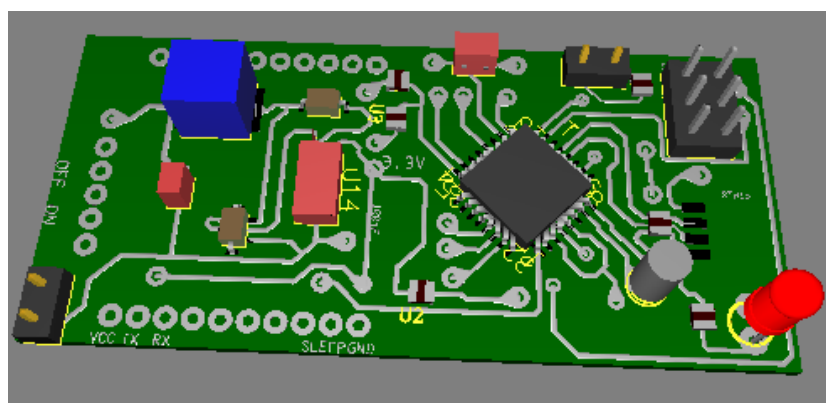


Figura 34- Desenho do sensor em 3D

Os componentes escolhidos foram na sua maioria do tipo SMD (*superficial monting device*) o que reduz o tamanho do sensor, em relação a outros que utilizem os componentes tradicionais. O cristal, o sensor de luz e o led são de maiores dimensões, mas não aumentam significativamente o tamanho final do Nó.

4.2.2.2 Fabrico do Nó Sensor

Nesta fase deu-se a construção propriamente dita do nó sensor, estando aqui incluídos os processos de impressão do circuito na placa e montagem dos componentes. Em seguida são descritos os principais passos efectuados até obter-se o dispositivo final.

Impressão no papel de acetato

O primeiro passo neste processo foi imprimir o layout criado no programa ultiboard. Depois disso foram impressas as duas faces projectadas para uma folha de acetato.

Passagem do circuito para a placa

Nesta fase colocou-se uma placa de circuito impresso nova, entre as duas folhas de acetato que continham o desenho do circuito. Posteriormente a placa foi colocada num aparelho de exposição a radiações ultravioleta, que fez a passagem do layout criado para a própria placa.

Acentuação das pistas e remoção do cobre

Depois de retirar-se do dispositivo expositor de ultravioletas, a placa foi colocada num aparelho que possui dois tipos de líquidos. No primeiro líquido (revelador) as pistas e os desenhos dos componentes foram acentuados, sendo que numa fase posterior, o líquido percloro de ferro retirou todo o cobre da placa que não faz parte do circuito. Após o término deste processo, a placa ficou preparada para a colocação dos componentes do dispositivo (Figura 35). Esta operação levou cerca de 30 minutos a estar concluída.

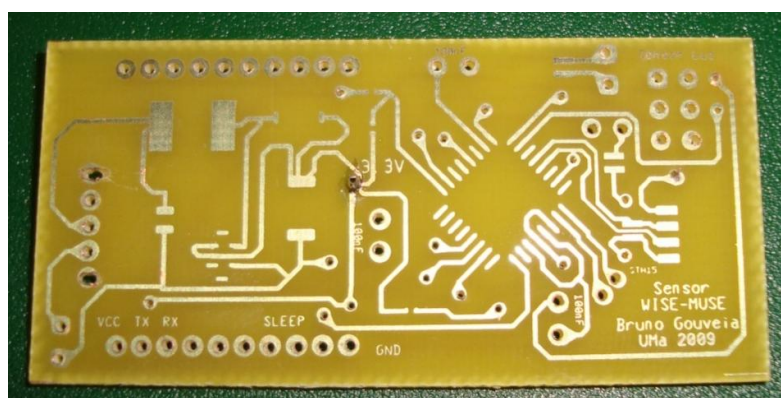


Figura 35- Placa do sensor, sem os componentes

Montagem dos componentes.

Após as perfurações estarem feitas, começou-se a colocar os componentes nos respectivos lugares da placa. Utilizou-se um ferro de soldar, mas tendo especial atenção em certas zonas para não ultrapassar determinadas temperaturas, com especial cuidado no microcontrolador e no sensor SHT15 que podem se danificar, se ficarem próximos demasiado tempo do ferro de soldar. Foi importante começar por montar os componentes SMD, visto serem os que precisam de um maior cuidado ao manusear. A montagem das resistências SMD e do microcontrolador tornou-se um pouco complicada, devido ao seu tamanho ser muito reduzido, no entanto após algum tempo tornou-se um pouco mais acessível.

4.2.2.3 Sensor Construído

Terminado o processo de construção, o *Nó sensor* WISE-MUSE está pronto a ser programado. Posteriormente ficaria em condições de efectuar a monitorização dos parâmetros ambientais pretendidos. Pode-se observar na Figura 36 um dos sensores construídos para o sistema WISE-MUSE.

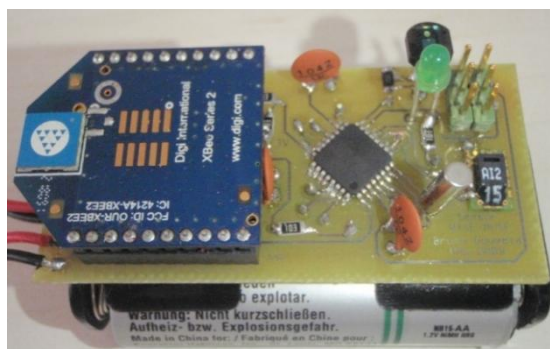


Figura 36- Sensor Construído

4.2.2.4 Encapsulamento do Sensor

Apesar de ser uma parte menos relevante no projecto, não foi fácil encontrar as caixas adequadas para os sensores construídos. Isto porque, apesar de várias pesquisas efectuadas, encontrávamos caixas que não serviam para as dimensões dos dispositivos, ou outras que eram demasiado dispendiosas e que aumentavam em demasia os custos do *Nó sensor*.

Após várias caixas testadas, chegamos a uma solução que apesar de não ser a ideal (as caixas não são tão pequenas como desejado), tornou-se na solução possível e que tem a vantagem de possuir uma tampa para colocação das pilhas AA, sem ter que se mexer na

placa do circuito. Estas caixas são bastante práticas e serão colocadas nas salas de Reservas do Museu, assim o impacto visual não teve grande importância. Na Figura 37 pode-se observar os encapsulamentos dos sensores WISE-MUSE.



Figura 37- Caixas dos sensores

4.2.3 Dispositivo Router

Todo o processo de fabrico do Router é semelhante ao do nó sensor. Assim sendo, nesta parte do capítulo são apenas apresentados os layouts finais e as versões finais dos dispositivos.

4.2.3.1 Layout Final

Na Figura 38 tem-se o layout final do Router WISE-MUSE.

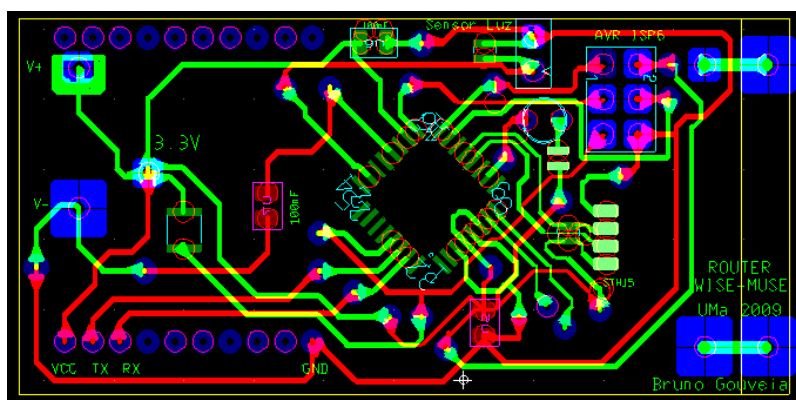


Figura 38- Circuito do dispositivo router (Ultiboard)

O circuito do dispositivo router é semelhante ao nó sensor, no entanto devido às alterações necessárias no módulo de alimentação, existem algumas diferenças. As dimensões desta placa foram projectadas para serem iguais às do transformador, visto que este circuito assenta sobre o transformador Xp-Power. Os 3,3 volts de tensão contínua obtidos através do

transformador são encaminhados para o ponto de alimentação do sensor. Como as baterias não são utilizadas para este módulo, o circuito step-up é retirado, sendo assim, ganha-se mais espaço na placa e reduz-se os gastos nesses componentes.

4.2.3.2 Fabrico do dispositivo

No final do processo de fabrico obteve-se o Router WISE-MUSE apresentado na Figura 39.



Figura 39- Router WISE-MUSE construído

4.2.3.3 Encapsulamento do dispositivo Router

Na Figura 40 observa-se o encapsulamento do router. Atendendo a que este dispositivo terá de ser alimentado a partir de uma tomada de uso geral (220volts), procurou-se que a caixa possua o encaixe apropriado para ser ligado directamente a uma das tomadas do Museu.



Figura 40- Encapsulamento do Router WISE-MUSE

4.2.4 Coordenador de Rede

O coordenador de rede, responsável pelo controlo da rede e recepção dos dados provenientes dos sensores, consiste apenas num módulo *Xbee*, que depois está ligado a uma placa de aquisição de dados adquirida à empresa *Digi*. Esta placa está por sua vez ligada ao

computador através de uma porta USB. Assim, os dados podem ser recebidos pelo coordenador, lidos por um programa adequado e visualizados através do XCTU.

Na Figura 41 mostra-se uma placa de leitura de dados e o módulo *Xbee* que funciona como coordenador da rede de sensores sem fios.

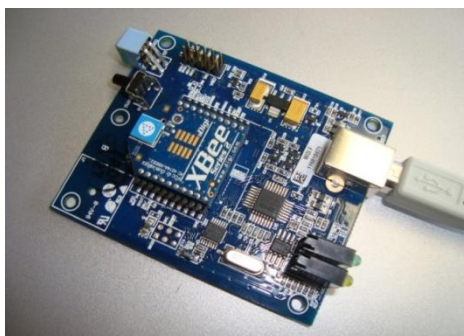


Figura 41- Coordenador de rede

4.2.5 Dispositivo controlador de humidade

Este dispositivo foi também construído de raiz, utilizando as capacidades do módulo *Xbee* e de um Relé apropriado.

4.2.5.1 Layout

Na Figura 42 apresenta-se o circuito impresso do controlador de humidade. A projecção foi pensada para que a placa tivesse as mesmas dimensões do que o transformador. Numa das faces assentará o módulo *Xbee*, enquanto que na outra face o Relé.

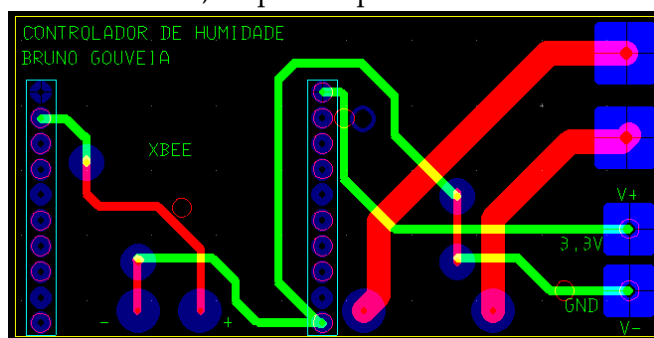


Figura 42- Circuito de controlo da humidade

Com esta disposição dos componentes, o relé e o *Xbee* podem ficar na mesma zona, (reduzindo o tamanho do dispositivo) mas em faces opostas.

4.2.5.2 Dispositivo construído

O dispositivo controlador de humidade pode ser visto na Figura 43.

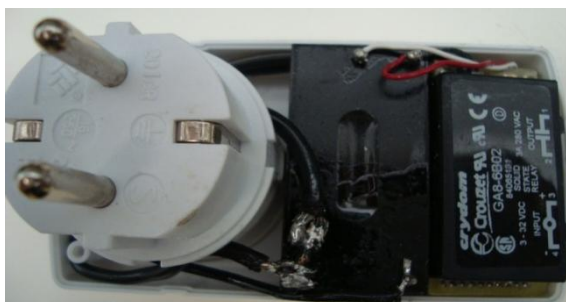


Figura 43 - Dispositivo controlador de humidade

Este dispositivo possui ligação entre os conectores da tomada e o transformador. A partir daí a tensão de 220volts alternados fornecida pela tomada de uso geral, é transformada nos 3,3volts contínuos para alimentação do *Xbee*. Na Figura 43 não é possível observar mas o módulo *Xbee* está colocado na parte de baixo da placa, para reduzir espaços de forma a caber na caixa. Quanto ao relé, ele está ligado ao conector de saída do dispositivo que se liga ao aparelho desumidificador. Quando o relé é activado surge uma energia suficiente para ligar esse dispositivo.

4.2.5.2 Encapsulamento do controlador de humidade

Nas Figuras 44 e 45 observa-se o dispositivo controlador de humidade, já com um encapsulamento adequado, para que possa ser ligado a uma tomada normal, e ao mesmo tempo o cabo do desumidificador possa ser ligada a ao dispositivo. Este dispositivo não é permanente, pode ser colocado ou retirado facilmente, sem que o desumidificador esteja condicionado ao dispositivo de controlo.



Figura 44- Vista frontal do dispositivo.



Figura 45- Vista lateral do dispositivo.

4.3 Desenvolvimento do Software

4.3.1 Introdução

O processo de monitorização possui dois tipos de software: o software para o microcontrolador dos módulos sensores e o software para a visualização dos dados. Sabendo que a visualização dos dados está encarregue de outro projecto, o software do microcontrolador presente nos módulos sensores e nos dispositivos *routers* está à nossa inteira responsabilidade.

Foi desenvolvido um programa que corresponde às exigências do nó sensor. Ou seja, um programa que permite agregar as variáveis de interesse recolhidas pelos sensores, que faz o tratamento necessário e que envia esses dados numa “frame” adequada ao tipo de comunicação da tecnologia *ZigBee*. Esse envio de mensagens é automático, em intervalos de tempo que podem ser facilmente alterados pelo programador. Um outro aspecto importante conseguido foi a utilização de funcionalidades do atmega 168 para adormecimento do *Xbee* e do microcontrolador, atingindo um dos objectivos principais que é a redução de consumo energético dos módulos sensores. A linguagem C foi a utilizada para a criação do *firmware*. Para implementar o código fez-se recurso ao AVR Studio, disponibilizado pelo próprio fabricante do microcontrolador, sendo que esta ferramenta cria o ficheiro “.hex” a ser carregado no microcontrolador. As principais secções do código do programa estão disponíveis no Anexo A.1.

4.3.2 Funcionamento do programa do microcontrolador

O programa principal tem uma estrutura simples, até porque precisamos de evitar processamento desnecessário por parte do microcontrolador, para reduzir o consumo de energia. O programa tem início com a configuração das portas PB0 e PB1 para entrada dos sinais do sensor SHT15. De seguida é configurada a porta PD6 para a ligação do led e a PD3 para o *Xbee*. Ainda nesta fase, dá-se a configuração do conversor analógico/digital para o sensor de luz. No final desta parte do programa, efectuam-se um conjunto de inicializações, nomeadamente as de interrupção, do relógio e da UART.

Depois disto, o microcontrolador é forçado a adormecer, acordando quando é gerada uma interrupção de *overflow* e voltando a adormecer no término dessa interrupção. Os restantes procedimentos, ou seja a monitorização propriamente dita acontece dentro da interrupção. A interrupção temporal de *overflow* ocorre de segundo a segundo, no entanto a monitorização é efectuada apenas de 10 em 10 minutos (600 segundos).

Para uma melhor compreensão do programa desenvolvido, são apresentados dois fluxogramas, o primeiro sobre o programa principal e o segundo sobre a interrupção temporal. Quanto ao código propriamente dito, as suas partes principais são apresentadas no anexo A.1.

A Figura 46 mostra o fluxograma do programa principal do *firmware* do atmega168.

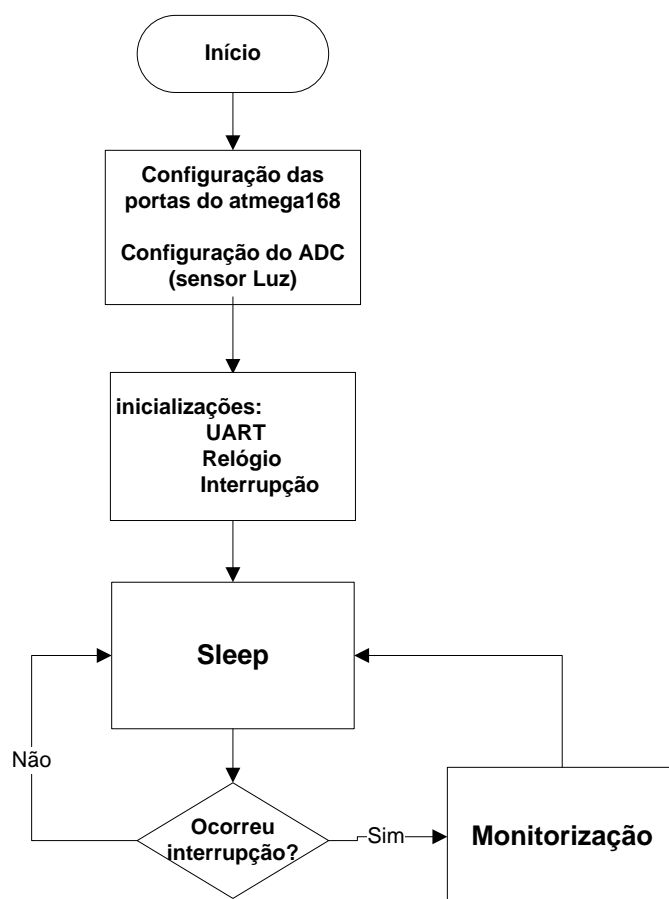


Figura 46- Programa principal do firmware

A função *Sleep* é determinante para a poupança de energia do microcontrolador. Assim utilizando o modo de adormecimento “*Power Save Mode*”, o atmega mantém o Timer2 activo,

mantendo-se a contabilização em tempo real. As restantes funcionalidades do atmega168 permanecem inactivas no período de adormecimento. O microcontrolador acordará quando a interrupção for gerada, continuando a execução do programa na parte com prioridade definida através da interrupção temporal.

Na Figura 47 tem-se de uma forma mais detalhada, o fluxograma da interrupção temporal, que corresponde ao módulo de monitorização do fluxograma anterior.

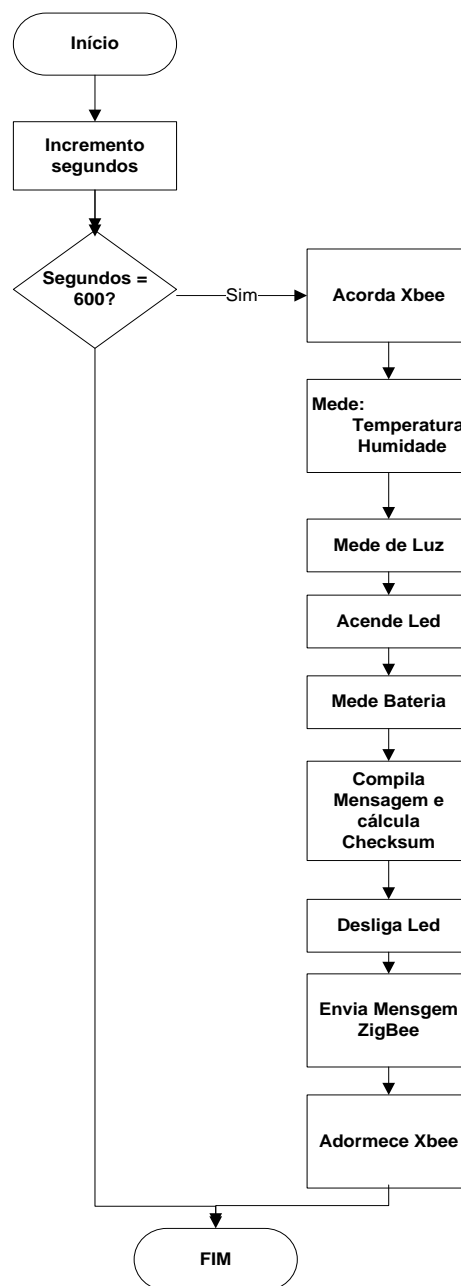


Figura 47- Fluxograma da interrupção temporal

Durante a interrupção os processos também são de certa maneira simples. Inicialmente existe um incremento de segundos. A cada interrupção verifica-se se o programa já atingiu os 600 segundos. Se não tiver ainda atingido, não é efectuado nenhum tipo monitorização, terminando a interrupção e voltando a interromper um segundo depois. Passados 10 minutos, o incremento atinge os 600 segundos. Nesse momento, o atmega acorda o Xbee e faz um conjunto de medições necessárias, enviando os dados na mensagem API ZigBee e voltando a adormecer o módulo Xbee, terminando aqui a interrupção.

Os processos de recolha de informação ambiental podem ser melhor entendidos com o diagrama de sequência, da Figura 48:

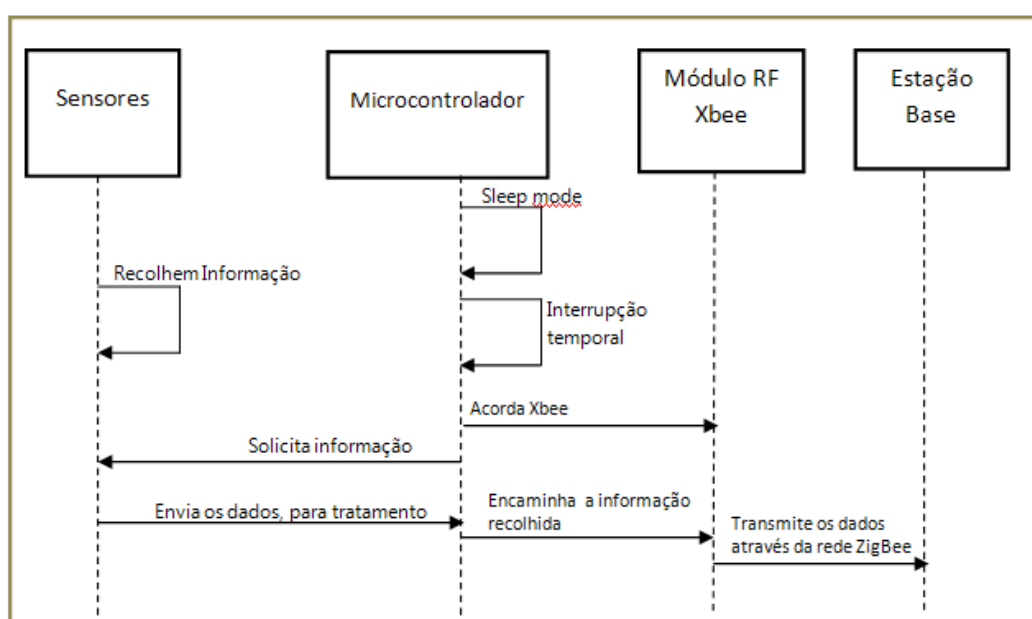


Figura 48- Diagrama de processos

4.3.3 Comunicação com o microcontrolador

A programação do *firmware* no microcontrolador foi conseguida, utilizando o programador AVR-ISP500, juntamente com o *AvrStudio*. Fez-se vários uploads do *firmware* para o microcontrolador atmega168, até transferirmos a versão final do programa. Utilizou-se o conector de 6 pinos. No anexo A2 está apresentado de uma forma mais detalhada desse dispositivo programador.

No *AvrStudio* (ver Anexo A.3) seleccionou-se qual a porta COM que o programador irá se ligar, escolhendo ainda o protocolo de comunicação (neste caso o STK500). Escolheu-se depois o tipo de relógio que o processador vai trabalhar (no nosso caso o oscilador interno de 8MHz). O *AvrStudio* permitiu alterar também os FUSES do microcontrolador, e ainda

verificar os valores de tensão que estão a alimentar o atmega168. A janela de programação que o programa disponibiliza (ver Figura 49), permitiu facilmente escolher o ficheiro “hex” a ser colocado no microcontrolador, existindo uma barra de estado nessa janela, que vai dando informações sobre o desenrolar da programação e se esta tudo a decorrer dentro do normal.

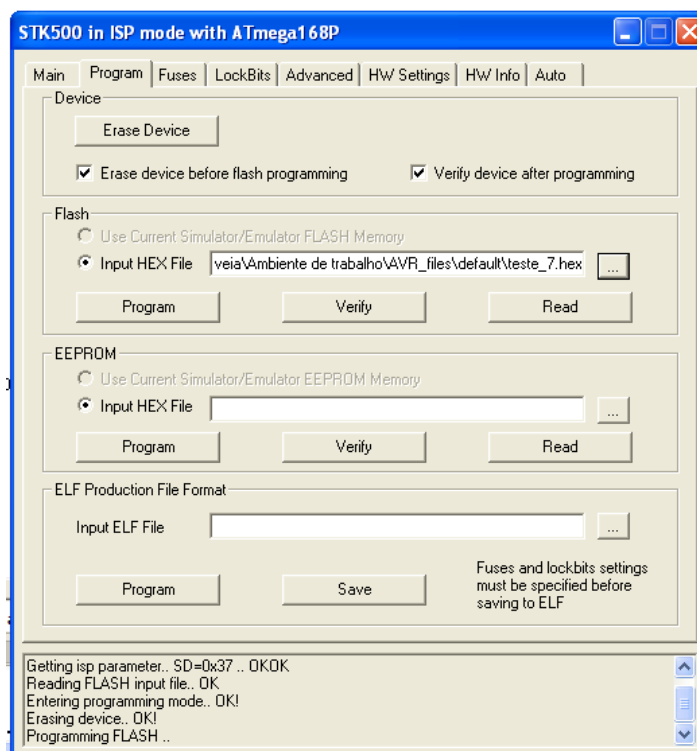


Figura 49- Janela de programação do AVR-Studio

Apesar de ser um procedimento acessível, foi nesta fase que surgiu um dos problemas com dificuldades consideráveis. O microcontrolador foi acidentalmente programado para trabalhar com um oscilador externo, o que fez com que deixa-se de funcionar, estando nesta fase o sensor aparentemente “estragado”. Felizmente o programador possui um pino 3 no ICSP10 para ligar à entrada XTAL1 do atmega168 para recuperar os valores FUSE correctos. Iniciando uma sessão normal de programação, mas com um fio ligado entre o pino 3 ICSP10 e o XTAL1, recuperou-se os valores correctos de frequência e por consequência o microcontrolador

4.4 Configurações de rede

A rede *ZigBee* é uma das partes mais importantes do projecto. Para a formação e correcto funcionamento da rede foram necessárias certas configurações nos módulos *Xbee*, através da

aplicação XCTU. O módulo que estará na estação base foi configurado com a versão de *firmware* XB24-ZB com a função de “COORDINATOR API”. A identificação da rede foi seleccionada na opção PAN ID, sendo 400 o valor escolhido. Na Figura 50 tem-se uma imagem da configuração efectuada através do ambiente gráfico do X-CTU. Qualquer dispositivo que se pretenda incluir na rede terá que ter o PAN ID de 400.

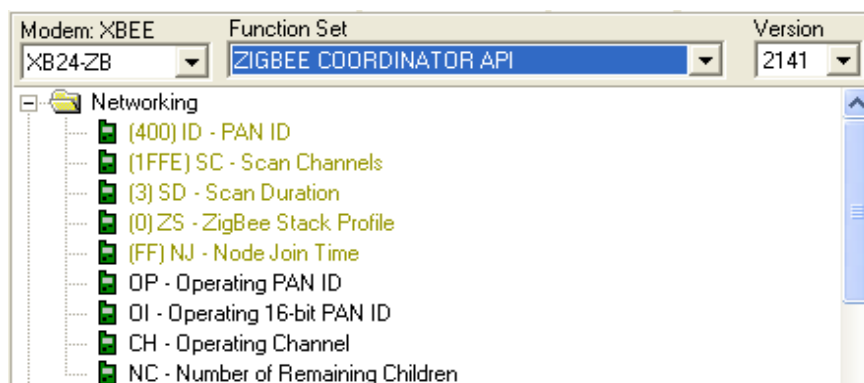


Figura 50- Configuração do coordenador de rede

Quanto aos módulos *Xbee* presentes nos sensores, foram configurados com a mesma versão de *firmware* mas com a função de “END DEVICE API”, colocando a mesma identificação da rede. Na Figura 51 observa-se que o *end device* está na mesma rede e canal que o coordenador.

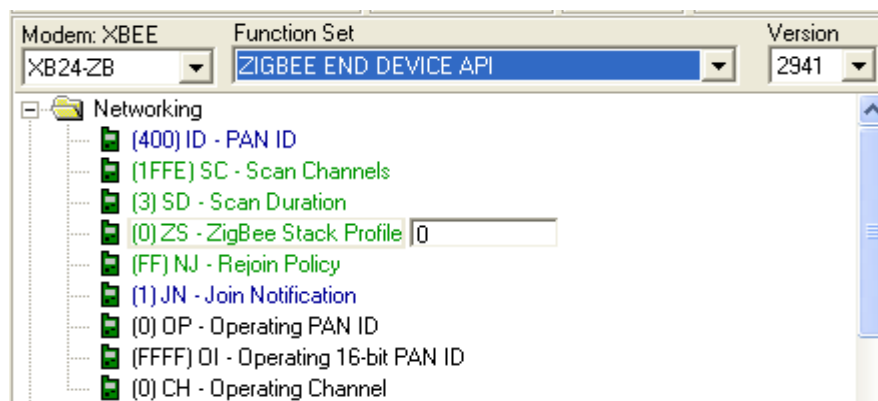


Figura 51- Configurações do End Device

É fundamental que o *end/device* seja ligado depois do coordenador, para que procure o canal livre em que o coordenador da rede está a operar.

Além das configurações observadas na Figura anterior, foi efectuada outra configuração importante que é no modo *Sleep* do *Xbee* dos *End/Devices*. Foi seleccionada o modo 1-PIN HIBERNATE, para que quando o microcontrolador dá ordem para adormecer, esse pino que está directamente ligado ao *amtega168* faz com que o módulo *Xbee* fique desactivado.

No que diz respeito ao Router as configurações foram iguais às do *End Device*. A opção de adormecimento do *Xbee* não foi activada, visto não ser necessária.

O módulo *Xbee (end device)* que está presente no dispositivo controlador de humidade foi configurado para estar na rede *ZigBee* do Museu. Além disso o pino 19 deste módulo foi colocado num estado “*Low*”, para que depois possa receber o comando vindo da estação base e possa se alterar para o estado “*High*” e por sua vez ligar o desumidificador.

4.5 Custos dos dispositivos da rede

Neste ponto são apresentados os custos dos dispositivos da rede de monitorização e controlo. Foram efectuadas diversas pesquisas, com vista a escolher os componentes menos dispendiosos. Os componentes foram adquiridos através da empresa *Farnell*, distribuidora de produtos electrónicos, de diversos fabricantes, através do Web site: <http://pt.farnell.com>.

4.5.1 Nó Sensor WISE-MUSE

Através de uma escolha apropriada, conseguiu-se reduzir significativamente os custos do sensor (Tabela, relativamente a outras opções no mercado).

Tabela 3- Custos Sensor

Componentes	Custo
Módulo <i>Xbee</i>	19,57 €
Sensor SHT15	22,01 €
Sensor Luz	5,16 €
ATMEGA168	3,56€
Cristal 32,768KHz	0,19 €
Slide Switch	0,65 €
DC-DC converter	0,70 €
Diodo Schottky	0,23
Led's (GREEN)	0,07€
Condensador 68n	1,46 €
Condensador 10n	0,40 €
Resistências 10K (5)	0,20 €
Condensadores 100nf (4)	0,34 €
Sockets	4 €
Headers	1 €
Caixas	6 €

65,54€total

4.5.2 Router WISE-MUSE

Apesar de que para a construção deste dispositivo, foram subtraídos os componentes do circuito step-up. A inclusão do transformador *XP-Power* fez subir substancialmente o preço.

Tabela 4-Custos do Router

Componentes	Custo
Módulo <i>Xbee</i>	19,57 €
Sensor SHT15	22,01 €
Sensor Luz	5,16 €
ATMEGA168	3,56
Cristal 32,768KHz	0,19 €
Led's (GREEN)	0,07
Resistências 10K (5)	0,20 €
Condensadores 100nf (4)	0,34 €
Socket	4 €
Header	1 €
Transformador XP-power	32 €
Caixas	5 €
	92,94€total

4.5.3 Dispositivo de controlo de humidade

Este dispositivo tem muito menos componentes do que os anteriores, no entanto o seu custo chega perto dos 76 euros. A principal razão para isto é novamente a necessidade de utilização do transformador XP-POWER, que como já foi referido é algo dispendioso, juntamente com um relé apropriado.

Tabela 5- Custos do controlador de humidade

Componentes	Custo
Módulo <i>Xbee</i>	19,57 €
Relé	17,84 €
Transformador XP-power	32 €
Caixa	7 €
	76,41 € Total

4.5.4 Coordenador de rede

O coordenador de rede foi adquirido directamente à empresa *Digi*, custando aproximadamente 63 euros.

4.6 Análise dos protótipos

Nesta subsecção analisa-se as características gerais dos dispositivos construídos e as funcionalidades conseguidas para o sistema WISE-MUSE, efectuando depois uma comparação com dispositivos existentes na área.

Começando pelo nó sensor WISE-MUSE, é possível afirmar que foram conseguidos os objectivos propostos. Este dispositivo é capaz de recolher informações sobre a temperatura, humidade e luz presentes em espaços fechados, de uma forma contínua e fiável. Apesar destas funcionalidades, os desenvolvimentos com maior relevância foram a nível de tamanho, custo e consumo energético. Estes três aspectos fazem com que este protótipo possa competir com sensores existentes no mercado, levando até vantagem neste tipo de aplicação (Monitorização em Museus).

A tabela 6 resume um conjunto de comparações entre o Nó Sensor WISE-MUSE e alguns produtos existentes no mercado.

Tabela 6- Comparação de sensores

Nós Sensores					
Características		WISE-MUSE	Mica 2 (MPR400CB) + Sensor Board (MTS101CA) [13]	Mica Z (MPR2400CA) + Sensor Board (MTS400CB) [13]	Tmote Sky [18]
Produzidos por:		Autor do projecto	Crossbow	Crossbow	Moteiv Corporation
Sensores	Parâmetros Monitorizados	Luz, humidade relativa, temperatura e estado da bateria.	Luz e temperatura	Luz, humidade relativa, temperatura, aceleração e pressão	Humidade, temperatura e luz
	Sensores de temperatura e humidade	SHT15	Termistor	SHT11	SHT11 or SHT15
	Precisão	Temp: +/- 0.3C° Hum: +/- 2%	Temp: 0.2 C°	Temp: +/- 0.2°C Hum: +/- 3.5%	Temp: +/- 0.2°C or +/- 0.3C° Hum: +/- 3.5%

					or +/- 2%
	Sensores de Luz	SI087 by Hamamatsu	CdSe photocell	TLS2550, by TAOS	SI087, by Hamamatsu
Transceiver	Módulo RF	Xbee or Xbee PRO, both by Digi	Chipcon Wireless Transceiver	TI CC2420 802.15.4/ZigBee compliant radio	Chipcon Wireless Transceiver
	Frequência	2.4GH	868/916 MHz, 433 MHz or 315MHz	2.4GHz	2.4GHz
	Protocolo	IEEE.802.15.4/ ZigBee	IEEE.802.15.4/ ZigBee	IEEE.802.15.4/ ZigBee	IEEE.802.15.4/ ZigBee
	Potência de emissão	0dBm to 18dB (PRO)	-20 to 5dBm	-24 to 0dBm	0dBm
	Alcance sem obstruções ¹	100mt to 1200m (PRO)	150mt	75 to 100mt	50 to 125mt
	Consumo energético (Tx)	35mA @ 0dBm ²	27mA @5dBm	17,4mA@0dB	17,4mA @
Processador	CPU	Atmel, Atmega 168	Atmel, ATmega128L.	Atmel, ATmega128	Texas Instruments MSP430 CPU
	Consumo energético (modo activo)	0.3mA @1MHz 1.9mA @4MHz 6.8mA @8MHz	5mA @4MHz 17mA @8MHz	5mA @4MHz 17mA @8MHz	2.4mA @ 8MHz
	Flash Memory	16Kb	128kb	128kb	48kb
	Programação	ISP	Base station	Base station	USB
	Serial Communication	UART	UART	UART	UART
	Dimensões físicas (mm) (Excluindo o pack de baterias)	(58x28x12)	(58x32x10)	(58x28x10)	(65x32x22)
Custos do Nó Sensor		70€	352€	**	82€

** não foram conseguidos valores concretos para os custos deste sensor.

Análise à tabela:

Através da tabela 7 retira-se algumas ilações sobre as capacidades e mais-valias do Sensor WISE-MUSE.

Comparação entre as diferentes marcas:

▪ Sensores específicos:

Todos os dispositivos comparados possuem capacidades semelhantes. Os sensores de humidade e temperatura têm valores de precisão muito aproximados, sendo que o nó sensor WISE-MUSE em particular tem uma precisão de $\pm 0,3C^{\circ}$ em relação à temperatura e $\pm 2\%$ em relação à humidade relativa. No que diz respeito à captação de luminosidade, todos eles utilizam fotodetectores.

▪ Módulos de transmissão:

Quanto aos módulos de transmissão por rádio frequência, o *Xbee* (utilizado no protótipo WISE-MUSE) apresenta-se bem colocado ao nível de capacidades. Têm uma potência de emissão desde os 0dBms até os 18dBms (*Xbee* PRO) que é superior à dos outros nós sensores. Esta característica permite obter um maior alcance dos módulos, ou seja podem transmitir a distâncias maiores da estação base. Tem a desvantagem de ter um consumo energético superior. No entanto como o *Xbee* é adormecido durante muito tempo, esse problema é minimizado.

▪ Unidade de processamento

Comparando os dispositivos sensores a nível de unidade de processamento, o protótipo WISE-MUSE possui vantagens consideráveis em relação aos outros. O mais importante é o seu consumo energético, visto que trabalhando à frequência de 1MHz pode conseguir um valor de 0,3mA, o que é bem inferior ao dos outros microcontroladores. A programação do atmega 168 é bastante acessível, através de um pequeno dispositivo programador com o protocolo ISP500, fazendo uma ligação entre o microcontrolador e o computador onde é compilado o código C. Isto é vantajoso em relação aos sensores Mica que necessitam de uma estação base para serem programados. Por fim o custo reduzido do atmega 168 (3euros) é uma vantagem adicional, comparando com os restantes.

- **Produto final**

Observando o protótipo WISE-MUSE como um todo, é possível afirmar que ele monitoriza a temperatura, humidade e luz de uma forma fiável, tendo dimensões consideravelmente reduzidas (58x28x12mm), estando em pé de igualdade com os restantes nesse sentido. É mais atractivo em termos financeiros visto que custa aproximadamente 65 euros, valor muito inferior aos dos Micas, que anda a volta dos 300 euros. Ao nível de autonomia energética foram conseguidos bons desenvolvimentos, estando o sensor capaz de monitorizar 45 dias ininterruptamente, sem mudar-se de baterias. Estas últimas três características fizeram parte dos principais desenvolvimentos pretendidos e foram positivamente alcançados.

Análise aos restantes dispositivos:

Quanto aos routers, eles corresponderam aos objectivos pretendidos. Ou seja, efectuem o encaminhamento dos dados vindos dos Nós, e eles próprios têm capacidades para monitorizar os parâmetros ambientais. Além disso não tem dimensões muito elevadas, e podem ser facilmente ligados a uma tomada de uso geral. Estes equipamentos possuem um módulo RF denominado de *Xbee* PRO, que têm uma potência de emissão superior aos normais, garantido o encaminhamento dos dados monitorizados até a estação base.

Por fim, pode-se dizer que o dispositivo de controlo de humidade pode ser bastante importante, quando existir alterações significativas nos valores de humidade das salas. Com poucos elementos (transformador, *Xbee* e relé) conseguiu-se construir um dispositivo que é capaz de receber um sinal remoto da estação base e activar um aparelho eléctrico automaticamente. O seu tamanho é também apelativo e pode ser facilmente colocado numa das tomadas do Museu.

Como balanço à análise dos dispositivos desenvolvidos, é importante referir que mais importante do que as capacidades de cada dispositivo criado, é o conjunto formado por todos estes elementos, que estando inseridos na mesma rede ZigBee e operando de uma forma ordenada, podem obter uma monitorização contínua de humidade, luz, e temperatura e ainda controlar a humidade das salas. As grandes vantagens estão na redução drástica dos

custos em relação a outros produtos, na boa autonomia dos módulos e nas dimensões reduzidas.

4.7 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os principais processos no fabrico e programação dos módulos. De todos os dispositivos, apenas o coordenador de rede foi adquirido à empresa *Digi*, não tendo de se fazer nenhum tipo de desenvolvimento. No entanto, os restantes dispositivos foram construídos de raiz, tendo sido ultrapassadas várias fases de desenvolvimento, desde a projecção dos nós até a programação final dos sensores. Durante estes processos foram surgindo dificuldades, mas que na sua grande maioria foram ultrapassadas com sucesso. Foram ainda apresentados os custos finais de todos os componentes da rede, sendo que principalmente no caso do *Nó sensor* conseguiu-se atingir custos bastante reduzidos, atendendo à complexidade e capacidade do dispositivo.

A comparação do protótipo WISE-MUSE com outras opções de mercado mostrou que este sensor pode ser uma boa solução para os Museus, aliado aos outros dispositivos criados para o sistema, que de uma forma conjunta monitorizam e controlam parâmetros ambientais em espaços como estes.

Propagação de Sinal

5.1 Introdução

Neste capítulo é efectuado um estudo de propagação *Wireless* em ambientes *indoor*, com vista a conseguir uma análise da cobertura da rede *ZigBee* nas salas do Museu que são alvo de monitorização.

Para as redes *wireless* em geral e para as redes de sensores sem fio em particular, o meio de propagação é o canal rádio móvel. Enquanto que as noções sobre a propagação no espaço livre estão bem definidas para qualquer frequência de operação, a propagação dentro de edifícios conta com as características do mundo real. Assim sendo, para uma boa cobertura da rede, é fundamental efectuar um estudo da propagação no ambiente onde será implantada a rede, sendo neste caso o Museu de Arte Contemporânea da Madeira e onde a frequência de transmissão dos sinais situa-se na gama dos 2,4GHz [14, 15].

O estudo da propagação de sinal é um processo complicado, no entanto, pretendeu-se obter boas estimativas dos níveis de sinal alcançados, ao longo das salas que são alvo de monitorização. Quanto mais completo for o estudo, melhor é o planeamento da rede em termos de cobertura, capacidade e eficiência. Para isso, foram escolhidos alguns modelos de propagação adequados para o tipo de ambiente que foi apresentado. Contudo foi também crucial efectuar medições no próprio Museu, para complementar os dados dos modelos, com vista a obter um estudo de cobertura o mais correcto possível.

5.2 O fenómeno da propagação

O fenómeno de propagação é algo complexo, mas é sempre importante tentar perceber a trajectória que um sinal rádio percorre entre o emissor e o receptor. Ela introduz uma série de fenómenos físicos que vão influenciar a amplitude e fase do sinal. As bandas de 2,4GHz podem ser utilizadas sem necessidade de licenciamento por parte de qualquer entidade

reguladora. O caso específico da faixa de frequências entre os 2,4GHz e 2,5GHz é designada por ISM, que traduzida significa, “Industrial, Científica e Médica” é apropriada para ser usada por equipamentos destas áreas e cuja limitação imposta é o nível máximo de potência de emissão (10dBms).

A estimativa correcta do sinal e o desenvolvimento de modelos para tal necessita de um conhecimento dos principais factores que influenciam a propagação em comunicações móveis. De seguida são analisados alguns dos fenómenos e aspectos mais importantes nesta área:

5.2.1 Dependência com a distância.

À medida que o sinal se propaga no meio, o seu nível de potência tende a reduzir com o aumento da distância entre o emissor e o ponto em que se está a medir. No entanto em ambientes fechados, a distância nunca é o único factor de redução do nível de potência, pois existem diversos obstáculos que provocam atenuação do sinal.

5.2.2 Penetração do sinal

Surge quando as ondas rádio encontram um obstáculo, que do ponto de vista da propagação via rádio frequência, é visto como sendo transparente. No caso específico do Museu poderão ser as paredes, janelas, portas ou armários. Na Figura 52 está representado um exemplo deste fenómeno [15].

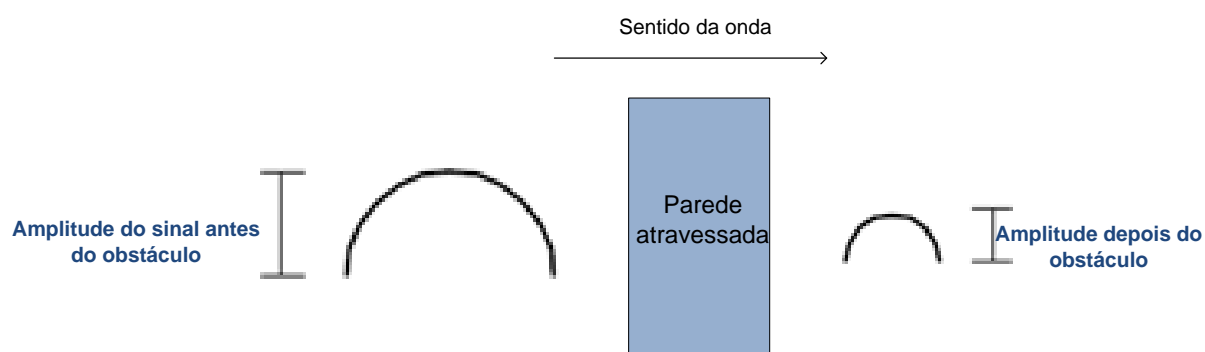


Figura 52- Fenómeno de penetração do sinal numa parede [15]

De uma maneira mais concreta, pode-se dizer que haverá ligação entre diferentes sensores, mesmo que estejam separados de linha de vista por algo presente no local da rede. Isto significa que esses obstáculos são penetráveis pelas ondas rádio, havendo no entanto uma redução da amplitude do sinal após a passagem. Essa redução dependerá do material que constitui a obstrução [15]. Portanto, é importante medir no terreno a atenuação causada pelas obstruções, para que a ligação entre os sensores e a estação base não seja comprometida.

5.2.3 Difracção

No momento em que um obstáculo impenetrável, com dimensões consideravelmente maiores que o comprimento de onda se apresenta no caminho da onda electromagnética, esta acaba por contornar esse obstáculo. O efeito da difracção é mais evidente nos extremos do obstáculo, onde as ondas rádio irão sofrer algum espalhamento. Alguma da energia do sinal é encaminhada para fora do trajecto previsto, entre emissor e receptor. Apesar deste fenómeno, é possível que o receptor receba o sinal do emissor. A Figura 53 ilustra esta situação [15].

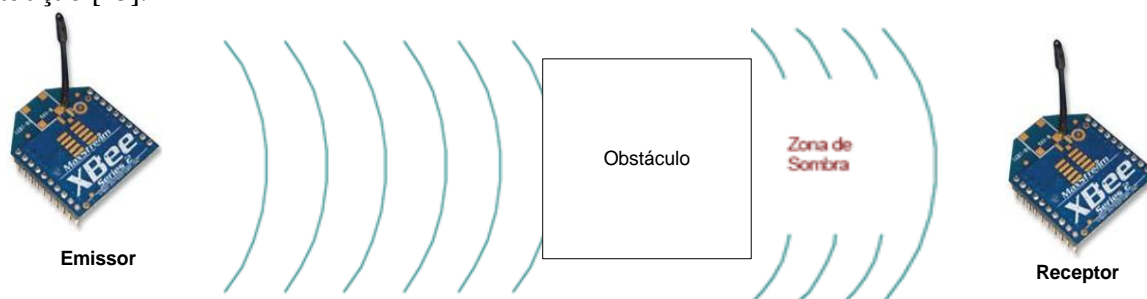


Figura 53- Fenómeno da difracção

5.2.4 Reflexão

Este fenómeno acontece quando as ondas electromagnéticas atingem um obstáculo com maiores dimensões do que o comprimento de onda da onda incidente. A onda reflectida poderá beneficiar o fortalecimento do sinal, ou por outro lado vir a degradar o seu nível no ponto de recepção, dependendo da fase com que chega ao receptor. No caso do projecto a que está associado este estudo, a reflexão poderá se dar devido ao chão, tectos e armários das salas de reservas.

O efeito da reflexão tem uma grande supremacia sobre os restantes, pois é a principal causa do efeito multipercurso nas comunicações móveis. Na Figura 54 está ilustrado este fenómeno [15].

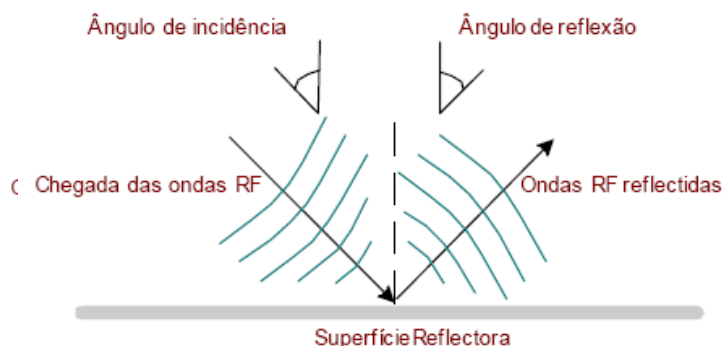


Figura 54- Fenómeno de reflexão

5.2.5 Dispersão

A dispersão ocorre quando existem diversos obstáculos entre o emissor e o receptor. Irá acontecer certamente nas salas de reservas do Museu, isto porque elas possuem diversos armários, que fazem com que a frente de onda incidente vinda do emissor se subdivida. Este fenómeno é visível na Figura 55 onde o sinal emitido pelo módulo RF, após embater nos obstáculos espalha-se em todas as direcções, reforçando ou diminuindo o nível de sinal no receptor, dependendo da fase. É de certa forma semelhante à difracção mas o sinal espalha-se em muito mais direcções [15].

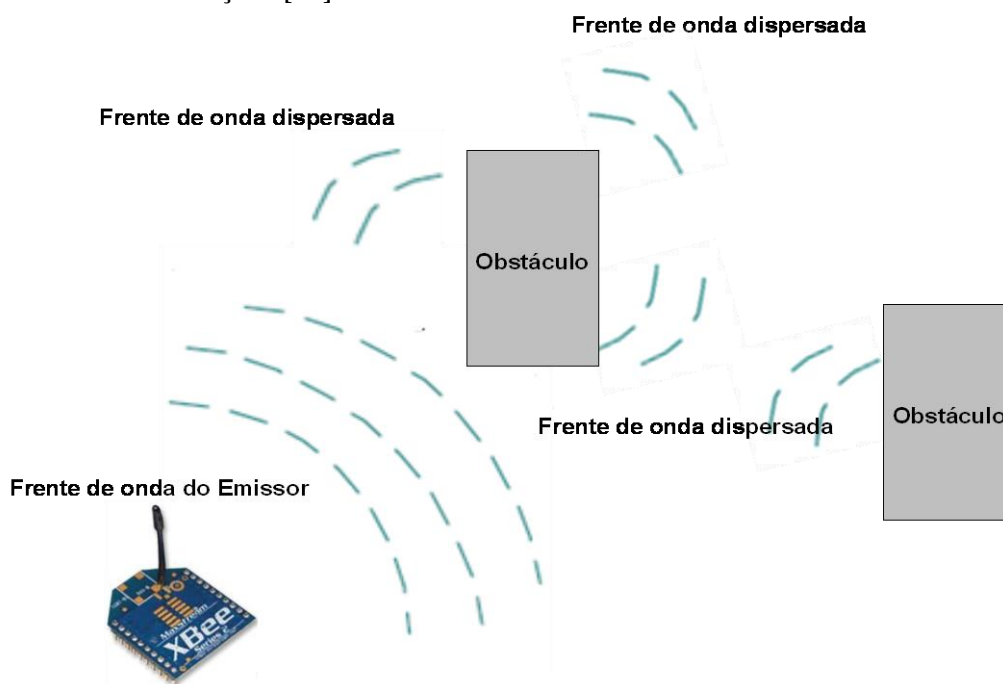


Figura 55-Fenómeno da dispersão

5.2.6 Efeito de Guia de onda

O efeito de guia de onda verifica-se em exteriores, por exemplo em ruas ladeadas de edifícios e em interiores nas áreas de corredores, por exemplo. Nestes espaços, a energia das ondas que se propagam está confinada e não se espalha como na situação de espaço livre. É um efeito que ao contrário dos anteriores será positivo e uma mais-valia para a transmissão de sinal [15].

5.3 Modelos de propagação

5.3.1 Introdução

Como já foi referido anteriormente, a propagação *indoor* das ondas electromagnéticas é um ponto central para a operação das redes sem fios. Por isso modelar a propagação dentro de edifícios é complexo devido á forma e variedade dos materiais utilizados, para construção do edifício em questão. Somando a isto, o ambiente pode rapidamente alterar-se através do movimento de pessoas, da abertura de portas, etc. [14].

Os modelos de previsão das perdas de percurso, que irão ser usados e que posteriormente serão confrontados com os resultados das medições, fornecem o valor mediano das perdas. Cada modelo apresenta diferentes características e é adequado a determinados ambientes e frequências de operação. Os modelos de propagação estão divididos em dois grupos principais: modelos empíricos e modelos estatísticos. A principal diferença entre os dois tipos de modelos é que os empíricos baseiam-se em medições efectuadas no terreno, em diferentes tipos de ambiente e situação. Com isto é conseguida uma melhor aproximação do modelo à realidade. Já no caso dos modelos teóricos (estatísticos), estes são fundamentados apenas em princípios físicos e equações previamente concebidas e que orientam-se pela propagação da onda electromagnética num determinado meio [15, 16].

Foi analisado o modelo de atenuação no espaço livre como ponto de partida, mas os restantes modelos são empíricos, pois trazem resultados mais próximos da realidade e que poderão proporcionar um melhor planeamento da rede. Em seguida são apresentados alguns modelos empíricos:

5.3.2 Modelo de atenuação no espaço livre

Estamos perante uma propagação em espaço livre, quando a linha de vista entre o emissor e receptor está livre de obstáculos. Assim sendo, a única atenuação que existe é a que resulta do espalhamento da energia radiada pela antena do emissor, que resulta num nível de sinal inverso com o quadrado da distância de afastamento à antena emissora [14, 15].

Friis determinou a potência recebida em espaço livre [15]:

$$P_r = \frac{P_t * G_r * G_t * \lambda^2}{(4\pi * d)^2} \quad (5)$$

Os parâmetros desta equação são os seguintes:

- **Pr** : potência recebida em W;
- **Pt**: potência de emissão em W;
- **Gt e Gr** são os ganhos das antenas;
- **λ**: Comprimento de onda em metros.

Apesar de que todos os modelos partem do modelo de atenuação no espaço livre, este é um modelo pouco exacto, pois não relaciona nenhuma característica do meio. Mesmo assim, tem utilidade para uma previsão inicial de perdas e permite fazer os primeiros prognósticos sobre uma determinada ligação. Para o caso do Museu são também abordados outros modelos mais específicos.

5.3.3 Modelo *One Slope*

O modelo COST 231 *One Slope* assume uma dependência linear entre a perda de trajecto (dB) e a distância logarítmica em ambientes indoor, sendo expresso por [15]:

$$L = L_0 + 10 * n * \log(d) \quad (6)$$

Os parâmetros da expressão 6 são:

- L= Perdas totais;
- L0= Perdas iniciais no primeiro metro
- n = gradiente de potência - distância.

Considerando $L_0= 33,3\text{dB}$ e $n=4$, obtêm-se a seguinte tabela de valores de sinal:

Tabela 7- Valores Modelo One Slope

Modelo One Slope	Distancia (metros)	Perdas (dB)	Perdas (dBm)
	1	33,3	63
	2	45,3	75
	3	52,4	82
	4	57,4	87
	5	61,3	91
	6	64,4	94

Na Figura 56 observa-se o aumento da atenuação, quando o receptor se afasta do ponto emissor, dentro de um espaço fechado. Este modelo aponta para uma perda no primeiro metro de afastamento de 63dBm, sendo que ao fim de seis metros já apresenta uma atenuação 94dBm's.

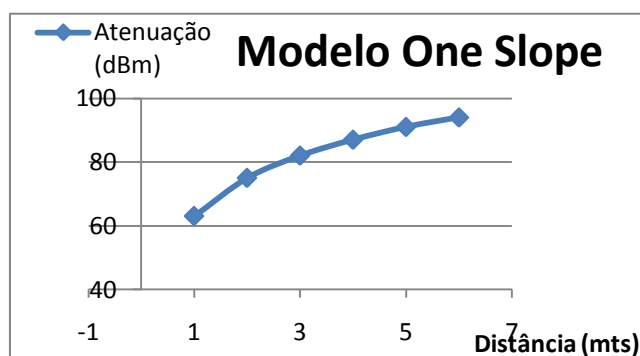


Figura 56- Gráfico de atenuação do Modelo One slope

5.3.4 Modelo ITU 1238-1

O modelo da ITU de propagação para ambientes *indoor* tem a seguinte expressão [14]:

$$L_{total} = 20 * \log_{10}(F) + N * \log_{10}(d) - 27,54 \quad (7)$$

Onde:

- **F:** é a frequência em mega hertz;
- **d :** é a distância entre emissor e receptor;
- **N:** é o coeficiente de perda de potência devido à distância;

Para o caso do Museu, considerou-se um valor de $N=28$ através da análise de uma tabela de coeficientes fornecida pela ITU para este tipo de ambientes [14]. A frequência de operação é de 2400 MHz, visto estar-se a trabalhar com a tecnologia *ZigBee*.

Considerando uma distância inicial de um metro e aumentando-a até os seis, obteve-se os seguintes valores de perdas:

Tabela 8- Valores Modelo ITU 1238-1

Modelo ITU 1238-1	Distancia (metros)	Perdas (dB)	Perdas (dBm)
	1	40,1	70
	2	48,5	79
	3	53,4	83
	4	56,9	86
	5	59,6	89
	6	61,9	91,9

O comportamento da atenuação do sinal com a distância dentro do espaço interno pode ser analisado com o gráfico da Figura 57:

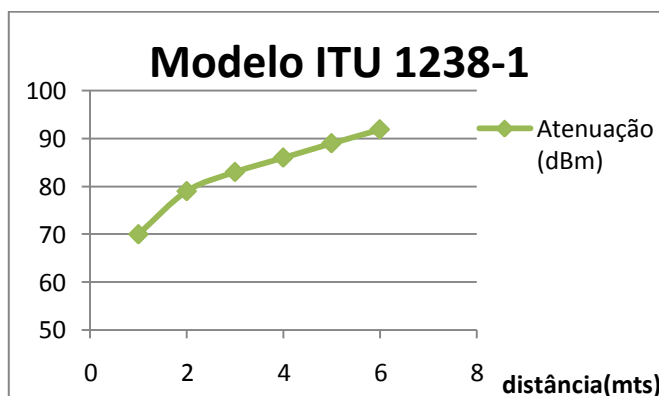


Figura 57- Gráfico de atenuação do modelo ITU 1238

No primeiro metro de afastamento entre o emissor e o receptor já são previstas perdas na ordem dos 70dBms. A partir do segundo metro o aumento da atenuação não foi tão acentuado, e ao fim dos 6 metros são previstas perdas de 92dBms.

5.4 Análises e medições no terreno (Museu)

As medições foram efectuadas no Museu de Arte contemporânea da Madeira, incidindo nas reservas, no escritório e na zona que os separa. Pretendeu-se estudar a transmissão de

sinal dentro de cada sala, bem como a transmissão entre os routers de cada sala e o coordenador de rede, que será instalado no escritório. Aqui serão caracterizados também os obstáculos e outras condicionantes à propagação do sinal.

É importante ter em conta, que a potência de emissão dos módulos RF Xbee que serão utilizados é de 0dBms (1mWt). Por outro lado, a sensibilidade de recepção vai até os -92dBms, sendo que abaixo desse valor de potência a ligação será certamente quebrada.

5.4.1 Caracterização das áreas e ambientes a medir

É importante caracterizar os espaços alvos de estudo, para perceber as características e os objectos que irão influenciar os resultados obtidos. As áreas analisadas foram as seguintes:

- **Sala de Reservas I do Museu**

A primeira sala de reservas encontra-se no piso zero do Museu. É uma sala com pouco movimento de pessoas, isto porque serve apenas para se guardar as obras de arte, que não estão em exposição. A sua planta é apresentada na Figura 58, estando as distâncias definidas em metros.

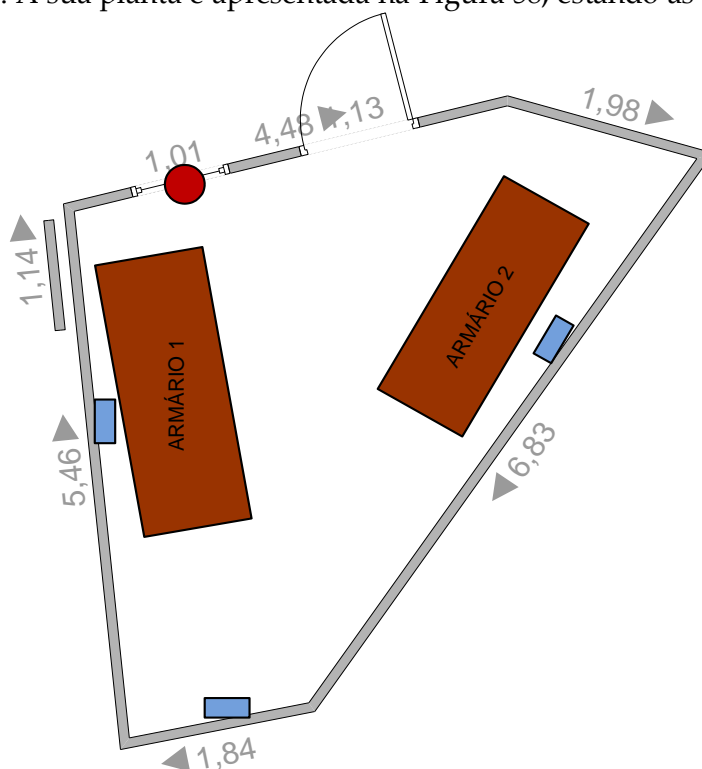


Figura 58- Planta da sala de Reservas I

A azul estão marcadas as zonas onde é recomendada a colocação dos sensores, devido à proximidade com as obras de arte, sendo que a vermelho deverá ficar localizado o router.

A construção desta sala é essencialmente feita de pedra, contendo uma porta de madeira e ainda uma janela de vidro. Este espaço possui 2 grandes armários onde são colocadas as obras de arte. Possui ainda alguns aparelhos de desumidificação. Todos estes objectos são causadores de perturbações na propagação do sinal RF. Na Figura 59 é possível observar um pouco do interior desta sala.



Figura 59-Interior da sala de reservas 1

Para esta sala, tem-se como objectivo colocar três dispositivos de monitorização ambiental, sendo que um deles terá funções de encaminhamento, estando por isso ligado a uma tomada eléctrica.

▪ **Sala de Reservas 2 do Museu**

Nesta segunda sala, que tem maiores dimensões do que a primeira, estão também guardadas algumas obras de arte, que posteriormente serão expostas ao público. As características de construção e de materiais lá colocados são semelhantes à sala anterior. Na Figura 60 é apresentada a planta desta sala.

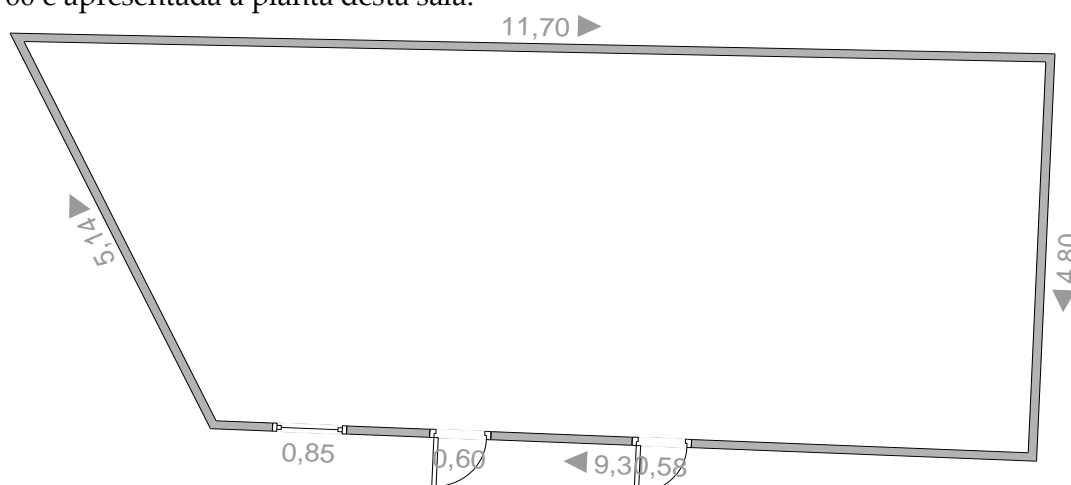


Figura 60- Planta Sala de reservas 2

5.4.2 Material e software para as medições

Material:

Para efectuar as medições foram utilizados os seguintes dispositivos:

- Emissor (Módulo Xbee, placa xbee e *loop back*);
- Receptor Xbee (Módulo Xbee e placa para ligação ao portátil);
- Fita métrica

Software: - XCTU

Com este software foi possível identificar a potência de sinal recebida pelo coordenador, aquando do envio de dados por parte do dispositivo *End Device*.

5.4.3 Medições

Medida do nível de sinal ao longo da sala de reservas I:

▪ Sala de Reservas I

Para estas medições foi colocado um receptor num ponto fixo da sala, sendo que depois o emissor foi se deslocando metro a metro, até atingir o extremo oposto da sala.

Na tabela 9 encontram-se os valores de sinal recebidos. O primeiro parâmetro da tabela corresponde à distância entre o emissor e o receptor, que foi que foi aumentada gradualmente. Foram criadas duas colunas com a potência de emissão, e a potência de recepção medida. Posteriormente, foram calculados os valores de perdas, em dBm e dB.

Tabela 9- Valores medidos de perdas

Distancia (metros)	Perdas (dB)	Perdas (dBm)	Pt emissão (dBm)	Pt recebida (dBm)
1	14,0	44	0	-44
2	21,0	51	0	-51
3	25,0	55	0	-55
4	26,0	56	0	-56
5	28,0	58	0	-58
6	32,0	62	0	-62
7	34,0	64	0	-64
8	37,0	67	0	-67

Com o gráfico da Figura 61 é mais visível o comportamento da atenuação ao longo da sala.

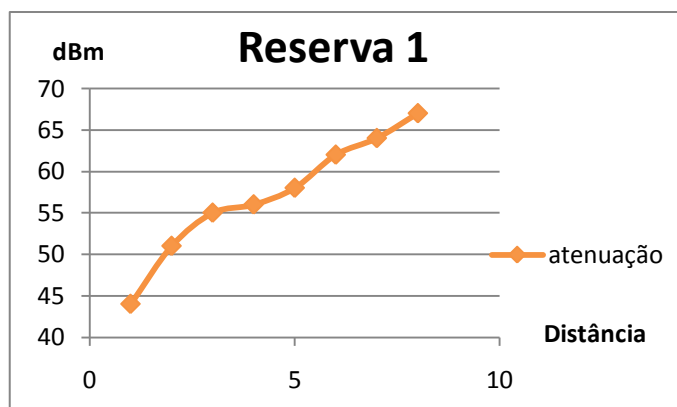


Figura 61- Valores de atenuação medidos na sala

Verifica-se que os valores de atenuação ao longo da sala são menores do que os modelos indicavam para este tipo de situações. No primeiro metro as perdas foram de aproximadamente 44dBms, tendo uma atenuação de 67 dBms no extremo oposto da sala. Mesmo assim é importante referir que os pontos de medição estavam em linha de vista com o receptor. É de destacar que, colocando o receptor num ponto fixo da sala, consegue-se captar o sinal do emissor em qualquer ponto da sala de Reservas 1 do Museu.

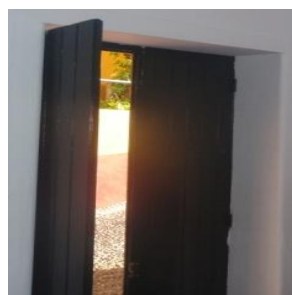
▪ Sala de Reservas 2

Nesta segunda sala não são apresentados valores de perdas de sinal, visto que não foi possível acedermos ao local as vezes necessárias, em tempo útil para o efeito. No entanto aquando de uma presença nesse espaço, constatou-se que o comportamento de sinal ao longo da sala é de certa forma semelhante ao espaço anterior. A comunicação entre os dispositivos pode ser efectuada sem problemas.

Perdas causadas por penetração em objectos.

De seguida são apresentados alguns obstáculos à propagação de sinal no Museu:

▪ Porta de Madeira

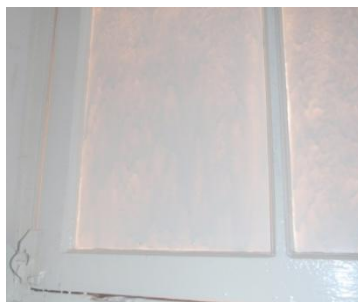


Atenuação: 10dBms

Figura 62- Porta de Madeira

Efectuou-se uma medição de sinal recebido, com o emissor colocado antes e depois da porta de madeira. Antes da porta o sinal recebido tinha uma potência de -67dBms, sendo que depois da porta foi de -77dBms. Assim sendo, concluiu-se que este obstáculo provoca uma atenuação de aproximadamente 10dBms no sinal recebido.

- **Janela de Vidro**



Atenuação: 13dBms

Figura 63- Janela de Vidro

Seguindo o mesmo processo, do que para o caso da porta, retirou-se as perdas causadas pela janela de vidro, sendo de 13dBms.

- **Armários**

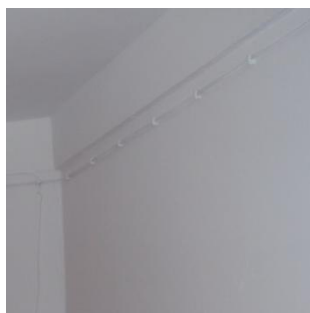


Atenuação 13dBms

Figura 64- Armários do Museu

Se um dos armários estiver entre um sensor emissor e outro receptor, o sinal poderá decair 13dBms na sua intensidade.

- **Parede**



Atenuação: 18dBms

Figura 65- Parede do Museu

As paredes são outro importante obstáculo na comunicação por rádio frequência. Após as medições no terreno, concluiu-se que o sinal sofre uma atenuação de 18dBms.

5.4.4 Análise às medições efectuadas

Após efectuar os testes nas duas salas de reservas verificou-se que os valores de perdas medidos foram inferiores aos valores teóricos estimados. Isto deve-se à especificação do cenário, cada espaço tem características específicas, daí o afastamento dos valores de atenuação dos modelos teóricos para interiores.

5.5 Mapa de cobertura da rede.

Após o estudo teórico e recolha dos valores de nível de potência do sinal nas salas de reservas, foi possível efectuar um mapa de cobertura para a sala de reservas 1 do Museu. É importante referir que o ponto de referência principal em cada sala é o dispositivo router. O nível de sinal retirado ao longo da sala corresponde aos valores RSSI em relação ao router, que após receber os vários dados de vários sensores irá encaminhá-los até a estação base. Para a sala de Reservas 1 apresenta-se o seguinte mapa:

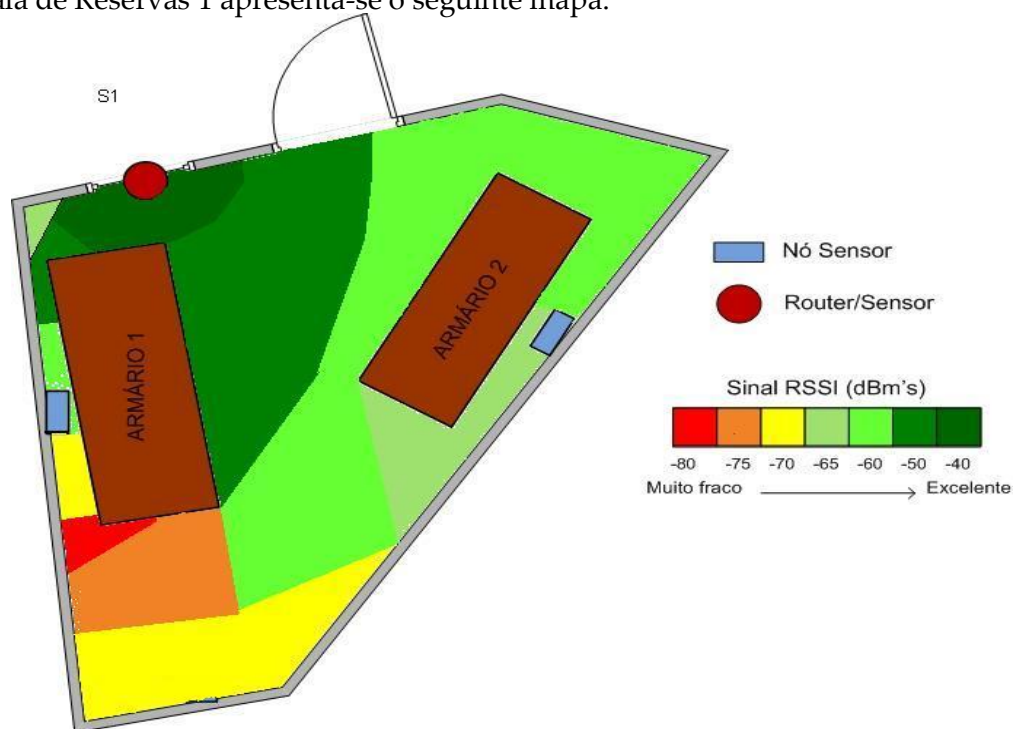


Figura 66- Mapa de cobertura de rede (Sala I)

Atendendo a que o dispositivo router terá uma sensibilidade de pelo menos -90dBms, pode-se observar pela Figura 66 que em todos os pontos da sala existe possibilidade de comunicação até ao router que ficará localizado na janela, com vista a possibilitar a ligação

até a estação base. Assim sendo, serão colocados dois nós sensores junto das obras de arte, sendo que o valor de potência de sinal recebido dessas zonas é cerca de -60dBm .

Em relação a sala de reserva 2 não foi possível elaborar o mapa por não termos conseguido efectuar as medições necessárias. No entanto, existirá certamente comunicação entre os dispositivos dessa sala, visto que as características são idênticas à sala de reservas 1.

A estação base situa-se no escritório do Museu, no primeiro andar. Apesar de este espaço estar um pouco afastado das salas de reserva (30mts até a sala de reservas 1), a comunicação entre os dispositivos da rede estará assegurada. Na Figura 67 apresenta-se um esquema desta ligação.

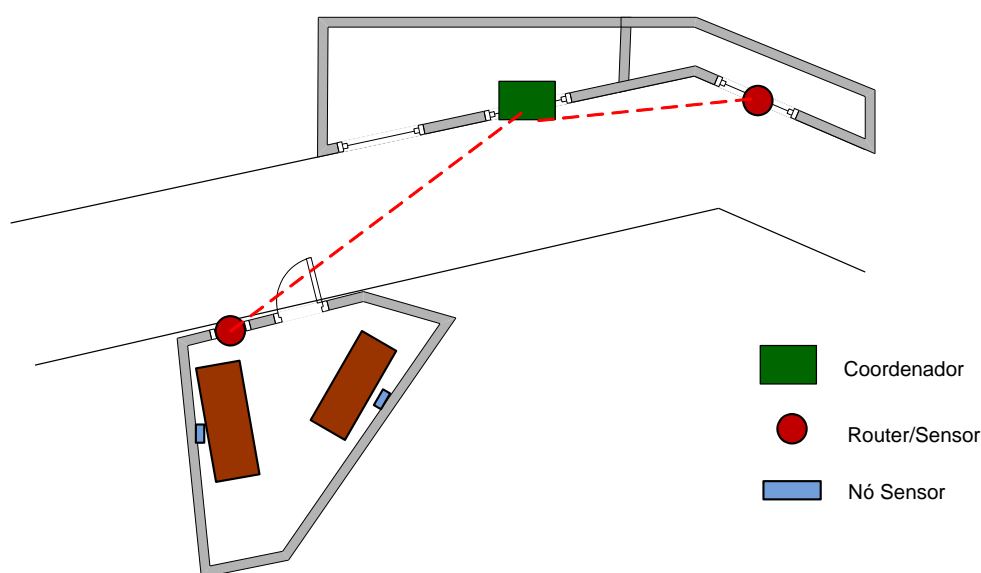


Figura 67- Ligação entre Salas de Reservas e Escritório

Para que esta comunicação seja garantida, serão colocados routers junto às janelas de cada sala de reservas, sendo que o coordenador da rede estará junto do computador que irá receber os dados em tempo real. Através dos testes realizados verificou-se que o sinal que parte do router 1, chega ao coordenador com uma potência de -75dBm . O valor que chega ao coordenador, a partir do Router 2 é de -60dBm , sendo que este valor de potência é superior devido à distância entre os dispositivos ser menor. Assim sendo a comunicação entre routers e coordenador de rede está também assegurada.

5.6 Conclusões

Este estudo reforçou a confiança no sucesso da instalação da rede *ZigBee* no Museu de Arte contemporânea do Funchal. Isto porque através de estudos teóricos e essencialmente através de medições no terreno, foram analisados os níveis de perdas ao longo das salas de reservas. Mesmo com atenuações de sinal causadas por reflexões, dispersão, penetração em objectos e outras, os sinais enviados a partir dos dispositivos end device conseguem ser captados pelo receptor situado no escritório do Museu.

Capítulo 6

Testes e Resultados

6.1 Introdução

Ao longo de um ano de trabalho neste projecto, foram efectuados inúmeros testes em várias áreas. Neste sexto capítulo pretende-se descrever alguns dos testes mais importantes, bem como apresentar os resultados obtidos com os dispositivos de monitorização e controlo para Museus.

6.2 Primeiros resultados do Nó Sensor WISE-MUSE

Na primeira fase de testes do sensor WISE-MUSE, utilizou-se o laboratório de telecomunicações da Universidade da Madeira. O nó sensor foi colocado a uma altura de 2 metros dentro da sala, existindo uma distância entre o emissor e o receptor de 6 metros, apesar de que em qualquer espaço da sala, o sensor consegue comunicar com a estação base. Para este primeiro teste, foi configurado o nó sensor com um módulo *Xbee end device*, e outro módulo *Xbee* como *coordinator* para captura dos dados numa ligação ponto a ponto. Para visualização dos dados, utilizou-se o programa X-CTU fornecido pela empresa *Digi*.

Os resultados obtidos referem-se às medições efectuadas pelo nó sensor sobre 3 parâmetros, que são: Temperatura, Humidade, Luz. Os parâmetros foram recolhidos de 10 em 10 minutos, no entanto para a elaboração dos gráficos, recolhemos amostras de hora em hora, desde as 9 horas da manhã até as 17 h.

Começando pela luminosidade, apresenta-se o seguinte gráfico da Figura 68:

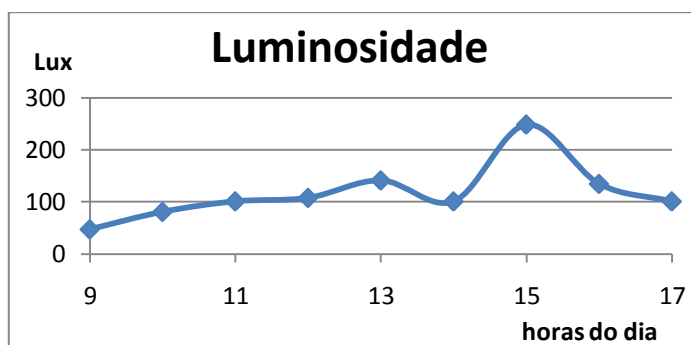


Figura 68- Gráfico de Luminosidade do Sensor

Como era de esperar, a luminosidade começou baixa no início da manhã, tendo um valor de 47 lux às 9h. Houve um aumento desses valores durante a manhã até atingir um pico às 15h. Depois disso voltou novamente a descer para valores próximos dos 100lux. Apesar de a luz ser o parâmetro mais variável, foram conseguidos valores normais entre os 50 e os 200 lux aproximadamente.

Na Figura 69 é apresentado o gráfico correspondente aos valores de humidade, captados pelo sensor WISE-MUSE desenvolvido.

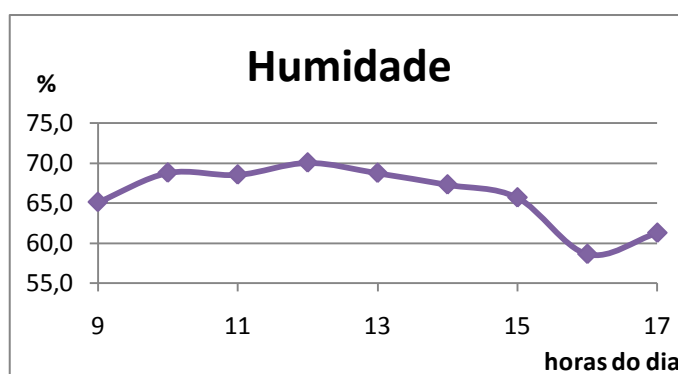


Figura 69-Gráfico de monitorização de humidade por parte do Sensor

No que diz respeito a este parâmetro, os valores mantiveram-se entre os 60 e os 70%. Começando a manhã com 65% de humidade, foi aumentando gradualmente até às 12h e depois baixou de uma maneira pouco acentuada, terminando com um valor perto dos 60% às 17h. Estes valores são bastante aceitáveis para a região, nesta altura do ano (Maio).

No gráfico da Figura 70 apresenta-se o comportamento da temperatura da sala ao longo do dia.

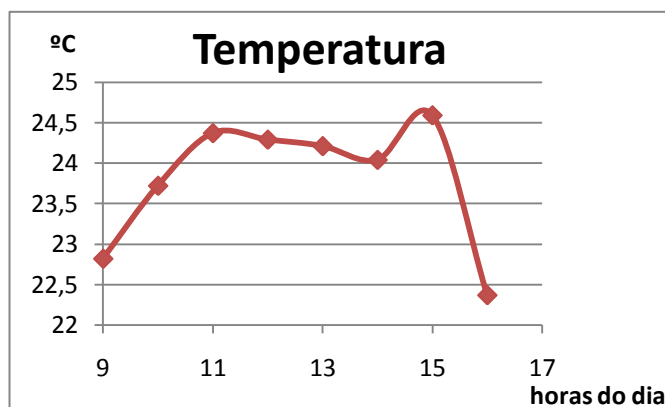


Figura 70- Gráfico de temperatura monitorizada pelo Sensor

Às 9h da manhã na primeira recolha estavam 22,5°C e com o avançar do dia a temperatura foi subindo até atingir um máximo de 24,59 °C às 3h da tarde. Depois voltou a descer mas mantendo-se acima dos 22 graus.

Conclusões aos primeiros testes:

Estes resultados tem sempre uma margem de erro associada a cada sensor (+/-0,3°C para a temperatura e +/-2% para a humidade), no entanto pensamos que estes primeiros resultados indicam-nos um bom comportamento do nó sensor WISE-MUSE. Os testes reais no espaço do Museu dão mais a frente uma melhor garantia da eficiência dos módulos construídos.

6.3 Autonomia do Nó Sensor

Este teste foi extremamente importante, porque com ele constatou-se o tempo de vida das baterias do nó sensor. Este parâmetro foi um dos pontos críticos do sistema e foram desenvolvidos mecanismos para que fosse conseguido uma autonomia considerável do Sensor, com vista a que os funcionários do Museu não tivessem de estar constantemente a trocar de baterias.

O sensor foi colocado no laboratório de electrónica da Universidade da Madeira, estando programado para recolher e enviar os dados ambientais, de 10 em 10 minutos, até a estação base. Este dispositivo manteve-se ligado durante um tempo considerável (45dias), sendo apresentado na Figura 71 o gráfico correspondente ao comportamento do nível de tensão das baterias AA utilizadas para alimentar o Nó Sensor.

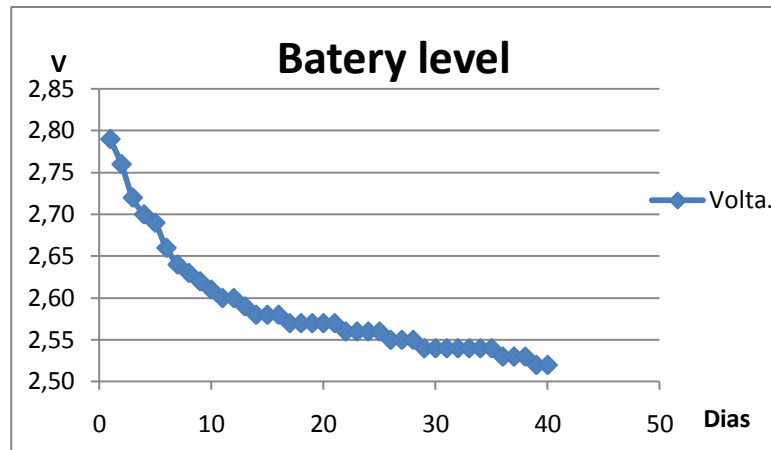


Figura 71- Gráfico de comportamento das baterias AA

Nos primeiros 10 dias de monitorização a tensão da bateria teve uma descida um pouco acentuada dos 2,8v até aos 2,6volts. No entanto a partir daí o decréscimo da tensão foi muito mais baixo e durante os outros 30 dias a tensão da bateria desceu apenas 0,1v, sendo que no final de 40 dias de utilização o módulo continuava operacional. Após esta fase de alguma estabilidade, passados 45 dias desde o dia em que o dispositivo foi ligado, os valores de tensão decresceram de uma maneira muito acentuada e o sensor acabou por se desligar.

Conclusões do teste de autonomia:

Após o término deste teste, pode-se afirmar que o nó sensor WISE-MUSE tem uma autonomia de pelo menos 45 dias (6 semanas). É importante referir que os valores de tensão de bateria são constantemente enviados na mesma mensagem de monitorização, por isso o funcionário do Museu poderá ser alertado para a necessidade de mudança de pilhas, assim que forem ultrapassadas as 6 semanas de funcionamento.

Para esta boa autonomia do dispositivo, contribuíram de uma forma decisiva os mecanismos de adormecimento do microcontrolador e do módulo *Xbee*. A escolha de componentes de baixo consumo foi o outro aspecto que ajudou a que se atingisse um dos objectivos importantes do projecto.

6.4 Testes de rede no laboratório

Após conhecermos os resultados do sensor WISE-MUSE, testou-se a criação e funcionamento da rede *ZigBee* em ambiente real. Estes testes foram realizados na Universidade da Madeira, no laboratório de Telecomunicações e no corredor do piso -2. Para

tal utilizou-se três tipos de dispositivos desenvolvidos no âmbito do projecto: um nó sensor, um router/sensor e um coordenador de rede. A topologia adoptada foi a de árvore.

A Figura 72 mostra a colocação dos vários dispositivos no corredor e no laboratório, bem como as distâncias entre si. O router esteve em linha de vista com o nó sensor, no entanto em relação ao coordenador de rede existiu vários obstáculos (paredes, portas, etc) a separa-los.

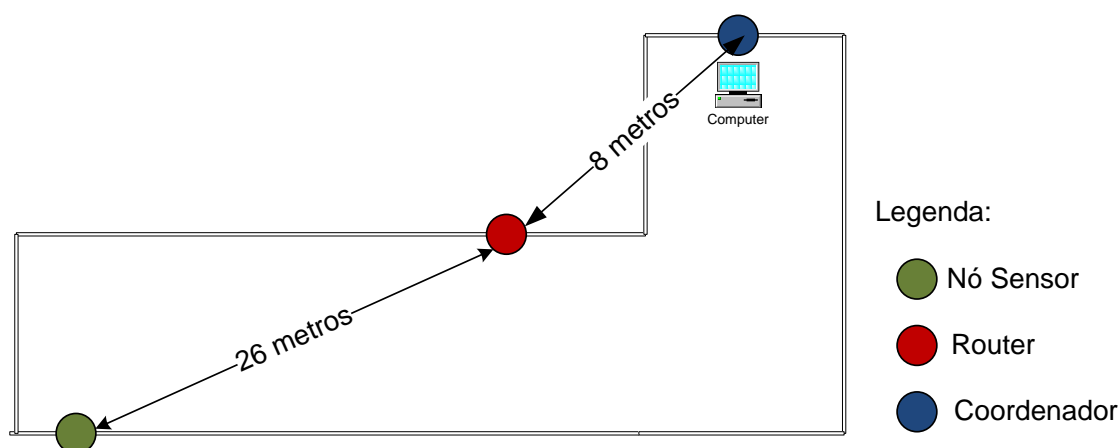


Figura 72- Esquema de testes de encaminhamento

Inicialmente ligou-se o coordenador de rede, ou seja, um módulo *Xbee* (com funções de criação e controlo de rede) a uma placa de ligação de dados ao computador. Seguidamente configurou-se os parâmetros necessários, recorrendo à aplicação X-CTU.

Depois disto, colocou-se o dispositivo router ligado a uma tomada de uso geral fora do laboratório, mais concretamente no corredor do piso -2.". Apesar da existência de paredes e outros obstáculos, existiu comunicação entre o *router* e o coordenador da rede. Este facto foi comprovado através da recepção por parte do coordenador de rede, de uma mensagem API enviada pelo *router*. Essa mensagem observada através do X-CTU continha o endereço físico do *router* e assim comprovou-se que este dispositivo estava ligado na rede *ZigBee* criada.

Por fim ligou-se o nó sensor a uma distância 34 metros da estação base, com várias paredes entre si. Nesta fase verificou-se que deixando o router desligado, não era conseguida comunicação entre o sensor e a estação base, ou seja, o dispositivo final não conseguia ligar-se à rede *ZigBee* visto que estava demasiado distante. No entanto, quando se ligou o dispositivo intermediário *router*, o nó sensor conseguiu integrar-se na rede *ZigBee* criada. Aqui verificou-se a extrema utilidade do *router*, que faz o alargamento da rede, permitindo a entrada de novos dispositivos.

Estando todos os dispositivos integrados na mesma rede, observou-se na estação base a chegada contínua de várias mensagens, algumas do nó sensor e outras do *router* (o qual também realiza a monitorização). Facilmente conseguiu-se distinguir as mensagens dos dois dispositivos, através dos bytes específicos na mensagem *ZigBee* API correspondentes aos endereços de cada componente.

Conclusões deste teste:

Com estes testes garantiu-se objectivamente a fiabilidade da rede *ZigBee*, ficando com garantias que os parâmetros ambientais podem ser recolhidos por dispositivos colocados a distâncias consideráveis da estação base (pelo menos 30metros *indoor*), visto que os dispositivos routers estando colocados numa zona intermediária, conseguem encaminhar os dados vindos dos Nós até o coordenador de rede.

A partir de testes reais, ficaram comprovadas as potencialidades do protocolo *ZigBee* para criação e controlo das redes de sensores sem fios. Com isto reforçou-se a confiança no sucesso do projecto, antes de partir-se para os testes finais no Museu de Arte Contemporânea da Madeira.

6.5 Controlo remoto de um LED

Antes de testar o controlo remoto de aparelhos eléctricos, achou-se conveniente testar esse controlo em dispositivos mais simples, como um LED.

1ºPasso: Configuração dos módulos Xbee

A partir do programa X-CTU configurou-se o dispositivo coordenador com os seguintes parâmetros:

- PAN ID: 234
- *Firmware: ZNET 2.5 COORDINATOR API*
- *Node discovery options: 2*

Quanto ao dispositivo end device (que controla o LED) foram gravados os seguintes parâmetros:

- PAN ID: 234

- *Firmware: ZNET 2.5 ROUTER / END DEVICE API*
- *Chanel verification: 1*
- *D1 (pin 19) : Do Low*

2ºPasso: Envio da mensagem de controlo API

A partir do coordenador de rede, foi enviada uma mensagem API *ZigBee* com o formato apropriado para o controlo remoto do nível de tensão de um determinado PIN do dispositivo End Device. Assim sendo, para que o nível do PIN 19 do *Xbee* end device mudasse para o estado “High” e por consequência ligasse o LED que está associado a este no pin, teve-se que enviar a seguinte mensagem:

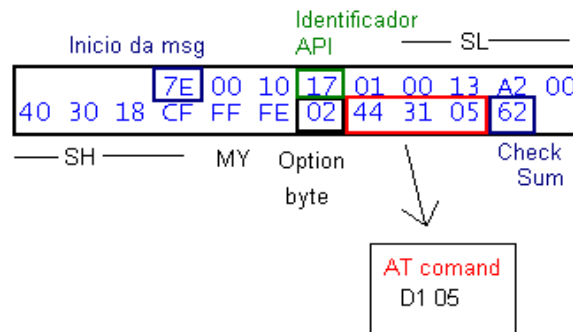


Figura 73- Mensagem de comando remoto

Os primeiros bytes dizem respeito à inicialização da mensagem e ao comprimento da mesma. O 4º byte indica o tipo de mensagem API que está a ser enviado, neste caso estamos perante uma mensagem de controlo remoto. Os bytes seguintes (5-15) dizem respeito a um conjunto de endereços do dispositivo end device. O byte 16 é de opção do comando, sendo que os bytes seguintes indicam o tipo de comando que se pretende enviar. Atendendo a que queremos controlar o pin 19 (D1), os bytes 44 e 31 são o valor correspondente hexadecimal dos dois caracteres (D1). O byte 05 é colocado para a mudança do estado do pino para o nível “high”. Por fim o último byte é o checksum.

Para desligar o LED, enviou-se uma mensagem idêntica à apresentada anteriormente, com a diferença do penúltimo byte ser 04 para que o PIN voltasse para o estado “LOW” e consequentemente desligasse o led.

6.6 Controlo remoto do desumidificador

O controlo do desumidificador é semelhante ao do LED em termos de software, ou seja na mensagem enviada pelo coordenador *ZigBee* até ao end/device. A mudança está no hardware mais complexo que teve de ser criado para que pudesse haver controlo de desumidificadores, no sistema implementado pelo projecto de Mestrado.

Para este teste configurou-se o coordenador e o módulo *Xbee* do dispositivo de controlo para estarem na mesma rede. Configurou-se ainda o pino 19 do módulo *Xbee* controlador, para que este estivesse no modo "LOW". Colocou-se o controlador de humidade numa tomada de uso geral, e por sua vez um aparelho desumidificador ligado ao dispositivo construído.

Seguidamente, enviou-se uma mensagem de comando a partir do coordenador de rede, com vista a mudar o pino 19 para o estado "HIGH" e consequentemente activar o desumidificador.

Observou-se, através de uma janela do XCTU (Figura 74), as mensagens de comando enviadas pela estação base.

~.....@	D6 02 AF 04 D7 7E 00 15 90 00 13 A2
0.....@	00 40 30 18 CF 00 02 01 FF FF FF FF
~.....@	02 D7 02 AE 04 D7 7E 00 15 90 00 13
@0.....@	A2 00 40 30 18 CF 00 02 01 FF FF FF
~.....@	FF 02 D7 02 AE 04 D7 7E 00 15 90 00
0.....@	13 A2 00 40 30 18 CF 00 02 01 FF FF
~.....@	FF FF 02 D7 02 AE 04 D7 7E 00 15 90
0.....@	00 13 A2 00 40 30 18 CF 00 02 01 FF
~.....@	FF FF FF 02 D7 02 AF 04 D6 7E 00 15
0.....@	90 00 13 A2 00 40 30 18 CF 00 02 01
~.....@	FF FF FF FF 02 D7 02 AE 04 D7 7E 00
0.....@	15 90 00 13 A2 00 40 30 18 CF 00 02
~.....@	01 FF FF FF FF 02 DA 02 B0 04 D2 7E
0.....@	00 10 17 01 00 13 A2 00 40 30 18 9F
~.....@	FF FE 02 44 31 05 92 7E 00 0F 97 01
@0.....@	00 13 A2 00 40 30 18 9F 7E B4 44 31
~.....@	00 E4 7E 00 15 90 00 13 A2 00 40 30
0.....@	18 CF 00 02 01 FF FF FF FF 02 D9 02
~.....@	AF 04 D4 7E 00 10 17 01 00 13 A2 00
0.....@	40 30 18 9F FF FE 02 44 31 04 93 7E
@0.....@	00 0F 97 01 00 13 A2 00 40 30 18 9F
~.....@	7E B4 44 31 00 E4 7E 00 15 90 00 13
0.....@	A2 00 40 30 18 CF 00 02 01 FF FF FF
@0.....@	FF 02 D8 02 AF 04 D5 7E 00 15 90 00
~.....@	13 A2 00 40 30 18 CF 00 02 01 FF FF
0.....@	FF FF 02 D8 02 B0 04 D4 7E 00 15 90
~.....@	00 13 A2 00 40 30 18 CF 00 02 01 FF

Figura 74- Mensagens de comando, para controlo de humidade

Os resultados foram muito positivos, o dispositivo criado conseguiu receber as mensagens de controlo, conseguiu-se mudar o estado do pino 19 e com a ajuda fundamental do relé activou-se e desactivou-se o desumidificador.

6.7 Recepção de dados a partir de vários sensores

Nesta fase final, ligou-se 3 nós sensores e um *router* construídos para monitorização ambiental. O objectivo foi verificar a recepção contínua, por parte da estação base, de mensagens dos vários módulos espalhados por uma sala, visto que no Museu a situação será idêntica. Na Figura 75 tem-se uma visualização do cenário criado nas instalações da UMA, simulando o que irá acontecer no Museu.

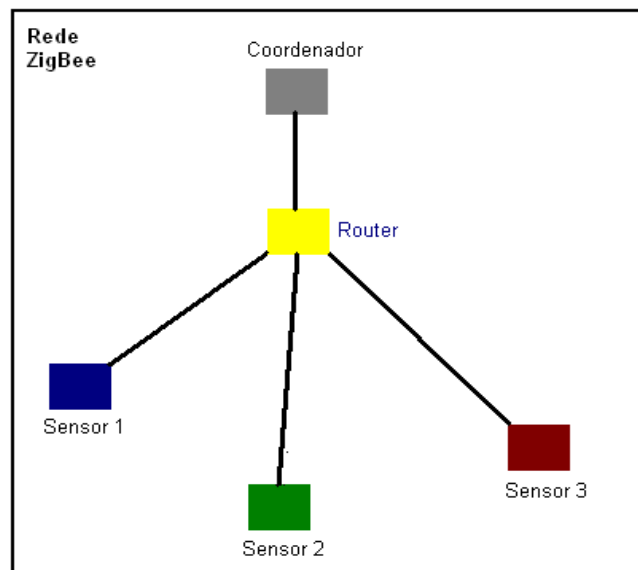


Figura 75- Rede Zigbee de Teste

Com este teste, verificou-se que todos os dispositivos conseguem se ligar ao coordenador de rede, comunicando correctamente. O coordenador que foi ligado em primeiro lugar, escolheu um canal de frequência livre para transmitir, sendo que os restantes dispositivos foram se ligando à rede criada pelo coordenador.

Quando os nós sensores não conseguiram se ligar directamente ao coordenador, estes ligaram-se à rede através do dispositivo *router*, que estava mais próximo da estação base. Este encaminhou os dados monitorizados pelos nós e enviou os seus próprios dados também monitorizados.

Na Figura 76, observa-se as várias mensagens recebidas pelo coordenador de rede, visualizadas através do X-CTU.

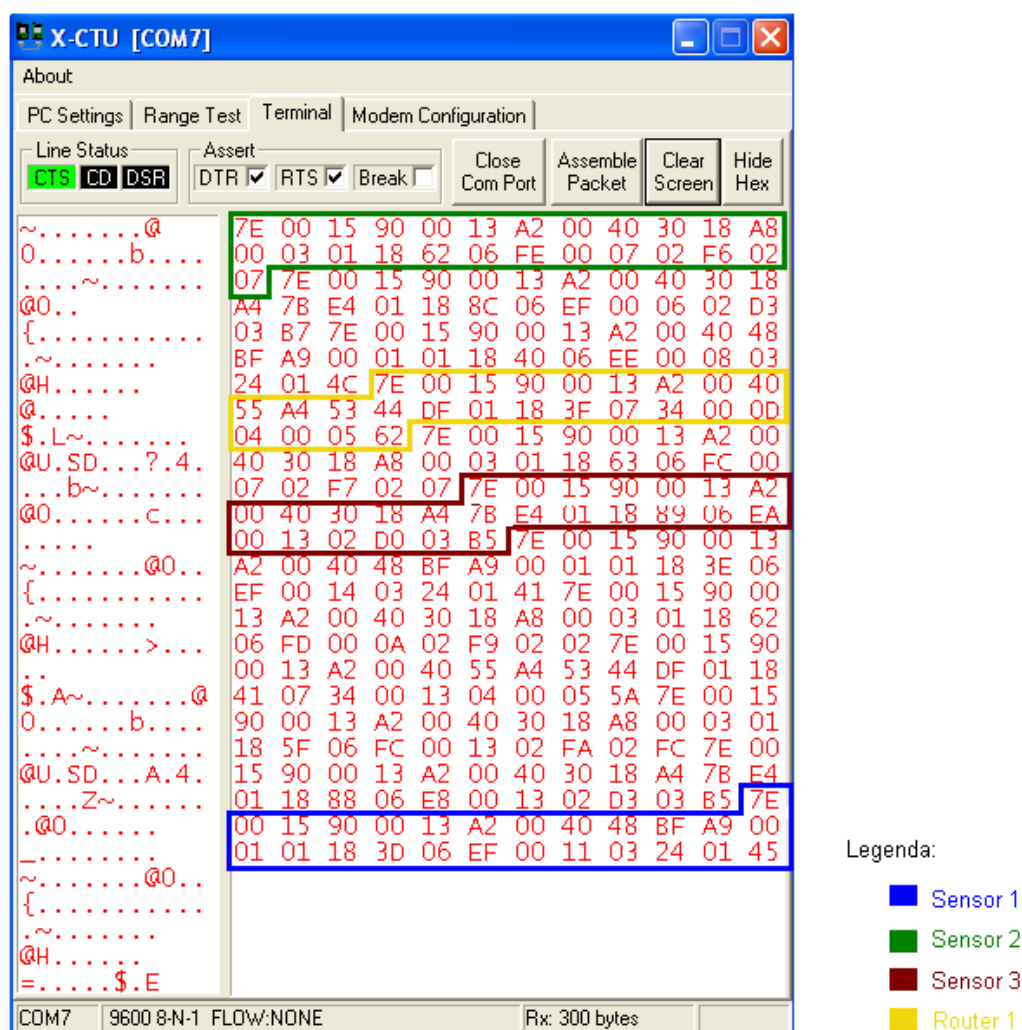


Figura 76- Mensagens recebidas pelo coordenador

As mensagens dos vários módulos são mais facilmente distinguidas, através do penúltimo byte da mensagem, que foi ai adicionado para esse efeito. Além disso, os seus endereços físicos também as diferenciam.

Assim comprovou-se que pode existir monitorização por parte de vários módulos sensores, de uma forma simultânea, sendo que no sistema WISE-MUSE, a informação que chega ao coordenador através destas mensagens, é depois tratada num programa desenvolvido num outro projecto de mestrado, que permite visualizar os vários parâmetros medidos em ambiente gráfico e em tempo real.

6.8 Testes comparativos do nó sensor

Nesta secção, são comparados os resultados obtidos pelo Nó Sensor WISE-MUSE com outros aparelhos, também capazes de monitorizar parâmetros ambientais, mas de uma forma manual. Aqui pretende-se ter uma garantia, de que os valores obtidos com o protótipo desenvolvido são fiáveis, através de um confronto com aparelhos já existentes para a captura desses dados. Infelizmente, não foi obtida autorização para se deslocar às salas dos Museus, antes da entrega da tese de mestrado, a fim de efectuar estes últimos testes nesse cenário. No entanto, retirou-se estes resultados no laboratório de electrónica da Universidade da Madeira. As amostras foram recolhidas das 16h20 às 17h50, com intervalos de 10 minutos entre cada medição.

Para comparar a luminosidade, utilizou-se o luxímetro *Lutron LX-101*. Quanto á temperatura e estado da bateria (volts) utilizou-se o multímetro *FLUKE 87*. Relativamente aos valores da humidade, não foi conseguido requisitar nenhum aparelho no laboratório que servisse de comparação, no entanto os valores obtidos apresentam-se coerentes com as características do espaço, nesta altura do ano.

De seguida são apresentados os gráficos dos resultados obtidos, relativamente à monitorização manual e automática dos parâmetros luz, temperatura e estado da bateria.

Na Figura 77 apresenta-se os valores de luminosidade analisados:

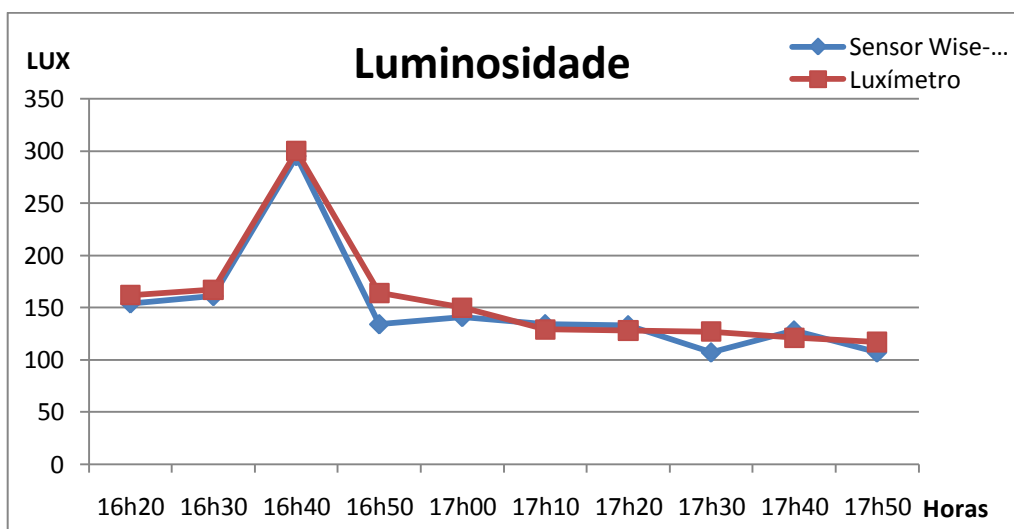


Figura 77- Comparação de luminosidade

Relativamente ao gráfico da figura anterior, observa-se que os valores de luminosidade (factor de muita sensibilidade) foram muito semelhantes entre os dois dispositivos. Em ambos os casos os valores medidos na sala estiveram quase sempre entre os 100 e os 150 lux. No entanto, existiu um pico (300lux) detectado por ambos os dispositivos. Isto deveu-se muito provavelmente à abertura de uma porta ou janela.

Na Figura 78 tem-se o gráfico comparativo dos valores de temperatura.

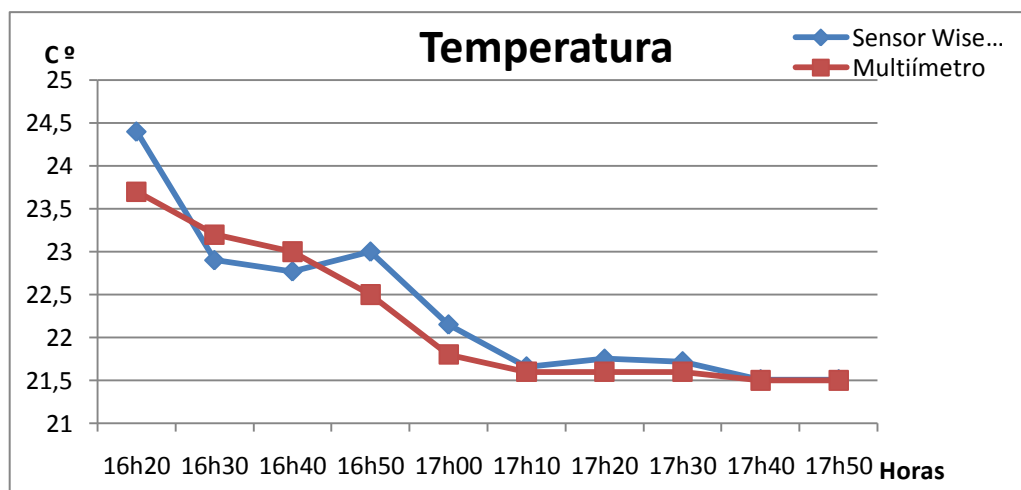


Figura 78- Valores de temperatura comparados

A temperatura baixou ao longo do tempo de monitorização, uma situação normal pois o final da tarde foi se aproximando. Apesar de existirem algumas diferenças entre os dois dispositivos, estas são na ordem das décimas, situação esta que pode dever-se à precisão do sensor STH15 que é de $\pm 0,3C^\circ$, e também ao erro associado ao multímetro.

Quanto aos valores obtidos para a humidade, apresentamos os valores do nó sensor WISE-MUSE na Figura 79:

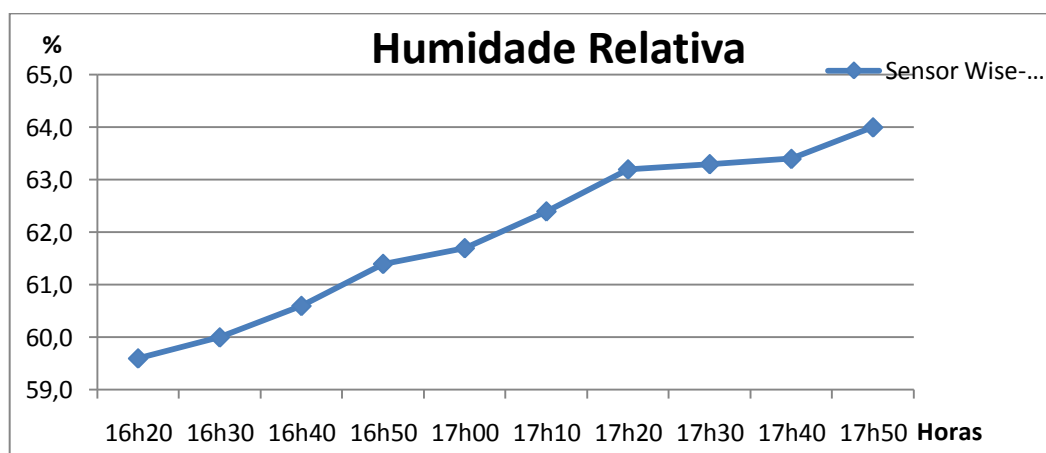


Figura 79- Valores de Humidade medidos pelo Nó Sensor WISE-MUSE

Relativamente aos valores de humidade, apesar de não existir elementos de comparação, os valores são de certa forma normais, para a altura do ano na Madeira. De notar que à medida que a temperatura foi baixando ao longo da tarde, a humidade por seu lado foi subindo até atingir os 64% às 17h50.

Por fim na Figura 80 apresenta-se o gráfico comparativo dos valores de tensão medidos.

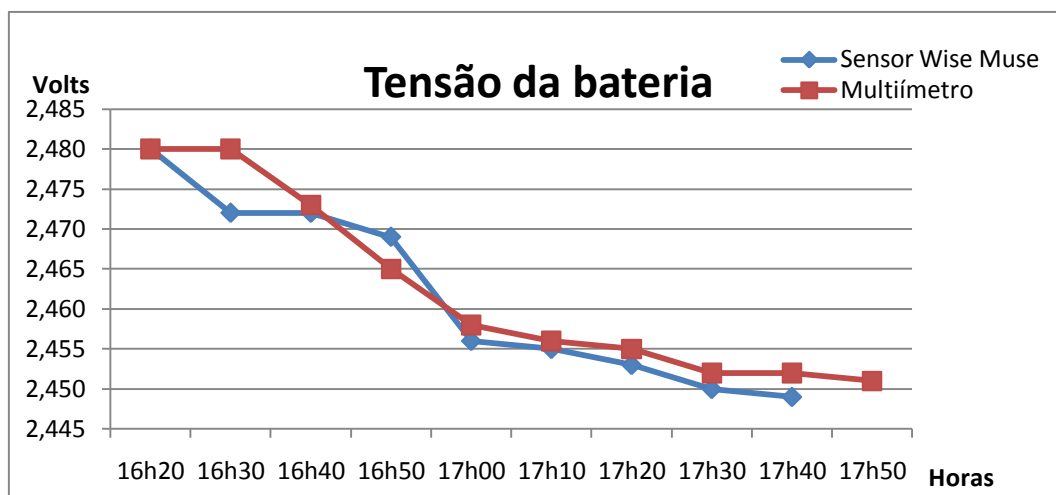


Figura 80- Comparação da tensão na bateria

Mais uma vez existiu proximidade de valores, entre a medição feita pelo nó sensor WISE-MUSE, e o aparelho comparativo, neste caso o multímetro. A diferença é na ordem das centésimas, podendo se afirmar assim que existe uma boa monitorização do estado da bateria.

6.9 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram efectuados testes importantes, para a confirmação de fiabilidade dos módulos construídos. Verificou-se que a presença do dispositivo *router* permite o alargamento da rede. Testou-se o controlo remoto do desumidificador, através do dispositivo construído neste projecto. Por fim, comparou-se os resultados obtidos pelo sensor WISE-MUSE com outros dispositivos que fazem a monitorização, mas de uma forma manual. Um dos objectivos era testar os componentes desenvolvidos e a rede *ZigBee* no Museu, mas infelizmente não obtivemos autorização antes da entrega desta tese de mestrado, por motivos da instalação de uma nova exposição. No entanto, no dia 5 de Dezembro de 2009 será instalada uma rede *ZigBee* composta de 4 nós sensores e 2 routers WISE-MUSE, junto com o protótipo da plataforma *web*, no museu de Arte Contemporânea

de Funchal. Estes resultados serão documentados e apresentados no dia da defesa deste mestrado, sendo posteriormente submetidos para publicação na revista "*International Journal of Sensor Networks (IJSNet)*", na edição especial "*Advances in Theory and Application of Wireless, Ad Hoc, and Sensor Networks*".

Conclusões

7.1 Introdução

Este projecto de mestrado realizou-se no contexto do projecto WISE-MUSE, estando simultaneamente inserido na disciplina projecto do mestrado de telecomunicações e redes. Conseguiu-se desenvolver um conjunto de dispositivos apropriados para monitorização automática e em tempo real, de factores climáticos em museus. O controlo da humidade foi também conseguido.

O protocolo *ZigBee* foi o grande impulsionador deste trabalho. Foi alvo de um estudo importante, sendo que após identificar-se as suas características e potencialidades foi adoptado como tecnologia para a transmissão dos dados monitorizados. Esta tecnologia de baixo custo, baixo consumo energético possibilita uma transferência segura e fiável de dados entre os dispositivos electrónicos. A possibilidade de transmitir informação importante sem a necessidade e o incómodo de cablagem foi desde logo um factor de entusiasmo.

O microcontrolador atmega168 assumiu também um papel determinante no sucesso dos protótipos. Foi também analisado e estudado, mostrando ser adequado para fazer o tratamento dos dados recebidos pelas unidades sensoriais. Outros aspectos (alimentação energética, programação dos módulos, etc.) foram também trabalhados para que no final pudesse ser apresentado um conjunto de dispositivos capazes de monitorizar e controlar factores climáticos.

7.2 Principais contribuições

As principais contribuições deste projecto de Mestrado são:

- **Desenvolvimento de protótipos:**

Foram implementados os seguintes dispositivos:

- ✓ Nós Sensores que monitorizam eficientemente a humidade, temperatura e luz, e que possuem pequenas dimensões, baixo consumo energético e custos reduzidos, adequando-se à aplicação em Museus.
- ✓ Dispositivos routers, que além de efectuarem o encaminhamento de dados oriundos dos Nós Sensores, efectuam eles próprios monitorização ambiental.
- ✓ Dispositivo controlador de humidade, que ao receber um comando remoto vindo da estação base, controla um aparelho desumidificador.

▪ **Estudo de propagação de sinal, no Museu de arte contemporânea da Madeira:**

As principais actividades realizadas nesta área foram:

- ✓ Estudo de modelos teóricos, adequados para o cenário estabelecido;
- ✓ Medições de nível de sinal nas salas de reservas;
- ✓ Criação de mapas de cobertura da rede *ZigBee* nas salas de reservas;

▪ **Publicações de Resultados:**

- ✓ Publicação de um artigo numa revista internacional:

Referência: L.M. Rodríguez Peralta, L.M.P. Leão Brito & B.A. Teixeira Gouveia, *“The WISE-MUSE Project: Environmental Monitoring and Controlling of Museums based on Wireless Sensors Networks”*. EJSE – Electronic Journal of Structural Engineering, Special Issue on Sensor Network for Building Monitoring: From Theory to Real Application, To be published in December 2009, ISSN 1443-9255.

- ✓ Elaboração de 2 relatórios internos para o projecto WISE-MUSE

Relatório 1: “ Propagação de sinal, nas salas de reservas do Museu de Arte Contemporânea da Madeira”, Relatório interno do projecto WISE-MUSE, Março 2009, 10 páginas.

Relatório 2: “ Desenvolvimento dos dispositivos do sistema WISE-MUSE”, Relatório interno do Projecto WISE-MUSE, DME: Julho 2009, 15páginas.

7.3 Trabalhos futuros

Este projecto terá certamente desenvolvimentos futuros, baseados no trabalho efectuado até a data. Esses trabalhos futuros poderão ser:

- Aumentar a cobertura da rede de sensores no Museu, construindo mais dispositivos que façam a monitorização nos restantes espaços culturais.
- Reduzir ainda mais o consumo de energia dos protótipos. Isto poderá ser conseguido, através da optimização do código dos microcontroladores dos dispositivos sensores.
- Estender as capacidades sensoriais dos módulos, nomeadamente com a adição de sensores de CO₂ e de monóxido de carbono.
- Proporcionar o envio contínuo do parâmetro RSSI dos sensores, para a estação base.
- Aplicar os dispositivos já desenvolvidos noutros cenários de utilização, nomeadamente no Museu da Baleia e no Museu de arte Sacra da Madeira. De referir que estes espaços já demonstram interesse no sistema WISE-MUSE. Neste caso, os dispositivos teriam de ser adaptados aos novos cenários e necessidades, no entanto essa adaptação não será complexa, devido à flexibilidade dos dispositivos.

7.4 Balanço final

No final de um ano de investigação e trabalho neste projecto de mestrado, é possível afirmar que foram atingidos os principais objectivos propostos. Foi uma experiencia muito enriquecedora e que complementou de uma forma consistente muitas das competências adquiridas ao longo do mestrado. Além das necessidades do museu, este projecto mostrou desde logo ser muito atractivo, porque juntou conteúdos de todas as áreas do curso. Desde a electrónica, passando pelas telecomunicações, pelas redes e até à programação. A possibilidade de estudar diversas tecnologias e conceitos recentes tornou-se desde logo aliciante, sendo que os meus conhecimentos nessas áreas saíram certamente reforçados.

A mais-valia deste trabalho, é que este representa uma aplicação real dos conceitos estudados sobre as WSN, através da monitorização ambiental realizada no Museu de arte contemporânea do Funchal.

Referências Bibliográficas

[1] L. M. Pestana Leão de Brito, L. M. Rodriguez Peralta, "Basic Concepts of Wireless Sensor Networks", in Encyclopedia of Networked and Virtual Organizations, Idea Groups, Vol. I, pp. 57-64, ISBN: 978-1-59904-885-7, 2008.

[2] Andrew Wheeler, Ember Corporation, "Commercial Applications of Wireless Sensor Networks Using ZigBee", in IEEE Communications Magazine, Abril 2007. Acedido em Junho de 2009 através do site: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4149662.

[3] Paolo Baronti, Prashant Pillai, Vince Chook, Stefano Chessa, Alberto Gotta, Y. Fun Hu, "Wireless Sensor Networks: a Survey on the State of the Art and the 802.15.4 and ZigBee Standards", in Computer communications ISSN 0140-3664.

Acedido em Novembro 2008 através do site: <http://cone.informatik.uni-freiburg.de/lehre/seminar/adhoc-s08/RoutingMAC/ZigBeeSurvey.pdf>

[4] G. N. Sol Teixeira, L. M. Rodríguez Peralta, "Comparing ZigBee, Bluetooth, UWB, and Wi-Fi", in Encyclopedia of Networked and Virtual Organizations, Idea Groups, Vol. I, pp. 288 - 296, ISBN: 978-1-59904-885-7, 2008.

[5] "Wireless Sensor Applications for Health, Wellness and Fitness", Março 2009. Documento fornecido pela ZigBee Alliance. Acedido em Agosto de 2009 através do site oficial: <http://www.ZigBee.org/LearnMore/WhitePapers/tabid/257/Default.aspx>.

[6] Fabio L. Zucatto, Clecio A. Biscassi, Ferdinando Monsignore, Francis Fidélis, Samuel Coutinho2, e Mónica L. Rocha, "ZigBee for Building Control Wireless Sensor Networks", 2007 IEEE.

[7] Joaquim Amândio R. Azevedo, "Apontamentos de Comunicações Digitais", UMa, 2007.

[8], Gilles Thonet, Patrick Allard-Jacquín, Pierre Colle, *"ZigBee – WiFi Coexistence"*, Abril 2008. Documento fornecido pela ZigBee Alliance. Acedido em Julho de 2009 através do site: <http://www.ZigBee.org/LearnMore/WhitePapers/tabid/257/Default.aspx>

[9] *"Mica 2 Document Part Number: 6020-0042-07 Rev A"*. Documento fornecido pela Crossbow. Acedido em Janeiro de 2009 através do site: <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=174>

[10] *" Mica Z Document Part Number: 6020-0060-02 Rev A."* Documento fornecido pela Crossbow, Acedido em Janeiro de 2009, através do site: http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAZ_Datasheet.pdf

[11] *"Tmote Sky, Data sheet 2/6/2006"*. Documento fornecido pela Moteiv. Acedido em Fevereiro de 2009 através do site: http://www.moteiv.com/community/Tmote_Sky_Downloads

[12] Documentação Interna do Museu Forte de São Tiago, Funchal- Madeira, 2008.

[13] Web site: <http://focus.ti.com.cn/cn/graphics/aap/ZigBee.gif>

[14] SEYBOLD, John, *"Introduction to Radio Propagation"*, Wiley-Interscience, 2005.

[15] LOPES, Rui Miguel de Jesus, *"Modelos e planeamento para redes locais de acesso via rádio"*, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Abril 2004. Acedido em Fevereiro de 2009, através do site: http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/Projecto/2003_2004/WLAN/Relat%C3%B3rio_Rui_Lopes.pdf

[16] VIEIRA, Pedro, *"Modelos de Propagação para Comunicações Móveis"*, Propagação II, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

[17] “SHT1x / SHT7x, Humidity and Temperature Sensor Data sheet”, V2,02 Julho 2004. Documento fornecido pela *Sensirion*. Acedido através do site: <http://www.sensirion.com>, em Janeiro 2009.

[18] “ATMEGA 168 Data sheet, 8025G–AVR, December, 2008”. Documento fornecido pela *atmel*: Acedido através do site: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf

[19] “ S1087/S1133 Photodiode Data sheet. Cat. No. KSPD1039E01, Abril. 2001” .Documento fornecido pela *Hamamatsu*.

[20] “Xbee Product Manual, 2006”. Documento fornecido pela *Digi*. Acedido através do site: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000991_a.pdf

[21]: “ AC-DC 10Wats ECL10 Series Data Sheet”, 10, Outubro 2008. Documento fornecido pela empresa *XP-POWER*. Acedido através do Web site: www.xppower.com, em 20/04/2009.

A1 Código do Microcontrolador Atmega 168

A1.1 Função principal do programa

```
int main()
{
    //Configuração das portas do Atmega168

    DDRB|=(1<<SCK);           // Coloca o pino SCK como output
    DDRB|=(1<<DATA);          // coloca o pino DATA como output
    DDRD|=(1<<LED);           // Coloca o pino LED como output
    PORTD&=~(_BV(LED));       // Desliga LED
    DDRD|=(1<<XBEEESLEEP);    // Coloca o pino XBEEESLEEP como output
    PORTD&=~(_BV(XBEEESLEEP));

    // Configuração do ADC (SENSOR DE LUZ) //

    DIDR0=0x00;
    ADMUX = SENSLUX;
    ADCSRA = 0x86;

    //Outras configurações
    clock_prescale_set(0);
    USART_Init(51);
    configTimer2();

    _delay_ms(1000);
    PORTD|=(1<<LED);

    s_connectionreset();
    sei(); //habilita a interrupção
    segundos=0;

    for (;;)
    {

        sleep(); //Adormece o Atmega168, acordando-o quando ocorre a interrupcao
    }
}
```

A1.2 Adormecimento do microcontrolador

```
void sleep()
{
    set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_SAVE); // definicao do modo sleep
    sleep_enable(); // permite que o atmega168 entre no modo sleep
    sleep_mode(); // aqui o atmega168 entra de facto no modo sleep (adormece)
    sleep_disable(); // primeira coisa após acordar do sleep
}
```

A1.3 Comunicação UART

```
void USART_Init( unsigned int ubrr )
{
    UBRR0H = (unsigned char)(ubrr>>8); //
    UBRR0L = (unsigned char)ubrr; //
    UCSR0B = (1<<RXEN0)|(1<<TXEN0); // Rx Tx enable
    UCSR0C = (3<<UCSZ00);
}
void USART_Transmit( unsigned char data )
{
    /* Wait for empty transmit buffer */
    while ( !( UCSR0A & (1<<UDRE0)) )
    ;
    /* Put data into buffer, sends the data */
    UDR0 = data;
}
unsigned char USART_Receive( void )
{
    /* Wait for data to be received */
    while ( !(UCSR0A & (1<<RXC0)) );
    /* Get and return received data from buffer */
    return UDR0;
}
```

A1.4 Interrupção temporal

```
ISR(TIMER2_OVF_vect)
{
    segundos++;
    if(segundos == 10){ //Espera n segundos até efectuar as medições
        segundos=0;

        PORTD&=~(_BV(XBEE_SLEEP)); // Acorda XBEE

        value humi_val,temp_val; //declaração das variaveis
        unsigned char error,checksum;
        int lux;
        int bateria;
    }
}
```

```

char msg[27] =
{0x7e,0x00,0x17,0x10,0x01,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xFF,0xFE,0x00,0x00,0xff,0xff
,0xff,0xff,0xff,0xff,0xff,0x04,0x00}; // Inicio da msg para ZigBee API

error=0;
error+=s_measure((unsigned char*) &humi_val.i,&checksum,HUMI); //measure humidity
error+=s_measure((unsigned char*) &temp_val.i,&checksum,TEMP); //measure temperature

        if(error!=0) s_connectionreset(); //in case of an error:
connection reset
else
{
    msg[17] = temp_val.i>>8;
    msg[18] = temp_val.i;
    msg[19] = humi_val.i>>8;
    msg[20] = humi_val.i;
}

lux = medirLux(); //Medicao da luz
msg[22] = lux;
msg[21] = lux>>8;

PORTD&=~(_BV(LED)); //liga o led

bateria = medirBateria(); //Medicao da bateria
msg[24] = bateria;
msg[23] = bateria>>8;

_delay_ms(1); // espera que o XBEE acorde

//////// Cálculo de checksum //////////
char cs = 0;
cs = checksum_1_byte((unsigned char*) &msg,23,3);
msg[26] = cs;
////////////////////////////////////

PORTD|=(1<<LED); //desliga o led

////Envio da Mensagem API////////
int i=0;
for(i=0;i<27;i++){

        USART_Transmit(msg[i]);    }

    USART_Transmit('\r');
    _delay_ms(1);

////////Fim de envio de mensagem////////

PORTD|=(1<<XBEE_SLEEP); // adormece XBEE
}
}

```

A.2 Programador AVR-ISP 500

O AVR – ISP500 é um sistema de programação via USB para microcontroladores AVR. Implementa o protocolo STK500v2, definido pela *Atmel* o que o torna compatível com um variado conjunto de ferramentas, incluindo o *AvrStudio* e *avrdude*. Neste projecto, esta ferramenta teve uma elevada importância, pois como já foi referido anteriormente, permitiu efectuar diversos uploads de código para o atmega168, em poucos segundos.



Figura 81- Programador AVR-ISP500

Potencialidades do sistema:

- Totalmente compatível com o protocolo STK500;
- Trabalha com o *AvrStudio*, WinAVR e Avrdude;
- Possui porta USB para conexão com o computador;
- Possui um LED bicolor para o status das operações;
- Suporta o standard da Atmel ICSP10
- Alimentado por USB;
- Possui saída de *clock* no pino 3 do ICSP10 para reconfigurar fuse do relógio externo.
- Suporta tensões da aplicação alvo entre 1,8v e 5.5v;
- ISP frequências de clock entre 5kHz to 2MHz.

Este programador possui 2 tipos de conectores, o ICSP10 e o ICSP6. Apesar de no primeiro módulo de teste ter-se projectado na placa um espaço para a conexão de 10 pinos do programador, verificou-se que o conector de 6 pinos seria suficiente, reduzindo assim o tamanho do módulo.

ICSP6		
pin	Abbrev.	description
1	MISO	Serial Input
2	V_TAR	Target VCC
3	SCK	Serial Clock
4	MOSI	Serial Output
5	TRST	Target RESET
6	GND	Ground

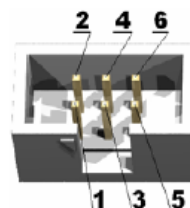


Figura 82- Pinos ICSP6

A.3 AVR Studio

O *AVR Studio* é uma aplicação *Windows* para programação e simulação dos microcontroladores da família AVR da *Atmel*. O ambiente contém um editor de programas em linguagem de compilação, um compilador e um simulador. O programa é iniciado pela definição de um projecto onde um ou mais programas em assembler ou em linguagem C são inseridos.

Esta aplicação permite conexão com programadores AVR (no nosso caso o programador AVR ISP-500) que por sua vez é ligado ao microcontrolador. A figura 83 mostra a janela principal do programa AVR Studio.

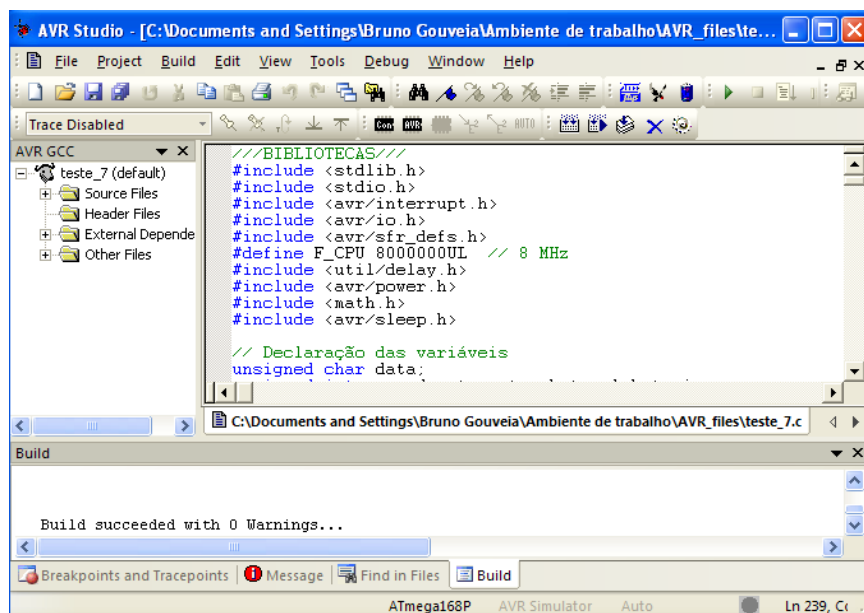


Figura 83-Janela principal do AvrStudio

Na zona central do ambiente AVR Studio tem-se uma janela onde o código pode ser alterado, consoante os objectivos de quem está a programar. À esquerda tem-se uma pequena janela onde estão colocados os ficheiros do projecto, sendo que na parte inferior da tela existe uma caixa que reporta os erros e avisos do código detectados pelo programa. O botão preto por cima da janela central faz a ligação do programa com o programador do microcontrolador. Esta ferramenta foi essencial neste projecto, visto que o módulo de processamento teve de ser diversas vezes testado com vários códigos, até se definir o código final do programa.

A.4 Ultiboard

Na fase de desenho do nó sensor, utilizou-se o programa *Ultiboard*, da *National Instruments*, que possui diversas ferramentas para criação do *layout* de placas de circuito impresso. É importante referir que este programa não permite a simulação de circuitos, apenas preocupa-se com o tamanho e forma dos componentes e com a criação das ligações entre os mesmos. No entanto, é permitido a exportação de circuitos do programa de simulação *Multisim* para o *ultiboard*.

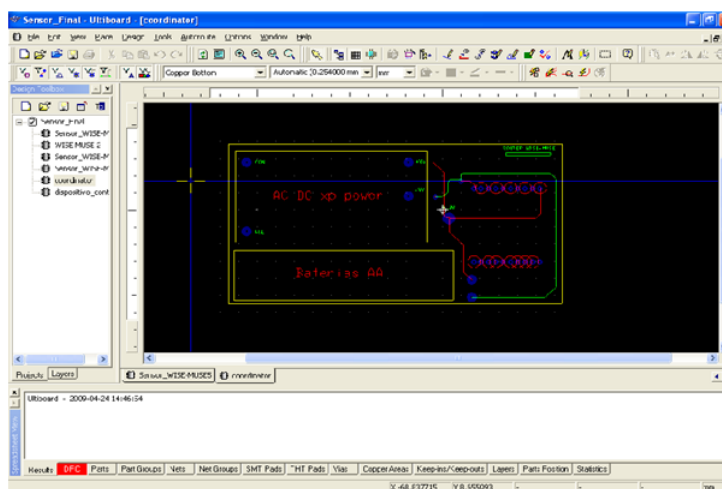


Figura 84-Janela principal do programa

Ao iniciar o programa, este apresenta uma janela principal com um quadro onde são colocados os componentes, bem como as suas ligações. Na janela do lado esquerdo ficam acessíveis os vários projectos que poderão estar no mesmo ficheiro. Na parte superior está presente um conjunto de ferramentas para facilitar o desenho que se pretende. Por fim, na parte inferior existe uma caixa de relatório de erros que possam existir nas ligações ou nos elementos, bem como outras características do circuito. Esta aplicação mostrou-se de grande utilidade, pois facilitou a passagem dos circuitos idealizados anteriormente para a placa de circuito impresso.

A.5 Módulos Xbee9

Configuração dos pinos Xbee:

Pino #	Nome	Direção	Descrição
1	VCC	-	Alimentação 3,3v
2	DOUT	Saída	Saída de dados da UART
3	DIN / $\overline{\text{CONFIG}}$	Entrada	Entrada de dados da UART
4	DO8*	Saída	Saída digital 8
5	$\overline{\text{RESET}}$	Entrada	Inicializa módulo (um pulso nível 0 de pelo menos 200ms)
6	PWM0 / RSSI	Saída	Saída do PWM 0 / Indicador de Força do sinal de RF (RX)
7	PWM1	Saída	Saída do PWM 1
8	(Reservado)	-	Ainda não tem uma função definida (futura implementação)
9	$\overline{\text{DTR}}$ / SLEEP_IRQ / D18	Entrada	Linha de Controle da Função Sleep ou Entrada digital 8
10	GND	-	Terra
11	AD4 / DIO4	Entrada/Saída	Só Entrada Analógica 4 ou Entrada/Saída Digital 4
12	$\overline{\text{CTS}}$ / DIO7	Entrada/Saída	Controle de Fluxo CTS ou Entrada/Saída Digital 7
13	ON / SLEEP	Saída	Indicador de Estado do Módulo
14	VREF	Entrada	Voltagem de Referência para as Entradas A/D
15	Associação / AD5 / DIO5	Entrada/Saída	Indicador de Associação, só Entrada Analógica 5 ou Entrada/Saída Digital 5
16	$\overline{\text{RTS}}$ / AD6 / DIO6	Entrada/Saída	Controle de Fluxo RTS, só Entrada Analógica 6 ou Entrada/Saída Digital 6
17	AD3 / DIO3	Entrada/Saída	Só Entrada Analógica 3 ou Entrada/Saída Digital 3
18	AD2 / DIO2	Entrada/Saída	Só Entrada Analógica 2 ou Entrada/Saída Digital 2
19	AD1 / DIO1	Entrada/Saída	Só Entrada Analógica 1 ou Entrada/Saída Digital 1
20	AD0 / DIO0	Entrada/Saída	Só Entrada Analógica 0 ou Entrada/Saída Digital 0

Figura 85- Configuração de pinos do Xbee [20]

Especificações dos Módulos Xbee:

Specification	XBee	XBee-PRO
Performance		
Indoor/Urban Range	up to 100 ft. (30 m)	Up to 300' (100 m)
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 300 ft. (100 m)	Up to 1 mile (1500 m)
Transmit Power Output (software selectable)	1mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm) conducted, 100 mW (20 dBm) EIRP*
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)	1200 - 115200 bps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-92 dBm (1% packet error rate)	-100 dBm (1% packet error rate)
Power Requirements		
Supply Voltage	2.8 – 3.4 V	2.8 – 3.4 V
Transmit Current (typical)	45mA (@ 3.3 V)	If PL=0 (10dBm): 137mA(@3.3V), 139mA(@3.0V) PL=1 (12dBm): 155mA (@3.3V), 153mA(@3.0V) PL=2 (14dBm): 170mA (@3.3V), 171mA(@3.0V) PL=3 (16dBm): 188mA (@3.3V), 195mA(@3.0V) PL=4 (18dBm): 215mA (@3.3V), 227mA(@3.0V)
Idle / Receive Current (typical)	50mA (@ 3.3 V)	55mA (@ 3.3 V)
Power-down Current	< 10 μ A	< 10 μ A
General		
Operating Frequency	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960" x 1.297" (2.438cm x 3.294cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector	Integrated Whip, Chip or U.FL Connector

Figura 86- Especificações do Xbee [20]